

Politechnika Krakowska  
Wydział Mechaniczny

mgr inż. Magdalena Kupiec

## **PRACA DOKTORSKA**

# **Optyczno - stykowa metoda pomiarów współrzędnościowych**

Promotor pracy:  
dr hab. inż. Jerzy Sładek prof. PK

Kraków, grudzień 2007



*Składam serdeczne podziękowania mojemu promotorowi  
dr hab. inż. Jerzemu Sładkowi prof. PK  
za cenne wskazówki metodologiczne i uwagi udzielane w trakcie  
powstawania tej pracy*

*Wyrazy wdzięczności kieruję też do dr inż. Roberta Sitnikę  
z Politechniki Warszawskiej oraz wszystkich pracowników  
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej  
za rady i wskazówki oraz pomoc podczas wykonywania pomiarów  
laboratoryjnych*

*Chciałabym także podziękować mojemu mężowi i rodzicom za wsparcie*

## SPIS TREŚCI:

1. Wprowadzanie.....	6
2. Współrzędnościowa technika pomiarowa.....	8
2.1. Istota współrzędnościowej techniki pomiarowej.....	8
2.2. Budowa lokalnego układu współrzędnych .....	9
2.3. Podstawowe zespoły i konstrukcje WMP.....	10
2.4. Zastosowanie.....	11
3. Optyczne metody pomiarowe.....	13
3.1. Klasyfikacja metod optycznych.....	13
3.1.1. Metoda skanowania laserowego.....	14
3.1.2. Metoda światła strukturalnego .....	19
3.1.3. Metoda mory projekcyjnej.....	21
3.1.4. Metoda oparta na czasie powrotu impulsu - TOF.....	23
3.1.5. Laserowy system nadążny .....	25
3.1.6. Metoda fotogrametryczna .....	27
3.1.7. Podsumowanie.....	30
3.2. Przegląd aktualnie stosowanych w przemyśle systemów optycznych.....	31
3.2.1. Systemy optyczne stosowane do pomiaru średnich i dużych obiektów.....	31
3.2.2. Wzorce stosowane do sprawdzania i kalibracji optycznych systemów pomiarowych.....	42
3.2.3. Podsumowanie.....	45
4. Różnice pomiędzy systemami stykowymi, a optycznymi.....	47
5. Teoretyczne podstawy dokładności pomiarów.....	50
5.1. Niepewność pomiaru.....	50
5.2. Dokładność maszyn pomiarowych.....	53
6. Teza i cel pracy.....	55
7. Model koncepcyjny systemu hybrydowego.....	57
8. Stanowisko badawcze.....	60
8.1 System 3DMADMAC.....	60

8.1.1. Pomiar fazy.....	61
8.1.2. Kalibracja systemu.....	62
8.1.3. Oprogramowanie sterujące pracą skanera - Mesh3D.....	63
8.2. Maszyna współrzędnościowa PMM 12106.....	65
8.3. Stacja robocza.....	65
8.4. Oprogramowanie PC – DMIS.....	66
9. Budowa wzorca do sprawdzania i kalibracji optycznych systemów pomiarowych.....	67
9.1. Założenia konstrukcyjne.....	67
9.2. Budowa prototypu.....	68
9.3. Budowa wzorca.....	70
10. Realizacja koncepcji pomiarów hybrydowych.....	73
10.1. Kalibracja układu optycznego z wykorzystaniem wzorca i WMP.....	73
10.2. Integracja skanera z oprogramowaniem metrologicznym.....	75
10.3. Uzgodnienie układów współrzędnych WMP oraz systemu optycznego.....	76
10.4. Korekcja dokładności pomiarowej systemu.....	78
11. Budowa modelu niepewności systemu hybrydowego.....	80
11.1. Równanie niepewności.....	85
11.2. Analiza składowych niepewności.....	86
11.2.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru .....	86
11.2.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych.....	86
11.2.3. Niepewność wzorcowania wzorców kalibracyjnych.....	90
11.2.4. Niepewność wpływu temperatury.....	92
11.2.5. Niepewność kalibracji sytemu optycznego.....	96
12. Badania weryfikujące z wykorzystaniem kontrolnego pomiaru długości...99	
12.1. Wyznaczenie obszaru błędów granicznych (MPE) przy użyciu wzorca płytowego.....	99
12.2. Niepewność systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca płytowego.....	110
12.2.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru.....	110
12.2.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych.....	110
12.2.3. Niepewność wzorcowania wzorca płytowego.....	115

12.2.4. Niepewność wpływu temperatury.....	119
12.2.5. Niepewność kalibracji sytemu optycznego.....	120
12.3. Wyznaczenie MPE przy użyciu wzorca typu hantle.....	127
12.4. Niepewność systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca typu hantle.....	131
12.4.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru.....	131
12.4.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych.....	131
12.4.3. Niepewność wzorcowania wzorca typu hantle.....	131
12.4.4. Niepewność wpływu temperatury.....	133
12.4.5. Niepewność kalibracji sytemu optycznego.....	134
12.5. Wyznaczenie MPE przy użyciu wzorca słupkowego.....	136
12.6. Niepewność systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca słupkowego.....	137
12.6.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru.....	137
12.6.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych.....	137
12.6.3. Niepewność wzorcowania wzorca słupkowego.....	137
12.6.4. Niepewność wpływu temperatury.....	139
12.6.5. Niepewność kalibracji sytemu optycznego.....	140
12.6.5. Podsumowanie.....	143
13. Wnioski.....	144
14. Podsumowanie i kierunki dalszych prac.....	147
Literatura.....	149
Załącznik A.....	154
Załącznik B.....	159
Załącznik C.....	162
Załącznik D.....	163
Załącznik E.....	165

## 1. Wprowadzenie

Nowoczesna produkcja charakteryzuje się zróżnicowaniem, krótkim cyklem życia produktu, silną presją na minimalizowanie kosztów przy zachowaniu wysokiej jakości oraz małych tolerancji wykonania.

Wyrobom przemysłowym stawiane są coraz wyższe wymagania funkcjonalne, ergonomiczne, estetyczne. Współcześnie wytwarzane obiekty mają więc bardzo złożoną geometrię 3D, aby oddać jej wymiary z uwzględnieniem kształtu (współrzędnych powierzchni) wymagane są tysiące lub miliony punktów.

Narzędzia pomiarowe spełniające powyższe oczekiwania powinny łączyć szybkość zbierania punktów pomiarowych z zachowaniem wysokiej dokładności. Powinny być zintegrowane w takt linii produkcyjnej (automatyzacja pomiarowa, możliwość 100 % kontroli jakości), z zachowaniem szybkiej reakcji na zmiany produkcji.

Zastosowanie współrzędnościowych maszyn pomiarowych (WMP) pomimo ich wysokiej dokładności jest w świetle nowych potrzeb niewystarczające. Kwestionowany jest długi czas pomiaru (jeden punkt na sekundę), szczególnie dla obiektów wielkogabarytowych produkowanych wielkoseryjnie, gdy charakter i przedmiot produkcji wymaga intensyfikacji kontroli wymiarowo – kształtowej. Przykładowo czas pomiaru całej karoserii samochodu, realizowanego techniką współrzędnościową trwa wiele godzin, co jest dla wielu producentów nie do zaakceptowania. Stąd poszukiwanie efektywniejszych metod pomiaru przy zachowaniu dotychczasowych standardów dokładności pomiaru.

Odpowiedzią na to zapotrzebowanie może być zastosowanie specjalnych systemów optycznych, które pobierają większą ilość danych w krótszym przedziale czasowym. Główną przeszkodą ich stosowania jest ich mała dokładność w porównaniu do klasycznych pomiarów współrzędnościowych realizowanych głowicą stykową i brak integracji informacji uzyskiwanych metodami optycznymi z identyfikacją pojedynczych punktów poprzez oprogramowanie metrologiczne WMP. Dużym ograniczeniem jest też brak jednej uniwersalnej metody przy pomocy której byłaby możliwość sprawdzenia dokładności systemów optycznych w warunkach pomiarów wielkości geometrycznych, tak by możliwe było odniesienie do dokładności pomiarów realizowanych na WMP.

**Przedmiotem pracy jest opracowanie i realizacja koncepcji uniwersalnego systemu hybrydowego (stykowo - optycznego) dla potrzeb systemu zapewnienia jakości, dającego możliwość powiązania z wzorcem jednostki miary oraz wyznaczenie niepewności takiego urządzenia.**

Praca powstała w ramach projektu badawczego nr 3 T10C 010 29 kierowanego przez dr inż Roberta Sitnika, a realizowanego przy współpracy zespołów z Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Politechniki Krakowskiej oraz Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej.

## **Układ Pracy**

Praca składa się z czternastu rozdziałów oraz pięciu załączników. W rozdziale pierwszym zawarte jest wprowadzenie do tematyki pracy i jej zakres. W rozdziale drugim opisano współrzędnościową technikę pomiarową. Rozdział trzeci poświęcono optycznym systemom pomiarowym oraz wzorcom stosowanym do kalibracji tych systemów. Następny rozdział nawiązuje do poprzednich i przedstawia główne różnice pomiędzy systemami stykowymi, a optycznymi. Przeprowadzona analiza tych systemów i przyjęte na tej podstawie założenia stały się podstawą opracowania koncepcji systemu hybrydowego i związanych z nią założeń opisanych w rozdziale siódmym. Piąty rozdział poświęcono teorii dokładności pomiarów. Omówiono tu metody stosowane do wyznaczenia niepewności pomiarów, których analiza posłużyła do stworzenia modelu niepewności systemu hybrydowego, przedstawionego w rozdziale jedenastym. W rozdziale szóstym zawarto uzasadnienie podjętej tematyki pracy oraz postawiono hipotezę i sformułowano cel pracy. Rozdział ósmy stanowi opis stanowiska badawczego czyli poszczególne składniki laboratoryjnego systemu hybrydowego. Rozdział dziewiąty skupia się na założeniach konstrukcyjnych oraz opisie budowy i kalibracji wzorca płytowego służącego w dalszej kolejności do kalibracji systemu optycznego. W rozdziale dziesiątym opisano sposób realizacji koncepcji hybrydowej obejmujący: integrację skanera z oprogramowaniem metrologicznym, kalibrację układu optycznego, korelację układów współrzędnych obu systemów oraz metodykę korekcji dokładnościowej. Rozdział dwunasty stanowi istotną część pracy gdyż dokumentuje realizowane badania nad oceną dokładności systemu hybrydowego. Rozdział trzynasty zawiera wnioski, jakie wysnuto w oparciu o przeprowadzone analizy i wykonane badania. Rozdział czternasty stanowi podsumowanie wyników oraz zaproponowane kierunki dalszych badań nad zagadnieniem oceny dokładności pomiarów systemem hybrydowym oraz usprawnieniem jego działania. Ważną część pracy stanowią też załączniki. Załączniki A, B, C, D dokumentują pozostałe badania nad systemem hybrydowym, natomiast załącznik E opisuje wytyczne odnośnie stosowania wzorca płytowego do zadań sprawdzania systemów optycznych.

## 2. Współrzędnościowa technika pomiarowa

Tradycyjne narzędzia pomiarowe opierały się na pomiarze bezpośrednim jednego wymiaru. Powodowało to trudności w pomiarach skomplikowanych zarysów o zmiennej krzywiznie, pomiarach bezpośrednich oraz rozbudowanych wymiarowo przedmiotów, uniemożliwiało automatyzację procesów kontroli jakości. Czas kontroli z zastosowaniem dużej liczby przyrządów pomiarowych okazywał się zbyt długi w porównaniu z czasem produkcji i powodował trudności w integracji przepływu materiału i informacji. To wszystko wpłynęło na rozwój nowej dziedziny – współrzędnościowej techniki pomiarowej (WTP) [59].

### 2.1. Istota współrzędnościowej techniki pomiarowej

Współrzędnościowa technika pomiarowa charakteryzuje się procedurami pomiarowymi opartymi na wartościach współrzędnych punktów pomiarowych, które są podstawą wyznaczenia wszystkich elementów geometrycznych, z których składa się mierzona część.

Podstawą tej techniki pomiarowej jest Współrzędnościowa Maszyna Pomiarowa (WMP) (zgodnie z definicją podaną przez normę ISO 10360-1 [N1]) jest ona urządzeniem, którego zespoły realizujące pomiar przemieszczają się w określonych współrzędnych, z tym że co najmniej jeden z nich realizuje przesuw. 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 i elektronicznych zespołów sterujących. Pomiar realizowany jest przez punktowy styk końcówki głowicy pomiarowej (najczęściej kulistej) z powierzchnią mierzoną. Geometria końcówki oraz jej charakterystyka określana jest w procesie kalibracji, polegającym na pomiarze elementu wzorcowego (najczęściej kuli) przed rozpoczęciem właściwego pomiaru [49,59].

Współrzędnościowa technika pomiarowa wykorzystuje fakt, że znaczną część wytwarzanych przedmiotów można opisać poprzez typowe elementy geometryczne. Należą do nich: punkt, prosta, okrąg, kula, walec, stożek, a także elipsa i torus. Na podstawie uzyskanych danych w postaci punktów pomiarowych oprogramowanie maszyny pomiarowej wyznacza zastępcze elementy geometryczne, powstające przez tworzenie z określonej liczby punktów zarysu o charakterze regresyjnym liczoną najczęściej metodą najmniejszych kwadratów wg Gaussa. Elementy zastępcze mają co prawda kształt nominalny, lecz ich wymiar i położenie zależą wprost od współrzędnych punktów pomiarowych. Wektor wodzący przedstawia położenie punktów pomiarowych, zaś wektor kierunkowy określa położenie



kątowe w przestrzeni obiektów (płaszczyzn, prostych itp.), utworzonych z tych punktów. Cechy wymiarowe tj. promień okręgu, walca, odległość, kąt stożka, reprezentuje wielkość skalarna. Oparte na tak opracowanej informacji obliczenia, umożliwiają stwierdzenie zgodności wymiarowej mierzonego przedmiotu z wymaganiami konstrukcyjnymi zawartymi w dokumentacji [49,59].

## 2.2. Budowa lokalnego układu współrzędnych

Dużą zaletą pomiarów współrzędnościowych jest dowolność ustawienia przedmiotu w przestrzeni pomiarowej WMP. Jest to możliwe, gdyż dopasowanie obiektu do układu odbywa się rachunkowo. Pomimo tego, że maszyna dysponuje własnym tzw. globalnym układem, to można przez ustalenie położenia obiektu w przestrzeni zdefiniować dla niego nowy, lokalny układ na podstawie zmierzonych lub obliczonych typowych elementów geometrycznych.

Do zdefiniowania kierunku (osi) głównego układu współrzędnych należy zmierzyć element przestrzenny tj. płaszczyznę, walec, stożek. Do zdefiniowania drugiego kierunku wystarczy prosta na płaszczyźnie. Do zdefiniowania położenia punktów zerowych układu można zastosować dowolny element.

Położenie przedmiotu w nowym układzie można zapisać równaniem:

$$\vec{W}_p = R \cdot \vec{W}_m + \vec{T} \quad (2.1)$$

gdzie:

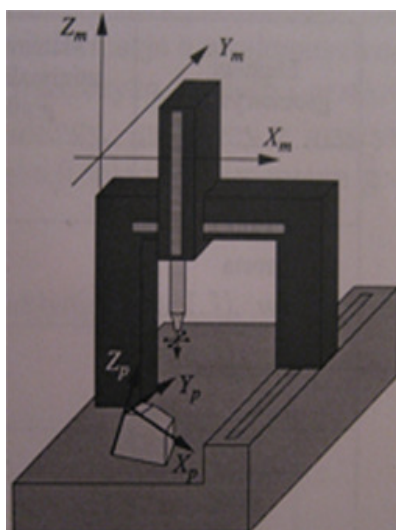
$\vec{W}_p$  - współrzędne punktu w układzie przedmiotu,

$R$  - macierz rotacji,

$\vec{W}_m$  - współrzędne punktu w układzie globalnym maszyny,

$\vec{T}$  - wektor translacji.

Macierz rotacji określa obrót wokół osi współrzędnych, a wektor translacji równoległe przesunięcie do tych osi. Za pomocą tej zależności można jednoznacznie matematycznie określić w przestrzeni wszystkie sześć stopni swobody. Określa się również wzajemne relacje pomiędzy współrzędnymi punktów w obu układach umożliwiające transformacje między tymi układami. W ten sposób można zdefiniować dowolny układ współrzędnych ustawiony pod dowolnym kątem w przestrzeni roboczej WMP [34,49].



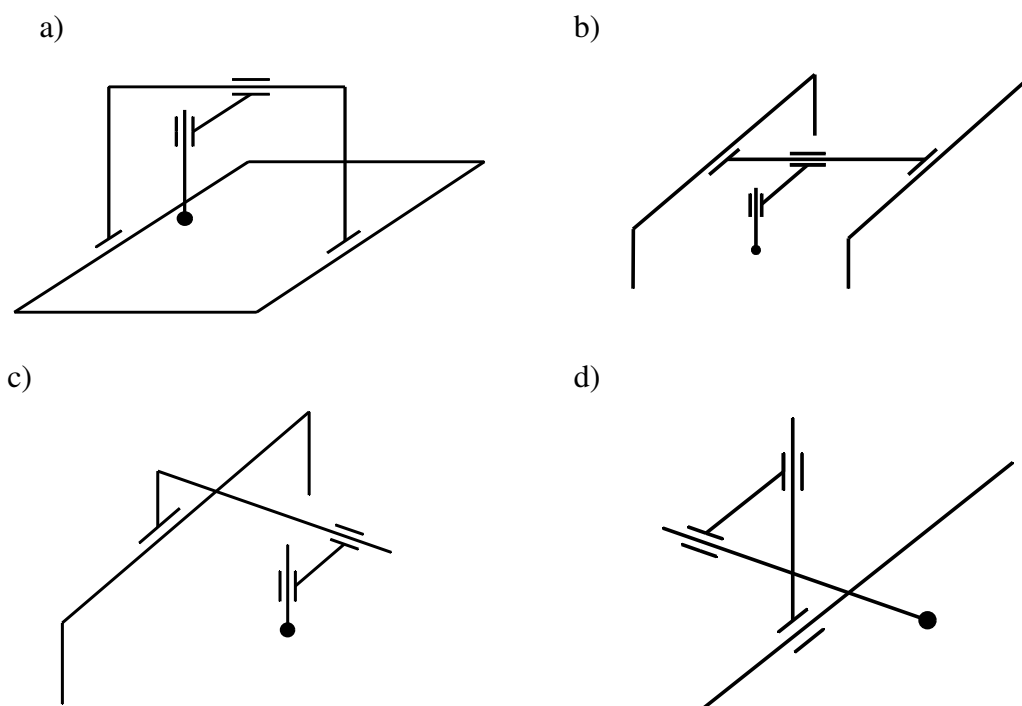
Rys. 2.1. WMP i przedmiot mierzony z zaznaczonymi układami współrzędnych maszyny ( $X_m$ ,  $Y_m$ ,  $Z_m$ ) i przedmiotu ( $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$ ) [49]

### 12.3. Podstawowe zespoły i konstrukcje WMP

Każda typowa WMP składa się z: zespołu głowicy pomiarowej (sondy), zespołu pomiarowego wraz z układem wskazującym oraz zespołu nośnego (mechanicznego). Zespołami uzupełniającymi są: układ przetwarzania danych pomiarowych oraz układ odpowiedzialny za napęd i sterowanie przestrzeniami zespołów ruchomych. W zależności od konstrukcji maszyny elementami ruchomymi są stół lub portal [ 34,49].

Obecnie wytwarzanych jest kilka rodzajów współrzędnościowych maszyn pomiarowych. Różnią się one zakresem pomiarowym, dokładnością i obszarem zastosowania. Głównym kryterium podziału jest jednak rozwiązanie konstrukcji nośnej maszyny. Wyróżnia się cztery podstawowe rodzaje konstrukcji WMP (patrz rys.2.2):

- ✓ portalowa (ang. bridge),
- ✓ mostowa (ang. gantry),
- ✓ wysięgnikowa (ang. horizontal arm),
- ✓ kolumnowa (ang. cantilever).



Rys.2.2. Schematy kinematyczne WMP: a) portalowa, b) mostowa, c) wysięgnikowa, d) kolumnowa [49]

## 2.4. Zastosowanie

Współrzędnościowa technika pomiarowa umożliwiła zautomatyzowanie kontroli jakości w przemyśle samochodowym, lotniczym, stoczniowym, elektro-mechanicznym, znalazła zastosowanie w laboratoriach badawczych, izbach pomiarowych.

Do pomiaru karoserii samochodowej najczęściej stosowane są maszyny o konstrukcji wysięgnikowej, które mogą pracować w parach, dzięki czemu możliwy jest jednoczesny pomiar obu stron samochodu, co znacznie przyspiesza pomiar. Otwarta konstrukcja tych maszyn w połączeniu z dużymi gabarytami powoduje, że maszyny te zaklasyfikowane są do WMP o najmniejszej dokładności.

Na rysunku został przedstawiony produkt firmy DEA, Bravo HA o zakresie w osi X do 7000 [mm], w osi Y do 1500 [mm], w osi Z do 2400 [mm]. Maksymalna prędkość wynosi 52 [m/min], przyspieszenie 2.9 [m/s<sup>2</sup>]. Niepewności pomiaru oszacowana według ISO10360/2 [N2] wynosi  $E = 29 + 13 \cdot L / 1000$  [μm]<sup>1</sup>. Specyfikacja ta jest podana dla jednego ramienia pomiarowego.

<sup>1</sup> Gdzie L jest podawane w [mm]



*Rys. 2.3. Maszyna wysięgnikowa firm DEA [79]*

Pomimo ciągłego doskonalenia, metoda stykowa pomiaru karoserii nie pozwala na kontrolę wymiarową w czasie zapewniającym możliwość 100 % kontroli.

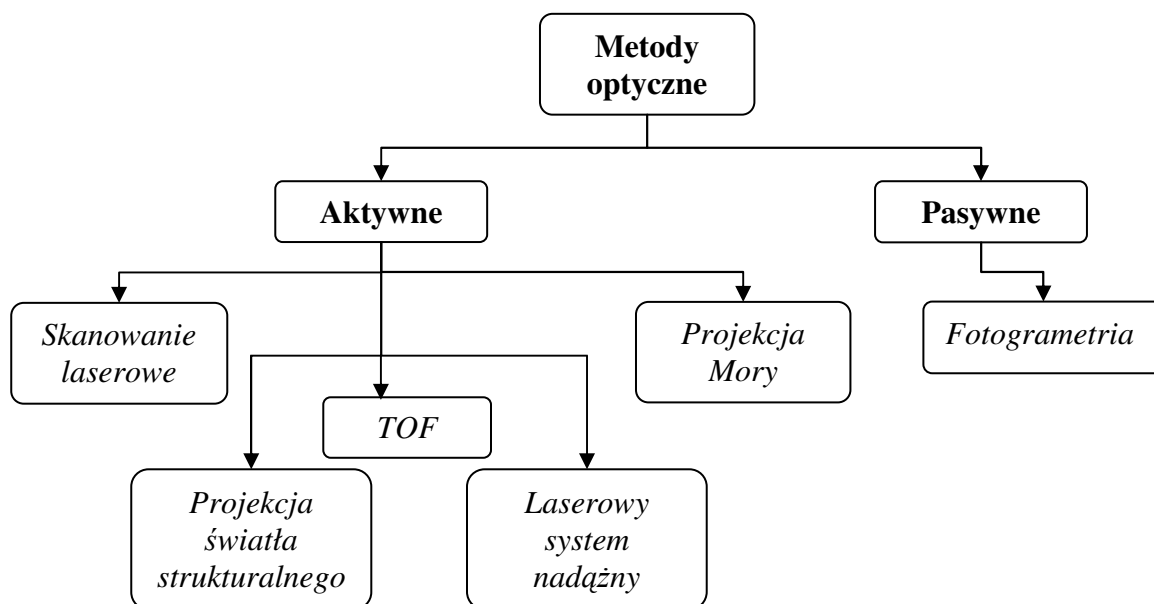
### 3. Optyczne metody pomiarowe

Na przestrzeni ostatnich 20 lat miał miejsce wielki postęp w rozwoju bezstykowych metod pomiarów obiektów trójwymiarowych. Wiodącą rolę odgrywają wśród nich techniki wykorzystujące światło jako nośnik informacji o mierzonych wielkościach. Jest to możliwe dzięki szybkiemu rozwojowi elektroniki a zwłaszcza jej działowi związanemu z optyką – optoelektroniki oraz postępowi w technice mikroprocesorowej, widocznemu zwłaszcza we wzroście mocy obliczeniowych komputerów.

Optyczne systemy bezstykowe bazują na pomiarze odbicia lub rozpraszania światła od powierzchni badanego obiektu. Istnieje szereg metod optycznych służących do mierzenia współrzędnych obiektów 3D i wiele sposobów ich kwalifikacji. Generalnie dzielą się one na *aktywne* i *pasywne*. Podział ten wynika z faktu, że pasywne techniki pomiarowe nie wymagają dodatkowych sztucznych źródeł światła, pracują w warunkach naturalnego, niekontrolowanego światła, podczas gdy metody aktywne angażują 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 [9,43,50,55,58]. Dodatkowe źródła światła są czasami stosowane w pomiarach pasywnych, do naświetlania punktów charakterystycznych, w celu przyspieszenia proces pomiarowego, jednak pełnią one tutaj odmienną rolę niż w technikach aktywnych.

#### 3.1. Klasyfikacja metod optycznych

W literaturze [6,9,16,30,35,43,45,55,58] można znaleźć wiele sposobów podziałów optycznych metod pomiaru kształtu. W pracy dokonano własnej klasyfikacji (patrz rys.3.1.), biorąc pod uwagę głównie te metody, które są wykorzystywane lub dają możliwość zastosowania w przemyśle w zakresie aktualnie eksploatowanym przez współrzędnościową technikę pomiarową.



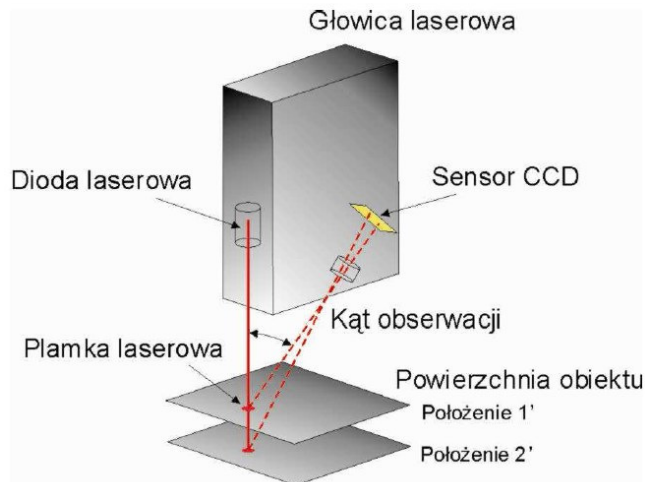
Rys.3.1. Klasyfikacja metod optycznych [opracowanie własne]

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę wymienionych metod.

### 3.1.1. Metoda skanowania laserowego (triangulacji laserowej)

Metoda ta jest jedną z najbardziej powszechnych technik 3D akwizycji danych. Matematyczny opis tej techniki został opracowany w 1615 przez W. Snella van Royena (Snelliusa) lecz dopiero zastosowanie laserów i kamer CCD pozwoliło na rozpowszechnienie i automatyzację pomiaru tą metodą.

Światło emitowane przez laser przechodzi przez układ optyczny i dalej biegnie w kierunku mierzonego przedmiotu. Na jego powierzchni tworzy się obraz wiązki świetlnej (punkt, linia, zestaw linii) rejestrowany przez kamerę CCD umieszczonej w znanej odległości od lasera. Kąt, pod którym obserwowana jest plamka, zmienia się w zależności od odległości danego punktu powierzchni obiektu od emitera promieniowania laserowego. Znana orientacja wewnętrzna (np. długość ogniskowej, położenie punktu głównego, dystorsje obiektywów) i zewnętrzna (kąt projekcji, kąt widzenia kamery, odległość bazowa) układu kamera - laser pozwala na użycie metody triangulacji do określenia współrzędnych punktu [6,9,16,29,30,55]. Kompletny kształt obiektu jest uzyskany poprzez obrót obiektu lub przez skanowanie promienia wzdłuż obiektu.



Rys.3.2. Zasada działania triangulacji laserowej [23]

Triangulacja jest jedną z najbardziej precyzyjnych metod optycznych. Największa dokładność można osiągnąć gdy wiązka laserowa projektowana jest wzdłuż normalnej powierzchni, w przeciwnym wypadku im większy kąt pomiędzy normalną, a promieniem tym większa odchyłka. Dlatego też dla skomplikowanej powierzchni wymagana jest ciągła zmiana orientacji sensora laserowego w stosunku do kształtu obiektu [35,78]. Typowy zasięg pomiarowy sensorów triangulacyjnych wynosi od 2 [mm] do 2 [km].

Niepewność standardową wyznaczenia odległości obiektu od systemu  $\delta_z$  opisuje wzór [4,5,9]:

$$\delta^2_z \approx \left( \frac{Z^2}{f \cdot D} \right)^2 \cdot \delta^2_p + \left( \frac{Z}{\cos^2(\alpha)} \right)^2 \cdot \delta^2_\alpha \quad (3.1)$$

gdzie:

$Z$  - odległość obiektu od systemu (zasięg),

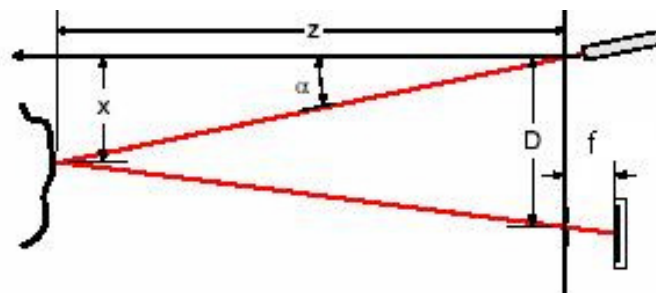
$f$  - ogniskowa,

$D$  - baza,

$\delta_p$  - niepewność pozycjonowania wiązki laserowej,

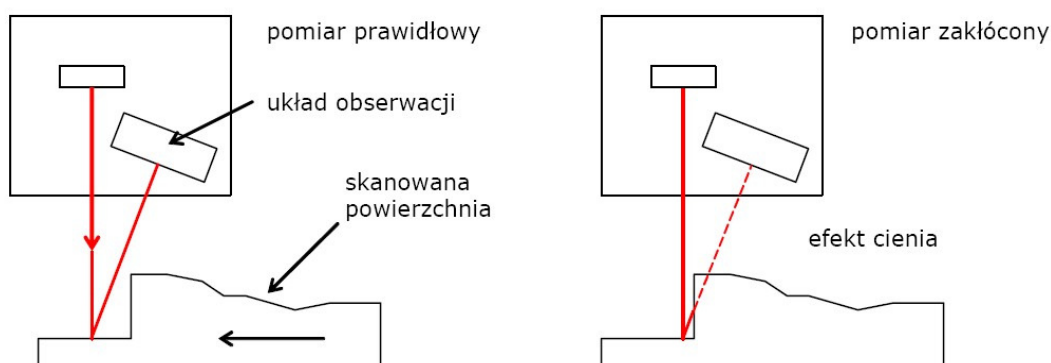
$\alpha$  - kąt padania wiązki laserowej w odniesieniu do osi  $Z$ ,

$\delta_\alpha$  - niepewność wyznaczenia kąta.



Rys 3.3. Schemat skanowania laserowego [5]

Dokładność pomiaru maleje wraz z ze zmniejszeniem odległości bazowej i wraz ze zwiększeniem odległości od obiektu. Odległość bazowa nie może być jednak zbyt duża, aby nie powodowało to niestabilności systemu i „efektu cienia”<sup>2</sup> [5,18,30,35,78, 83].

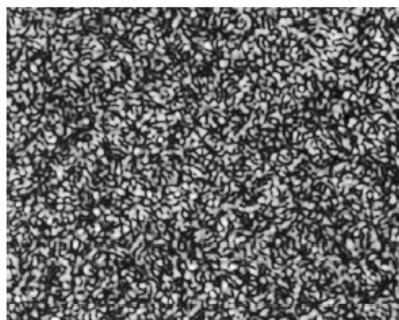


Rys. 3.4. Odczyt danych podczas pomiaru – „efekt cienia” [23]

Dokładność pomiaru zależy również od własności rozpraszających, barwy oraz chropowatości powierzchni mierzonego przedmiotu. Jest to spowodowane tym, że pomiar bazuje na znalezieniu środka plamki świetlnej. Jeżeli tylko połowa plamki znajduje się na powierzchni, która dobrze odbija światło np. jasnej powierzchni, to środek plamki będzie przesunięty w kierunku jaśniejszej powierzchni. Taki sam efekt jest widoczny kiedy plamka biegnie wzdłuż krawędzi przedmiotu [30,31]. Chropowatość powierzchni natomiast wprowadza przypadkowe zmiany w długości i kierunku ścieżki optycznej powodując powstanie interferencyjnych wzorów tzw. „speckle noise” widocznych jako ziarnista struktura na otrzymanym obrazie patrz rys 3.5. [13,18,83].

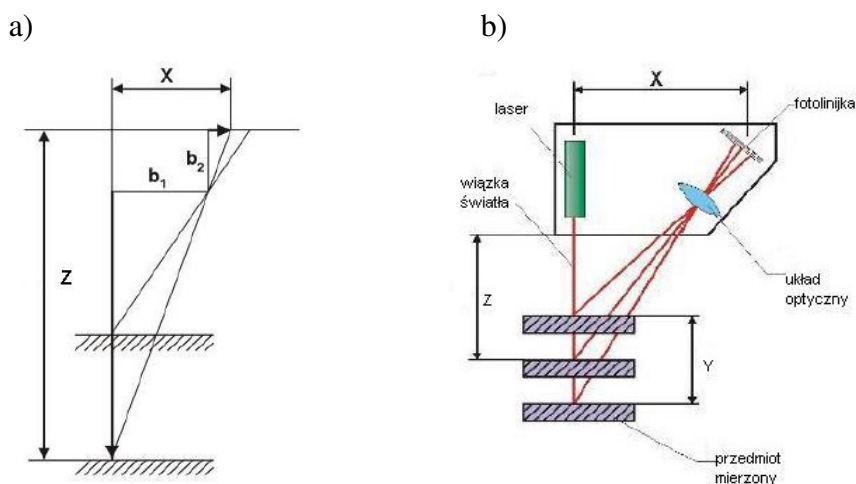
<sup>2</sup> Podstawowym ograniczeniem pomiarów korzystających z triangulacji laserowej jest tzw. „efekt cienia”. Niektóre obszary obiektu oświetlane przez laser nie są widoczne przez kamerę i na odwrót niektóre obszary widziane przez kamerę nie są oświetlone przez laser. Problem ten jest tym większy im większa jest odległość laser- kamera [5]





Rys.3.5. Efekt "speckle noise" na chropowatej powierzchni [74]

Metoda **punktowego skanowania laserowego** wykorzystywana jest m.in. w głowicach laserowych maszyn współrzędnościowych i robotów pomiarowych. Podstawą wyliczenia powierzchni pomiarowej jest tutaj układ dwóch trójkątów prostokątnych, przy czym jeden z nich ma stałą przyprostokątną  $b_1$ , natomiast drugi  $b_2$  (rys. 3.6 a).



Rys.3.6. Schemat i zasada działania laserowej głowicy triangulacyjnej [49]

Dioda laserowa emituje pomiarową wiązkę światła, która po przejściu przez układ optyczny pada na powierzchnię mierzonego przedmiotu tworząc plamkę o średnicy od kilkudziesięciu do kilkuset mikrometrów. Obraz tej plamki jest odtwarzany przez układ optyczny na fotolinijce. Wraz ze zmianą odległości  $Z$ , w zakresie pomiarowym  $Y$ , obraz plamki przesuwa się wzdłuż fotolinijki (spełniającej rolę wzorca długości), generując sygnał elektryczny. Znając położenie plamki na fotolinijce, odpowiadające odległości  $X$ , można wyliczyć aktualną odległości głowicy od powierzchni mierzonego przedmiotu  $Z$ , korzystając ze wzoru:

$$Z = \frac{Y}{2} = \frac{A\Delta X}{\Delta X \cos \alpha + B \sin \alpha} \quad (3.2)$$

gdzie:

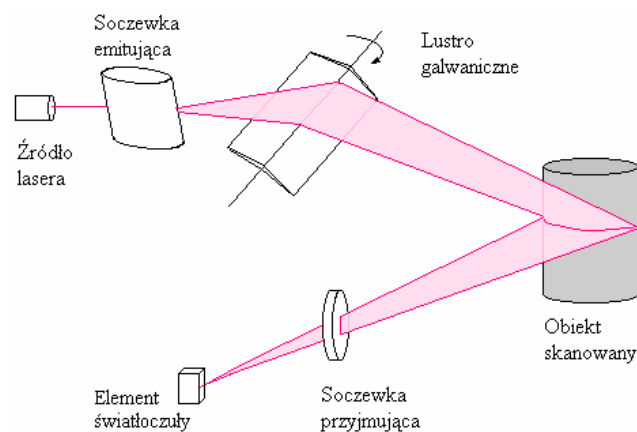
$\Delta X$  - przesunięcie plamki wzdłuż fotolinijki,

$A$  – odległość od płaszczyzny soczewki do płaszczyzny fotolinijki,

$B$  – odległość od płaszczyzny soczewki od mierzonego przedmiotu.

Głowicami laserowymi są mierzone takie elementy, które nie mogą być mierzone za pomocą głowic stykowych tj. przedmioty o powierzchni podatnej na naciski pomiarowe (profile cienkościenne, części z tworzyw sztucznych, inne materiały miękkie), otwory o małych średnicach, czy też zarysy o małych promieniach zaokrągleń [49]. Do niepewności pomiaru takimi systemami należy dołączyć niepewność zastosowanej maszyny współrzędnościowej lub robota.

W *technice skanowania liniowego* na obiekt rzutowana jest linia. W tym celu stosowany jest obrotowy pryzmat, który nadaje wiązce światła kształt linii i umożliwia jej przesuw po określonym obszarze co znacznie przyspiesza pomiar.



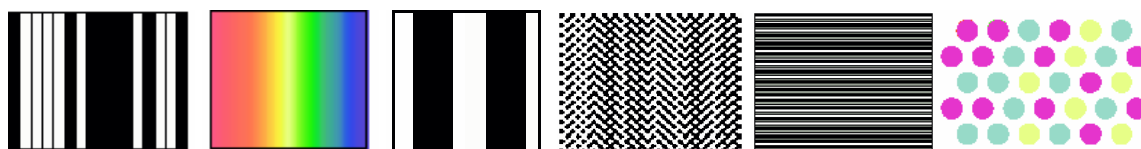
Rys.3.7. Zasada działania skanowania liniowego [84]

Technika ta znajduje zastosowanie nie tylko w inżynierii i projektowaniu, ale też animacji komputerowej, medycynie, archeologii i dokumentacji zabytków.

### 3.1.2. Metoda z oświetleniem strukturalnym (ang. structured light)

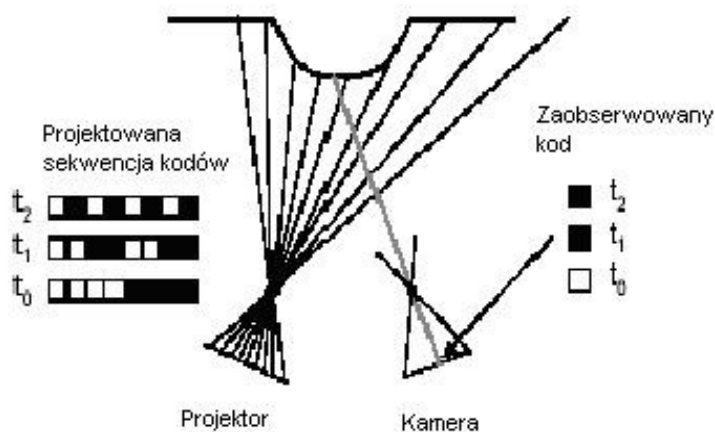
Polowe metody pomiarowe charakteryzują się jednoczesnym pomiarem w całym polu widzenia, należy do nich metoda z oświetleniem strukturalnym. W ostatnich latach trwały intensywne prace nad jej rozwojem [2,13,14,26,33,50,53,57,76].

Główną zaletą tej metody jest szybka akwizycja obrazu oraz proces przetwarzania. Istotą metody z oświetleniem strukturalnym jest projekcja obrazów rastrowych (patrz rys.3.8.) przez projektor lub laser z odpowiednim układem optycznym oraz obserwacja przez co najmniej jedną kamerę deformacji tych obrazów na powierzchni badanej. Zniekształcone wzory są następnie analizowane i poprzez zastosowanie różnych metod kalibracji takich systemów wyznaczana jest geometria powierzchni badanej [2,6,13,18,32,33,47,48,51,54,57,72,73,76].



Rys.3.8. Przykładowe wzory świetlne [51]

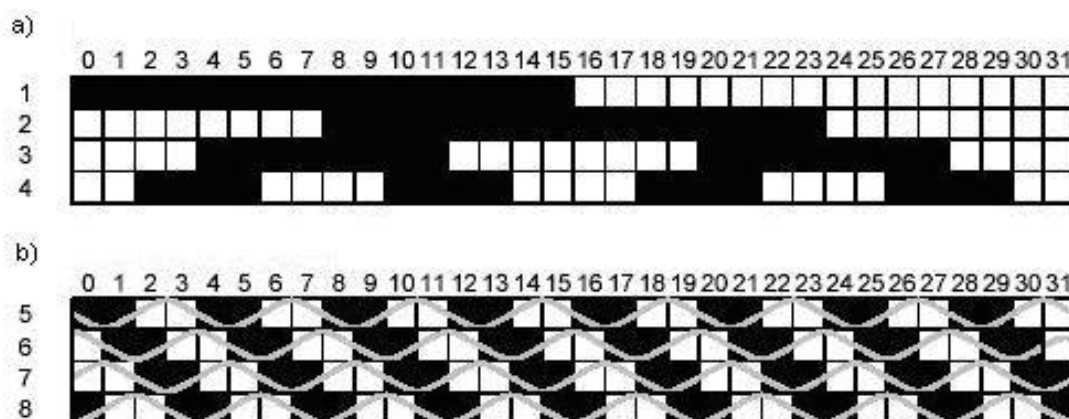
Dla tej metody opracowano wiele technik umożliwiających jednoznaczne określenie położenia lokalizowanych punktów w przestrzeni pomiarowej. Najczęściej spotykaną jest projekcja obrazów prążkowych, przesuniętych w fazie oraz kodów Gray'a.



Rys.3.9. Schemat pomiaru z wykorzystaniem światła strukturalnego [28]

W przypadku metody kodów Graya (GCM) wyświetlana jest sekwencja dobrze zdefiniowanych wzorów, w których jest zawarta zakodowana informacja czasowo - przestrzenna (w rzędach i kolumnach) dla każdego piksela kamery. Kod Gray'a charakteryzuje się tym, że dowolne dwie kolejne liczby różnią się stanem tylko jednego bitu. Tak więc maksymalny błąd dekodowania jest ograniczony do jednego bitu. Niestety

dyskretna natura takich wzorów ogranicza rozdzielczość do połowy najmniejszego wzoru [28,34,51,53].



Rys.3.10. Sekwencja a) kodów Graya, b) prążków sinusoidalnych dla  $n=32$  prążków [28]

W przypadku projekcji prążków sinusoidalnych stosowana jest tzw. *metoda przesunięcia fazy (PSM)*. Na obiekt rzutowany jest raster z intensywnościowo zakodowaną funkcją sinusoidalną, która w każdym kolejnym obrazie jest przesunięta w fazie o  $\pi/2$  dla minimalnie trzech sekwencji (im więcej sekwencji tym większą można uzyskać dokładność) [9,29,51]. Pomimo, że metoda przesunięcia fazy pozwala na uzyskanie wysokich dokładności, wadą jej jest okresowa natura wzorów co prowadzi do dwuznaczności w dekodowaniu.

Integracja metody kodów Gray'a z metodą przesunięcia fazy łączy w sobie zalety obu strategii tj. jednoznaczność w kodowaniu wzorów dla GCM i wysoką rozdzielczość PSM. Prowadzi to do dokładnej rekonstrukcji kształtu obiektu. Wadą tej metody jest stosunkowo duża liczba projektowanych wzorów.

Na podstawie wyników kalibracji przestrzeni pomiarowej możliwe jest przedstawienie informacji o kształcie obiektu w postaci współrzędnych punktów pomiarowych (x,y,z). Zostało to szerzej opisane w punkcie 8.1.2. Uzyskane dane pomiarowe są następnie przetwarzane przez odpowiednie oprogramowanie w celu uzyskania wirtualnej reprezentacji obiektu w postaci siatki trójkątów, bądź modelu powierzchniowego, na podstawie których wyznacza się wartości wielkości mierzonych. Należy jednak zwrócić uwagę, że pomimo tego, że kalibracja jest z pewnością kluczowym czynnikiem dla dokładnego pomiaru metodami optycznymi, szczególnie uważnie musi być przeprowadzona dla tej metody.

Systemy tego typu nie wymagają dodatkowych ruchomych mechanizmów do skanowania tj. lusterko obrotowe, ramię robota pomiarowego, co eliminuje błędy związane z przemieszczeniem.

Użycie światła niekoherentnego wyklucza efekt szumu plamkowego (ang. „speckle noise”) związany z systemami wykorzystującymi laser, jednakże głębia widzenia (DOF) oraz dokładność jest mniejsza w porównaniu do techniki skanowania laserowego i znajduje się w granicach od 0.01 do 0.1 [mm] w zależności od zakresu pomiarowego [9,28,30, 57].

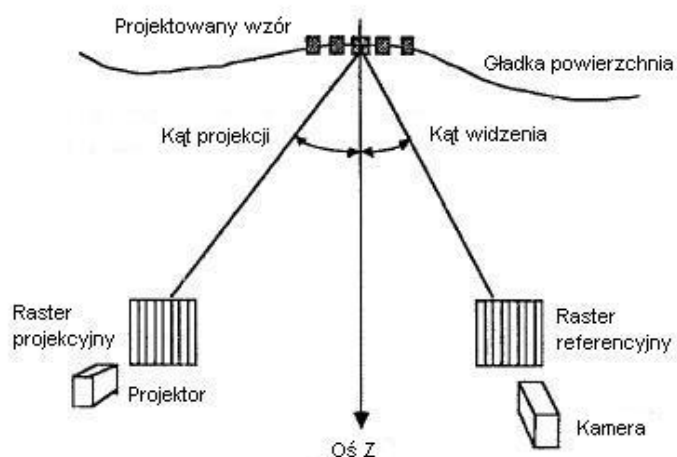
Podstawą poprawnego pomiaru jest wyraźny kontrastujący obraz rzutowanych prążków, z tego też powodu występują spore trudności w rejestracji obiektów refleksyjnych, nieciągłych oraz niejednorodnych pod względem tekstury (ostre przejścia kolorów art. z białego na czarny). Na błędy pomiarowe mają też wpływ takie czynniki jak: niedokładne określenie geometrycznych parametrów układu projektor – detektor, mechaniczna lub termalna niestabilność, oświetlenie, jakość zastosowanego sprzętu (rozdzielczość, kontrast). Na dokładność wpływa również wzajemna odległość projektora i detektora. Im ta odległość jest większa tym bardziej widoczne przez detektor są zdeformowane prążki sinusoidalne, w tym wypadku jednakże zmniejsza się część wspólna widziana przez oba urządzenia, co wymusza wykonanie większej ilości pomiarów a co za tym idzie wydłuża się czas badania [28,39,50,55].

Polowe metody znajdują zastosowanie przy pomiarach obiektów o wymiarach nie przekraczających 2 [m] (typowa objętość pomiarowa znajduje się w zakresie od 1 [cm] do 1 [m] ze względu na dotychczas niską wydajność energetyczną źródeł światła w projektorach). Z uwagi na nieosiągalną przez inne techniki szybkość pomiaru stosowane są w przemyśle samochodowym i maszynowym.

Dużą zaletą tej techniki jest też stosunkowo niski koszt komponentów systemu (brak konieczności użycia wyspecjalizowanych urządzeń). Najprostszy układ wykorzystujący tę metodę można zbudować z projektora multimedialnego i kamery cyfrowej.

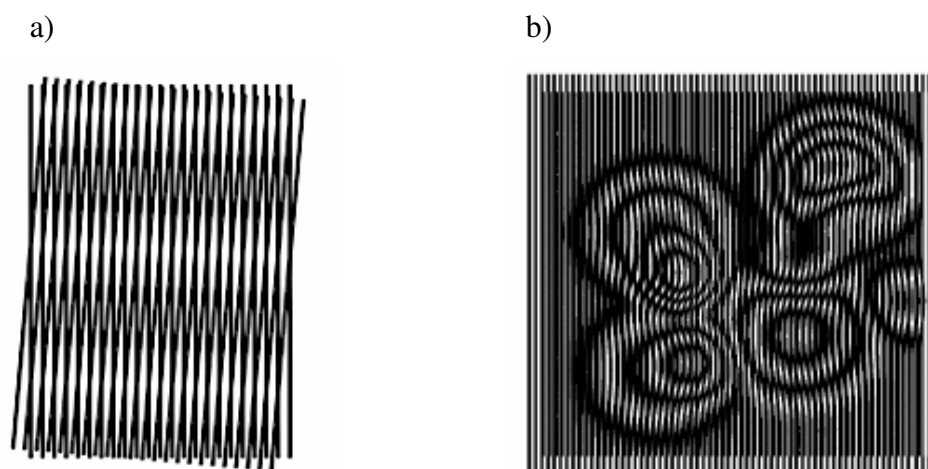
### **3.1.3. Metoda mory projekcyjnej**

Główną ideą tej metody jest użycie dwóch identycznych, precyzyjnie dopasowanych rastrów o strukturze liniowej. Obraz rastra projekcyjnego jest rzutowany przez obiektyw projektora na przedmiot mierzony, zdeformowany obraz poprzez obiektyw kamery jest odwzorowany na raster referencyjny (patrz rys 3.11). Powstanie w ten sposób obraz ciemnych i jasnych pasm mory (prążków interferencyjnych) zależy od wzajemnego położenia rastrów, od stosunku szerokości ciemnych i jasnych linii oraz od częstości przestrzennych struktur. Kontury prążków są następnie poddane analizie komputerowej w celu rekonstrukcji powierzchni [9,16,17,19,28,31,46,57,77].



Rys.3.11. Konfiguracja systemu mory projekcyjnej [6]

Na rysunku 3.12 a) przedstawione są prążki mory powstałe na skutek interferencji linii równoległych obróconych o kąt  $5^\circ$  względem siebie. Rysunek 3.12 b) ukazuje natomiast obraz prążków mory powstałych z nałożenia dwóch rastrów, z których jeden jest zdeformowany na powierzchni mierzonego obiektu.



Rys.3.12. Prążki mory

Rekonstrukcja obiektu wymaga dokładnej znajomości zależności geometrycznych pomiędzy rastrami, kamerą, projektorem oraz obiektem. Przesunięcie pomiędzy środkami prążków interferencyjnych  $\Delta z$  widziane przez kamerę jest określone przez wzór:

$$\Delta z = \frac{P_0}{\tan(\alpha) + \tan(\beta)} \quad [6] \quad (3.3)$$

gdzie :

$p_o$  – okres projektowanych prążków,

$\alpha$  – kat projekcji w odniesieniu do osi Z,

$\beta$  – kat widzenia w odniesieniu do osi Z.

System mory projekcyjnej daje właściwe efekty tylko w przypadku stosowania go do gładkiej powierzchni. Dodatkowym ograniczeniem jest mały zasięg pomiarowy od 1 [mm] do 50 [cm] oraz niska dokładność, która zależy w głównej mierze od okresu rastra, zakresu pomiarowego, oświetlenia, właściwości geometrycznych obiektu (przy powierzchniach nieciągłych występują błędy spowodowane zanikaniem prążków), rozdzielczości kamer [6,9,28,57]. Systemy te są głównie stosowane do badania mechanicznych właściwości materiałów [11], pokrycia samolotów, przemieszczeń i odkształceń powierzchni, w biostereometrii (w szczególności do badania wad postawy [68]). Metoda ta jest coraz rzadziej stosowana ze względu na jej wady w stosunku do metod z oświetleniem strukturalnym.

#### **Metoda oparta na czasie powrotu impulsu - TOF (time of flight)**

Ze względu na to, że światło podróżuje ze stałą prędkością, pomiar przesunięcia czasu pomiędzy emisją impulsu świetlnego, a jego powrotem oferuje bardzo wygodną metodę do pomiaru odległości punktu na powierzchni obiektu od źródła sygnału optycznego. Metoda oparta na czasie powrotu impulsu jest również znana jako LIDAR (light detection and ranging) lub LADAR (laser radar). Odległość Z jest wyliczana ze wzoru [6,9,16,28]:

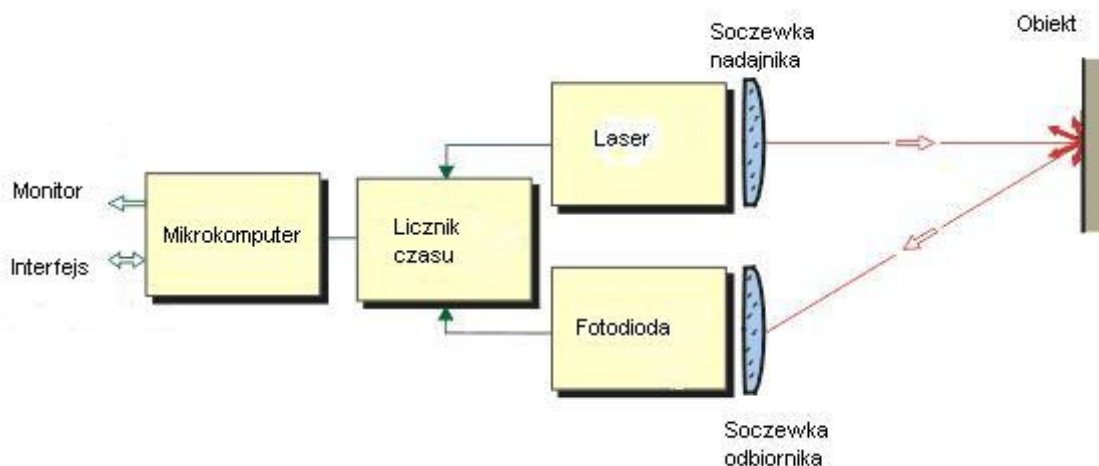
$$Z = \frac{c * \Delta t}{2} \quad (3.4)$$

gdzie:

c - prędkość światła w próżni wynosząca 299 792 458 m/s,

$\Delta t$  - czas powrotu impulsu.

Rysunek 3.13 obrazuje schemat działania dalmierza opierającego swe działanie na tej metodzie.



Rys.3.13. Schemat działania metody TOF [88]

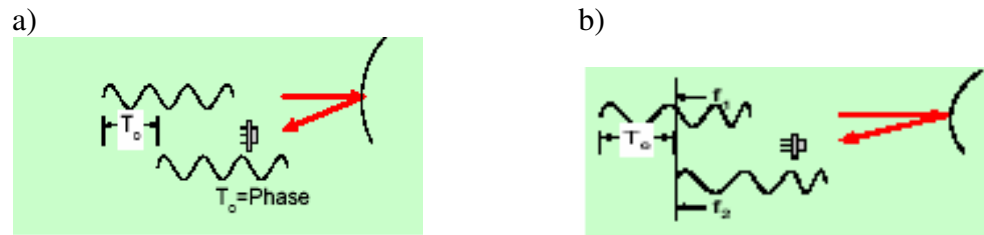
Generalnie skanery stosujące tą metodę używają wysokiej prędkości obrotowego lusterka, żeby skanować promień wzdłuż obiektu, dzięki czemu może być zmierzona seria punktów. Jednakże prędkość skanowania w porównaniu do innych systemów jest mała (kilka odczytów na sekundę).

Skanery te generują tylko geometrię obiektu bez tekstury. Mają zastosowanie w pomiarach dużych obiektów położonych w odległości od 1 [m] do 10 [km] (intensywność powracającego impulsu, a co za tym idzie maksymalny zasięg, jest zależny od refleksyjności powierzchni). W porównaniu do innych optycznych metod, metoda TOF jest bardzo kosztowna ze względu na zastosowany sprzęt optoelektroniczny, gdzie wymagana jest czuła elektronika z dużą przepustowością.

Dokładność pomiaru zależy od dokładności pomiaru czasu, detekcji początku impulsu, odległości od mierzonego obiektu, dryfowania i fluktuacji w elektronice oraz warunków atmosferycznych wpływających na widoczność. Większość komercyjnych systemów bazujących na tej metodzie dostarczają niepewność pomiaru w zakresie 5 [mm] do 100 [mm] relatywnie do odległości [1,4,88].

Wśród tych systemów można również wyróżnić systemy, których zasada wyznaczania odległości polega na obliczeniu różnicy faz impulsów (systemy AM) oraz częstotliwości (FM) [4,9,31].

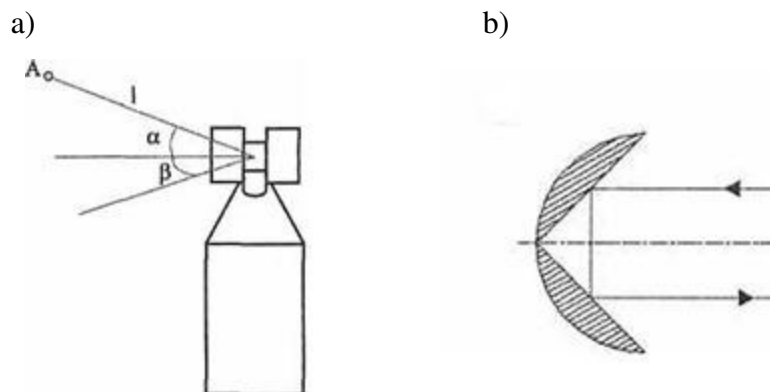




Rys.3.14. Działanie systemów a) AM , b) FM [5]

### 3.1.5. Laserowy system nadążny (ang. lasertracker)

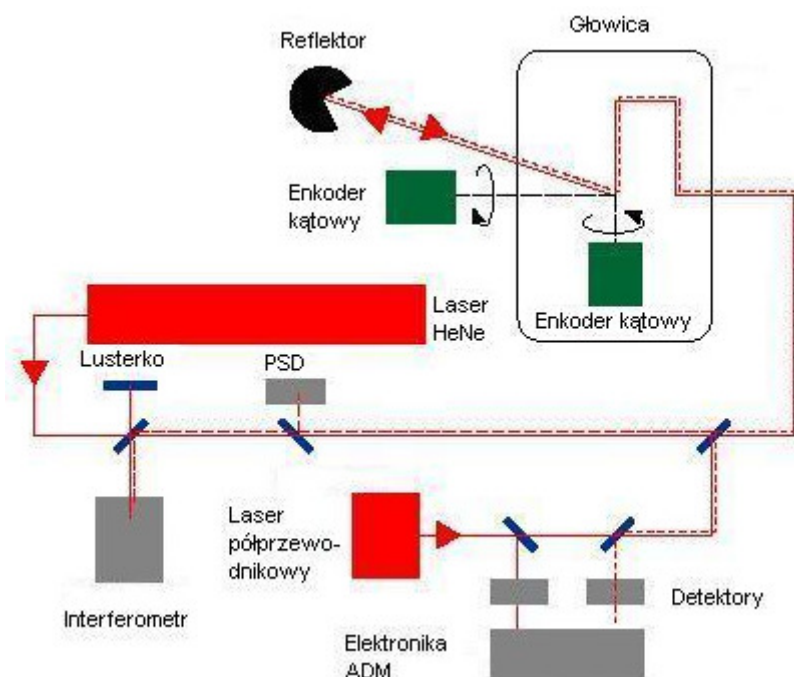
Laserowe systemy nadążne (LSN) to systemy pomiarowe, które stanowią połączenie techniki interferometru laserowego z pomiarami współrzędnościowymi. Wyznaczają współrzędne poprzez śledzenie reflektora (najczęściej w kształcie kuli), znajdującego się na obiekcie lub w miejscu końcówki pomiarowej maszyny współrzędnościowej. System składa się z interferometru i dwóch enkoderów kątowych. Pomiar następuje w sferycznym układzie współrzędnych (rys. 13.15 a). Dwa kąty mierzone są przez enkodery kątowe, natomiast odległość końcówki pomiarowej od głowicy przez system interferometryczny.



Rys.3.15. a) Sferyczny układ pomiarowy LSN, b) przykład budowy reflektora końcówki pomiarowej (wewnętrzny stożek) [61]

Odległość może być mierzona zarówno *inkrementalnie* jak i *absolutnie*. W pierwszym przypadku światło lasera jest rozdzielone na dwa promienie, z których jeden podąża bezpośrednio do interferometru, a drugi dopiero po odbiciu od reflektora. Następnie promienie nakładają się na siebie, a powstała różnica określa odległość pomiędzy reflektorem, a LSN. Przerwanie wiązki laserowej prowadzi do błędów, dlatego też końcówka pomiarowa nie może być przemieszczana z prędkością większą niż 0.5 [m/s]. Dokładność pomiaru jest oceniana na 0.05 [mm], natomiast maksymalna liczba możliwych do pozyskania punktów w czasie jednej sekundy wynosi ok. tysiąca.

Technika absolutnego mierzenia odległości (AMD) polega na wpleceniu w wiązkę lasera, światła z lasera półprzewodnikowego. Światło po powrocie zostaje z powrotem rozdzielone i trafia do czujników, skąd wyznaczony zostaje czas w jakim wiązka pokonała drogę. Tak więc dystans pomiędzy obiektem, a źródłem światła oblicza się na podstawie zmierzonego odstępu czasowego pomiędzy wysłaniem impulsu, a jego rejestracją przez fotodetektory. Dzięki zastosowaniu tej technologii możliwa jest kontynuacja pomiaru po przerwaniu wiązki pomiędzy LSN, a reflektorem, oraz pomiar automatyczny po rozstawieniu na przedmiocie odpowiednich lusterek. Niestety metoda ta jest dwukrotnie mniej dokładna niż inkrementalna. Rysunek 3.16 pokazuje drogę jaką przebywa wiązka świetlna.



Rys.3.16. Schemat działania Laserowego Systemu Nadążnego (technika ADM) [10]

Zaletą LSN jest duży zakres pomiarowy (system może mierzyć obiekty oddalone nawet o 35 [m]) uzyskiwany dzięki zastosowaniu w pomiarze interferometru laserowego. Ze względu na mobilność oraz przestrzeń pomiarową, LSN jest stosowane przy pomiarach obiektów wielkogabarytowych, których transport na WMP jest nieopłacalny lub niemożliwy, w przemyśle samochodowym, okrętowym i lotniczym. Wadą LSN jest niemożność zautomatyzowania systemu w takim samym stopniu, jak mamy do czynienia w maszynach współrzędnościowych, a co za tym idzie konieczność stałej obecności operatora [10,61].

### 3.1.6. Metoda fotogrametryczna

Naukowe początki fotogrametrii sięgają połowy XIX wieku. Nazwa pochodzi od trzech greckich słów: photos - światło, gramma - zapis, metreo - mierzę. Twórcą fotogrametrii jest Francuz Aimee Laussedat.

Prof. dr Karl Krauss w swojej książce „Fotogrametria” [36] podaje następującą definicję: „*Fotogrametria jest sztuką i nauką o lokalizowaniu pozycji i kształtu obiektów na podstawie zdjęć*”. Nieco szerzej pojęcie fotogrametrii podane zostało na XVI-ym Kongresie w Kioto w 1988 roku:

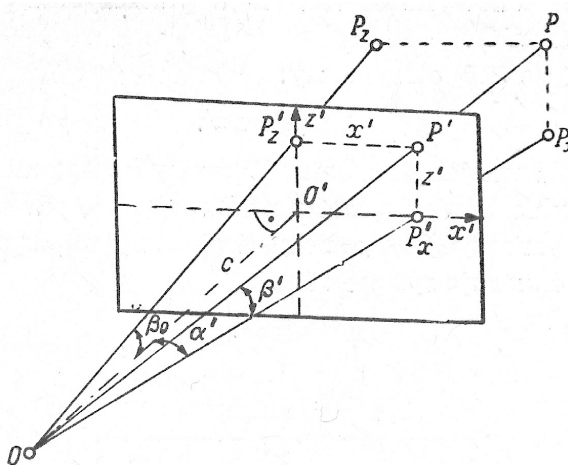
*„Jest to dziedzina nauk technicznych zajmująca się pozyskiwaniem wiarygodnych informacji o obiektach fizycznych i ich otoczeniu drogą rejestracji pomiaru lub interpretacji numerycznych otrzymany z sensorów nie będących w bezpośrednim kontakcie z tymi obiektami”.*

W zależności od sposobu wykorzystania zdjęć rozróżnia się:

- fotogrametrię płaską - (1-obrazową)
- fotogrametrię przestrzenną - (2-obrazową), zw. również stereofotogrametrią, w której uzyskuje się przestrzenny model sfotografowanego przedmiotu lub terenu na podstawie stereogramu, tj. pary zdjęć wykonanych z dwóch różnych punktów przestrzeni.

Pomiary fotogrametryczne działają na zasadzie ludzkiego oka. Wykorzystują zjawisko paralaksy i obserwacje obiektu z różnych perspektyw [15,31]. Opierają się na analizie zdjęć określonego obszaru bądź obiektu. Możliwość wykorzystania zdjęć w celach pomiarowych wynika z faktu, iż każde zdjęcie jest pewnego rodzaju odwzorowaniem danego obiektu na płaszczyźnie. Tym odwzorowaniem jest rzut perspektywiczny czyli środkowy przedmiotu pomiaru na płaszczyznę kliszy bądź też matrycy fotoelementów. Aby móc ustalać w stosunku do kamery położenie poszczególnych punktów fotografowanego przedmiotu lub obszaru przyjmuje się układ współrzędnych związany z aparatem. Układ ten tworzy trzy osie wzajemnie do siebie prostopadłe. Jedną z nich jest oś optyczna kamery OO', a dwie pozostałe znajdują się w płaszczyźnie kliszy (matrycy) i nazywane są osiami tłowymi. Oś optyczna kamery powinna być prostopadła do płaszczyzny kliszy. Aby na podstawie posiadanego obrazu (zdjęcia) można było odtworzyć wiązkę promieni rzutujących, które pozwolą na ustalenie kątów poziomych i pionowych poszczególnych punktów zdjęcia, należy znać położenie środka rzutów O względem płaszczyzny obrazu (kliszy). Położenie to określają dwa elementy tak zwanej orientacji wewnętrznej, są nimi: odległość obrazu od środka

rzutów C, równa ogniskowej obiektywu oraz położenie punktu głównego  $O'$ , czyli punktu przecięcia osi optycznej kamery z płaszczyzną obrazu.



Rys.3.17. Pomiarzy fotogrametryczne: płaszczyzna kliszy (matrycy) z zaznaczonymi współzrędnymi tłowymi punktu [56]

Na podstawie jednego zdjęcia fotograficznego otrzymuje się wiązkę promieni skierowanych ze stanowiska do zdejmowanych punktów obiektu co pozwala na określenie kątów poziomych i pionowych tych punktów, ale nie określa jednoznacznie ich położenia. Jeżeli zostanie wykonane drugie zdjęcie z innego kierunku (pomiar stereofotogrametryczny), w którym również zostaną wyznaczone kąty poziome i pionowe poszczególnych punktów względem drugiego aparatu, wówczas obydwa obrazy określą jednoznacznie położenie punktów zarówno co do kierunku jak i odległości. Wykonując zdjęcia z dwóch stanowisk trzeba dla każdego z nich wyznaczyć elementy orientacji zewnętrznej czyli: długość bazy jako odległość pomiędzy środkami obiektywów obu aparatów, ewentualne różnice w wysokości obu stanowisk, kąty poziome jakie tworzą osie kamer z kierunkiem bazy oraz wysokość środków obiektywów kamer nad ustalony poziom [41,56].

W metodzie fotogrametrii jedynymi punktami, dla których można uzyskać położenie są punkty które można jednoznacznie określić w płaszczyźnie obrazu (punkty te stanowią wybrane miejsca charakterystyczne obiektów), dlatego też wymagane jest odpowiednie przygotowanie elementów czy też obszarów do zdjęć fotogrametrycznych. Na obiekcie umieszcza się znaczniki, które mogą zostać namalowane, naklejone (materiał retrorefleksyjny) lub naświetlone przy użyciu diod LED. Wskazanie charakterystycznych (referencyjnych) punktów na fotografiach przy użyciu specjalistycznego oprogramowania prowadzi do stworzenia trójwymiarowego modelu.

Fotogrametria była niegdyś wykorzystywana wyłącznie w geodezji do wykonywania map topograficznych, obecnie dzięki prostocie konfiguracji systemu, szybkiej akwizycji obrazów, uniezależnienia od zakresu pomiarowego (ten sam aparat może być użyty do pomiarów małych i dużych obiektów), stosunkowo niskiego kosztu jest szeroko stosowana w badaniach odkształceń budowli, architekturze oraz przemyśle samochodowym, lotniczym, stoczniowym i górnictwem. Może być również stosowana do pomiarów obiektów w ruchu i szybkozmiennych deformacji oraz co jest jej niewątpliwą przewagą nad innymi systemami bezstykowymi, do pomiarów w bardzo ciężkich warunkach.

Podstawowymi wadami tej metody czyniącymi ją trudnymi w realizacji jest konieczna obecność charakterystycznych punktów na powierzchni, a przez to ograniczona liczba punktów które mogą być analizowane w przypadku w pełni zautomatyzowanej obróbki danych, długi i złożony proces przetwarzania danych oraz skomplikowana procedura kalibracyjna. Poza tym obiekty o regularnej konstrukcji mają tendencję do „ogłupiania” metody pomiarowej.

Dokładność metody zależy w głównej mierze od: rozdzielczości, stabilności i powtarzalności aparatów fotograficznych, liczby zdjęć i stopnia pokrycia zdjęć, rodzaju znaczników na powierzchni obiektu, procedury kalibracyjnej, zastosowanego oprogramowania.

Publikowana dokładność waha się w zakresie 1:30.000-1:100.000 dla danej przestrzeni pomiarowej przy wysokorozdzielczych aparatach cyfrowych, a 1:15.000 - 1:20.000 dla aparatów analogowych [5,7,21,22,30,31,42,83].

### **3.1.7. Podsumowanie**

Przegląd metod optycznych ukazał różnorodność dostępnych technik pomiaru geometrii obiektów. Każda z opisanych wyżej metod ma swoje zalety i wady, każda z nich musi być więc indywidualnie rozpatrzona pod kątem aplikacji. Poniższa tabela stanowiąca zestawienie metod pozwala wyłonić tą, która wydaje się spełniać wymogi współczesnego przemysłu na szybki, kompleksowy i dokładny pomiar.

Tabela 3.1. Ocena opisanych metod optycznych

		<i>Zakres</i>	<i>Dokładność</i>	<i>Rozdzielczość</i>	<i>Czas</i>	<i>Mobilność</i>	<i>Koszt</i>	<i>Textura</i>
<b>Skanowanie laserowe</b>	punktowe	+	++	+	-	-	-	+
	liniowe	+	+	+	+	+	-	+
<b><u>Projekcja światła strukturalnego</u></b>		+	+	+	+	+	+	+
<b>Projekcja mory</b>		-	-	-	+	+	+	+
<b>TOF</b>		+++	-	-	-	+	-	-
<b>Laserowy system nadążny</b>		+	+	-	-	+	-	-
<b>Fotogrametria</b>		++	-	-	-	+	+	+

Jest to metoda światła strukturalnego, charakteryzująca się prostotą implementacji, zapewniająca szybki i kompletny pomiar. W stosunku do innych metod nie jest kosztowna, cechuje się wysoką rozdzielczością, posiada wystarczający zakres pomiarowy, który można zwiększyć poprzez akwizycję z kilku kierunków.

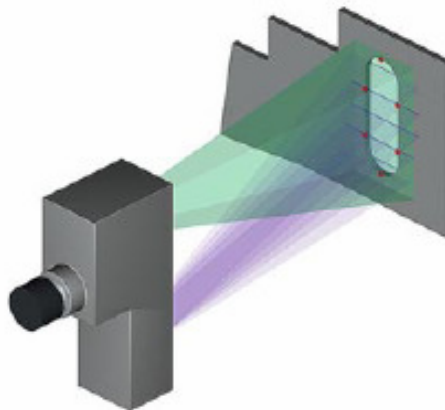
## 3.2. Przegląd aktualnie stosowanych w przemyśle systemów optycznych

### 3.2.1. Przykłady systemów optycznych stosowanych do pomiaru średnich i dużych obiektów

Kontrola wymiarowa karoserii samochodowej jest jedną z najbardziej wymagających operacji metrologicznych w procesie wytwarzania samochodu. Jak już wspomniano stosowanie Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych z głowicą stykową ze względu na długi czas pomiaru nie pozwala na 100 % kontrolę karoserii samochodów. Poszukując więc szybszego systemu do pomiaru karoserii samochodowej dokonano analizy wybranych, dostępnych komercyjnie systemów optycznych stosowanych do pomiaru średnich i dużych obiektów.

#### Sensory optyczne NC 100

Obecnie jednym z proponowanych rozwiązań jest zastosowanie głowic optycznych, a wśród nich sensorów optycznych NC100 firmy DEA.



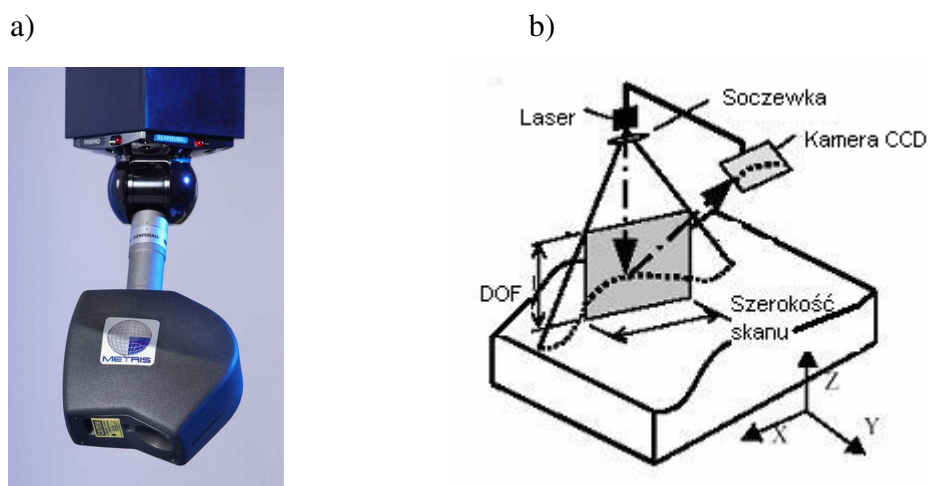
*Rys.3.18. Sensor optyczny NC 100 - widok ogólny [81]*

Sensory NC100 składają się z kamery CCD i źródła światła podczerwonego. Na obiekt projektowanych jest pięć równoległych prążków światła. Wbudowany wskaźnik lasera pozwala ustawić głowicę we właściwej odległości od mierzonego obiektu oraz wskazać środek pola widzenia. Kamera CCD dokonuje akwizycji obrazu. Zasada triangulacji pozwala na wyznaczenie setek współrzędnych punktów na powierzchni obiektu. W ten sposób w ciągu ok. 2 sekund może być zmierzona cecha geometryczna z dokładnością do 0.04 [mm]. Głowica optyczna może być stosowana zamiennie z głowicą stykową do pomiaru miejsc z zawężonymi granicami tolerancji [81].

Pewnym ograniczeniem dla tego typu głowic są problemy z pomiarem przy sztucznym oświetleniu (halogenowym lub tradycyjnym żarowym) oraz przy ostrym świetle słonecznym. Dużym ograniczeniem jest też mała odległość, która musi być zachowana od mierzonej cechy (130 [mm]), a co za tym idzie mały zakres pomiarowy 59 x 42 [mm] oraz dodatkowy czas potrzebny na przemieszczenie się głowicy. Efektywność pomiaru tą metodą jest lepsza od metod stykowych (oszczędność czasu pomiaru sięga ok. 20 %), jednakże wciąż zbyt niska, aby pozwoliła na 100 % kontrolę.

### Głowica LC50

System LC50 składający się z lasera i z kamery CCD opiera swe działanie na zasadzie triangulacji. Montuje się go na WMP z wykorzystaniem dwuosiowej automatycznej głowicy firmy Renischaw PH10M, tworząc w ten sposób pięcioosiową maszynę do digitalizacji.



Rys.3.19. a) Głowica LC50 w połączeniu z automatyczną głowicą PH10 M [87],  
b) zasada pomiaru [25]

Dzięki zastosowaniu głowicy PH10M podczas skanowania realizowane są trzy różne położenia sensora odpowiednio pod różnymi kątami (np.  $-15^\circ$ ,  $0$ ,  $15^\circ$ ). Umożliwia to skanowanie w trzech różnych kierunkach. Digitalizacja całego elementu przebiega w sposób ciągły co eliminuje błędy powstałe przy dopasowywaniu skanów z różnych kierunków. Prędkość skanowania liniowego wynosi ok. 20000 punktów na sekundę jednakże jedynie część linii usytuowana wewnątrz pola widzenia (zawierająca ok. 750 zdigitalizowanych punktów) jest efektywnie rejestrowana przez system. Pole widzenia głowicy (FOV) wynosi 50 x 60 [mm]. Zalecana odległość od obiektu wynosi 70 [mm].



Szacowana dokładność samej głowicy podawana przez producenta wynosi 0.05 [mm] przy  $3\sigma$ .

Po pomiarze całego obiektu następuje porównanie danych z modelem CAD wynikiem czego jest kolorowa mapa z wartościami odchyłek.

Systemu LC50 najczęściej używa się do inspekcji elementów wykonanych z blachy cienkościennej (np. elementów karoserii samochodowych), korpusów silników, turbin samolotowych. Jednakże wydłużony czas skanowania wynikający z konieczności mierzenia z co najmniej trzech kierunków oraz ograniczenia wynikające z zachowania odległości głowicy od przedmiotu oraz głębi ostrości wykonywanych pomiarów, uniemożliwiają niekiedy w pełni wydajny pomiar [87].

#### Głowica Cross scanner XC50

Urządzenie Cross Skaner XC50 wykorzystuje technologię skrzyżowanego skanowania (cross scanner). Dokonuje ono pomiaru za pomocą jednej głowicy będącej kombinacją trzech laserów pasmowych skanujących powierzchnię, obracając się o  $120^\circ$  z niewielkim pochyleniem oraz trzech kamer. Pozwala to uzyskać bardzo dużą sprawność skanowania elementów takich jak otwory, krzywizny, odsadzenia, które są najczęściej stosowane w samochodowych konstrukcjach. Każda kamera rejestruje pole po zeskanowaniu „własnym” laserem. Całkowita przepustowość oraz prędkość pojedynczego czujnika skanującego wynosi 4600 punktów na sekundę.

a)

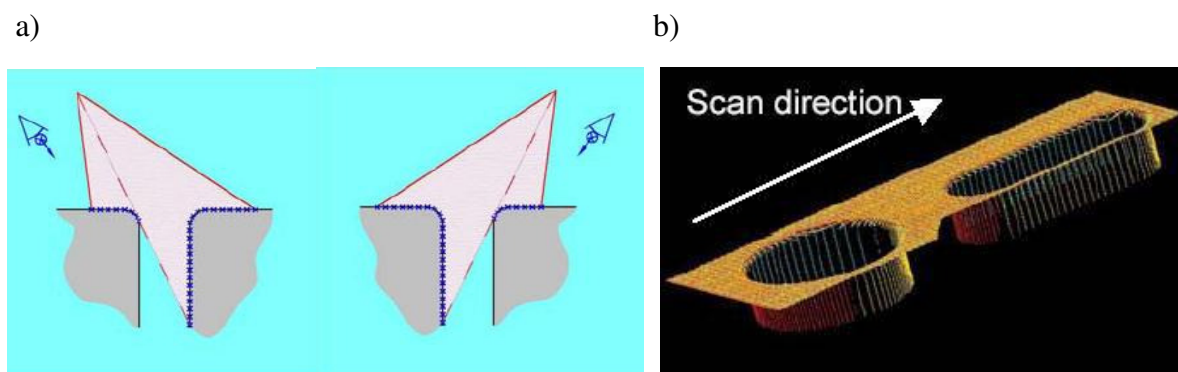


b)



Rys.3.20. Cross scanner XC50 a) widok ogólny, b) widok z 3 płaszczyznami skanowania [87]

Ze względu na to, że obiekt jest zdigitalizowany z optymalną częstotliwością (gęstością) we wszystkich kierunkach, XC skaner posiada dużą rozdzielczość. Prędkość skanowania wynosi 3 x 6400 punktów na sekundę. Ponadto urządzenie może skanować cechę do wewnątrz co widzimy na poniższym rysunku.



Rys. 3.21. a) skanowanie otworu podczas jednej ścieżki pomiarowej, b) rezultat pomiaru

W porównaniu do tradycyjnych głowic laserowych, głowica ta oferuje szybszy oraz bardziej elastyczny pomiar (eliminuje konieczność pomiaru w trzech kierunkach), pozwala również uniknąć zakupu kosztownej zmechanizowanej szóstej osi.

Głowicy tej można używać do inspekcji oraz digitalizacji powierzchni składających się z krzywizn, otworów oraz kieszeni blach cienkościennych. Dokładność głowicy szacowana przez producenta wynosi 0.015 [mm] przy  $1\sigma$  [87].

Ograniczeniem tego typu głowicy jest konieczność zachowania odległości od obiektu 70 [mm] oraz głębokość i szerokość skanu wynosząca 3 x 50 [mm].

### Konica Minolta VI-9i

Skaner VI-9i firmy Konica Minolta oparty jest o technikę skanowania liniowego, gdzie wiązka światła emitowana przez laser po przejściu przez układ optyczny jest odbijana od powierzchni sterowanego lusterka galwanicznego i w postaci poziomej linii biegnie w kierunku badanego obiektu. Skanowanie określonego obszaru linia po linii jest możliwe dzięki rotacji zwierciadła. Na powierzchni elementu, w zależności od jej kształtu wiązka skanująca przybiera postać krzywych, które są rejestrowane na matrycy CCD o rozdzielczości 640 x 480 pikseli, co pozwala na pozyskanie ponad 300 tys. punktów w jednym obrazie przestrzennym badanego obiektu w czasie 2.5 [sek.]. Odległość poszczególnych punktów należących do powierzchni skanowanego elementu od matrycy wyznaczana jest w oparciu o zasadę triangulacji służy do tworzenia danych 3D. Najbardziej precyzyjny model Konica

Minolta VI-9i skanuje z dokładnością 0.05 [mm] przy zachowaniu odległości od obiektu 60 [cm]. Duży wpływ na dokładność ma poprawne połączenie danych kierunkowych.

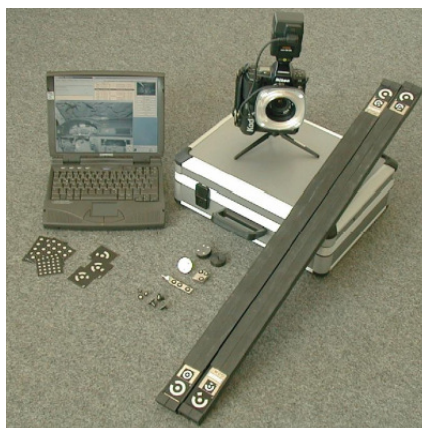


Rys.3.22. Widok ogólny VI-9i [84]

VI-9i ma nieduże rozmiary 221 x 412 x 282 [mm] i łatwo można go przenosić. Dane pomiarowe można zachować w pamięci flash urządzenia i wyświetlić na wbudowanym ekranie LCD, pomiar więc może odbywać się bez podłączenia do komputera. Odległość od obiektu mieści się standardowo w granicach 60 – 100 [cm], zakres pomiaru (x,y,z) wynosi 93 x 69 x 26 [mm] do 1495 x 1121 x 1750 [mm] [84].

### Sytem TRITOP

Producentem systemu jest firma GOM. System ten składa się z wysokiej klasy aparatu cyfrowego o rozdzielczości do 12 milionów pikseli i zestawu komputerowego. TRITOP wykorzystuje zjawisko fotogrametrii, a więc budowy rzeczywistego modelu 3D dzięki konwersji kilku zdjęć jednego elementu, powstałych pod różnymi kątami. Aby zrekonstruować rzeczywiste wymiary przedmiotu potrzeba co najmniej dwóch różnych fotografii. Przed wykonaniem zdjęć należy nanieść markery na obiekt, które umożliwiają składanie kilku zdjęć w jedną całość. Rysunek 3.23 przedstawia kamerę TRITOP wraz z niezbędnym oprzyrządowaniem (markery, wzorce skal bary i adaptery).



Rys.3.23. Kompletny fotogrametryczny system pomiarowy [82]

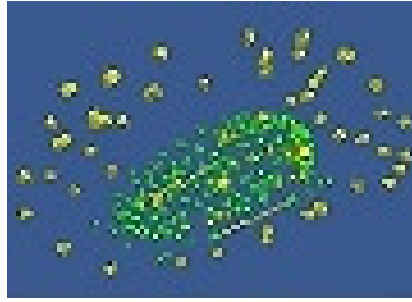
Obiekt fotografujemy ręcznie z różnych pozycji. Zdjęcia automatycznie są przesyłane do komputera. Dużą zaletą TRITOPA jest bezprzewodowa komunikacja pomiędzy aparatem, a zestawem komputerowym.



Rys.3.24. Pomiary przy zastosowaniu systemu TRITOP [82]

Po otrzymaniu zdjęć oprogramowanie automatycznie składa zdjęcia oraz wykonuje obliczenia na współrzędnych punktów określonych względem pozycji aparatu.

Komputer posiada bardzo dużą moc obliczeniową. Składa się on z dwóch procesorów o prędkości 2.4 GHz, i pamięci RAM 16 GB, co pozwala w kilka sekund przetworzyć dane z aparatu i wyświetlić wyniki pomiaru sfotografowanego obiektu.



Rys.3.25. Proces identyfikacji punktów pomiarowych [82]

Wyniki pomiarów mogą być przedstawione graficznie i porównane do nominalnego modelu CAD. Mobilność systemu umożliwia zmierzenie bardzo dużych obiektów. Przestrzeń pomiarowa zawiera się w granicach od 10 [cm] do 10 [m]. Według danych producenta system osiąga dokładność rzędu 0.01 [mm] na 1 [m] mierzonego obiektu [82].

Należy zauważyć, że pomimo szybkiego procesu przetwarzania danych czas niezbędny na przygotowanie obiektu znacznie wydłuża proces pomiarowy.

### System ATOS III

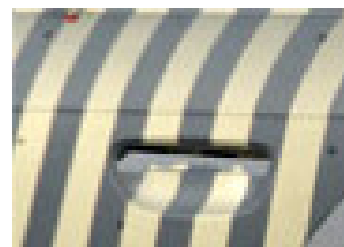
Wysoko zaawansowanym optycznym systemem pomiarowym, bazującym na metodzie projekcji strukturalnego światła białego (DLP – Digital Light Projection) jest ATOS III firmy GOM. System ten składa się z projektora oraz dwóch kamer cyfrowych GOM, mogących dostarczać 4 miliony punktów pomiarowych w ciągu 2 sekund. Zakres pomiarowy wynosi od 150 x 150 - 2000 x 2000 [mm]. Specjalny typ zastosowanych soczewek oraz wysokiej jakości system projekcji zapewnia bardzo dużą rozdzielczość budowanej chmury punktów przy minimalnym udziale szumu podczas badania obiektów o znacznych gabarytach (do 2 [m]).

Pomiar polega na projekcji prążków światłem białym i rejestrowaniu ich przez kamery CCD. System automatycznie określa aktualną pozycję sensora po czym rejestruje wartości współrzędnych punktów pomiarowych w układzie współrzędnych przedmiotu.

a)

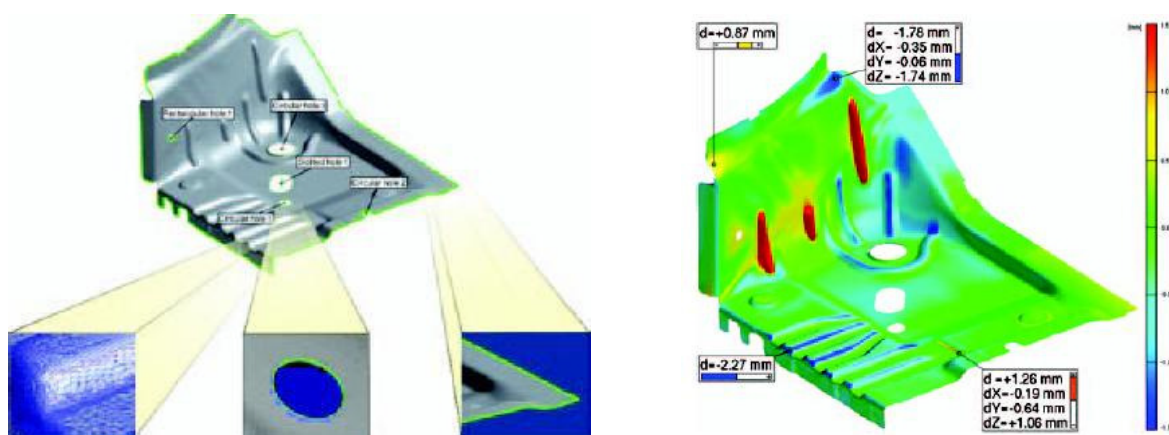


b)



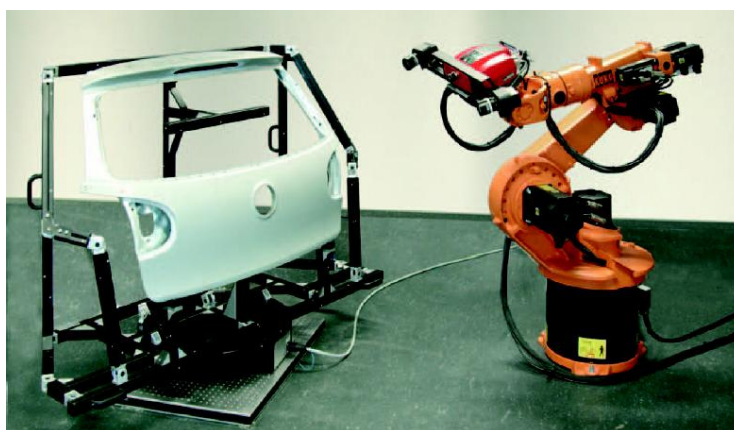
Rys.3.26. System ATOS III: a) widok ogólny, b) projekcja powierzchni światłem białym [82]

Rezultatem pomiarów jest przestrzenna reprezentacja powierzchni w postaci połączonej chmury punktów mającej wspólny układ współrzędnych. W wyniku automatycznych obliczeń wykonywanych przez system, szczególne cechy geometryczne skanowanego elementu czyli otwory, ostre krawędzie zostają obrysowane liniami, które są wykorzystywane przy budowie modelu powierzchniowego (patrz 3.27). Weryfikacja wyników odbywa się w sposób automatyczny. System porównuje dane zebrane z obiektu skanowanego z modelem CAD. Wyniki są przedstawiane w postaci tablic oraz kolorowych map z odchyłkami w stosunku do wymiaru nominalnego (wymiaru z modelu CAD).



Rys.3.27. Rezultaty pomiaru systeme ATOS III [82]

Niewątpliwą zaletą systemu jest to, że może mierzyć w świetle widzialnym, a co się z tym wiąże bezpośrednio na hali produkcyjnej. W tym celu istnieje możliwość montażu systemu na robocie [82]. Niestety producent nie podaje na oficjalnych stronach z jaką dokładnością mierzy system.



Rys.3.28. System ATOS zamontowany na robocie pomiarowym [82]

### Systemy ATOS i TRITOP

Przykładem hybrydowego podejścia do pomiarów dużych i skomplikowanych obiektów typu karoseria samochodu jest zastosowanie dwóch systemów ATOS i TRITOP firmy GOM.

Proces pomiarowy odbywa się w dwóch krokach. Najpierw fotogrametryczny system TRITOP wykonując szereg zdjęć z różnych kierunków określając współrzędne referencyjnych punktów umieszczonych na tym obiekcie, co pozwala w dalszej kolejności zbudować precyzyjny układ współrzędnych na mierzonej części. Dalszym etapem jest skanowanie obiektu systemem ATOS. Co najmniej trzy punkty referencyjne muszą być widziane przez obie kamery w trakcie pojedynczego pomiaru. Dzięki informacjom zdobytym podczas procesu fotogrametrycznego (zdefiniowane punkty odniesienia) dane kierunkowe mogą być połączone w globalnym fotogrametrycznym układzie współrzędnym.

Dokładność pomiaru szacowana dla objętości pomiarowej 1200 x 960 x 960 [mm] wynosi około 0.02 [mm]. Ze względu na dwuetapowość pomiaru proces przetwarzania danych jest wydłużony i dochodzi nawet do sześciu godzin dla pomiaru kompletnej karoserii samochodowej [82].

### Systemy ScanBright

Jedynym polskim produktem na rynku wśród tej klasy urządzeń jest ScanBright firmy Smarttech patrz rys. 3.29. ScanBright jest mobilnym systemem do pomiaru obiektów trójwymiarowych składającym się z projektora i kamery CCD i wykorzystującym metodę oświetlenia strukturalnego. Urządzenie to nie tylko realizuje pomiar, ale również pozwala na zaawansowaną edycję danych pomiarowych bez konieczności dodatkowych inwestycji w wyspecjalizowane oprogramowanie czy sprzęt komputerowy.



Rys.3.29. System ScanBright – widok ogólny [89]

ScanBright umożliwia sprawne przejście całej ścieżki od rzeczywistego obiektu do jego cyfrowej reprezentacji na dowolnej platformie CAD/CAM lub w programie grafiki komputerowej. Urządzenie składa się z trzech modułów:

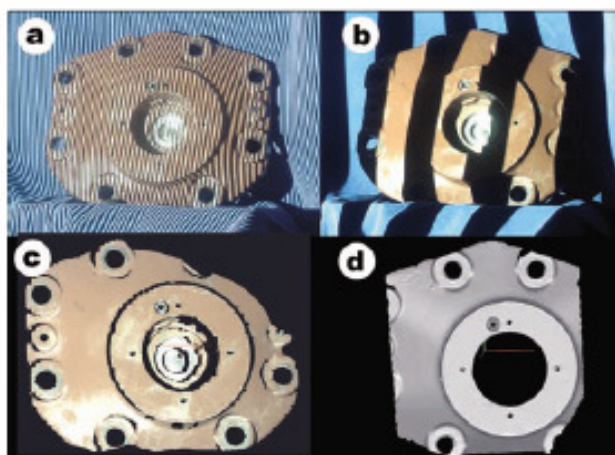
*Skaner3D* - służy do bezkontaktowego pomiaru bezwzględnych współrzędnych obiektów trójwymiarowych (x,y,z) oraz pozyskania informacji o teksturze obiektu (R,G,B).

*Mesh3D* - oprogramowanie sterujące pracą Skanera3D, umożliwiające dalszą obróbkę danych i eksport do innych programów (TXT, IGES, STL, DXF, VRML + tekstura).

Szerszy opis można znaleźć w punkcie 8.1.3.

*Stacja robocza* - w opcji również w wersji przenośnej.

ScanBright sprzedawany jest w dwóch wersjach: standardowej dedykowanej do zastosowań grafiki komputerowej, wzornictwa przemysłowego i wizualizacji oraz wersji Professional do zastosowań inżynierskich i archiwizacyjnych. Zapewnia szybki pomiar obiektu (do 5 milionów punktów w 10 [sek.]). Objętość pomiarowa dla wersji Professional wynosi 1.5 x 1.3 x 0.5 [m], niedokładność pomiaru wynosi 0.05 [mm] (ale wymaga bardzo dokładnych parametrów kalibracji trudnych do uzyskania w warunkach przemysłowych).



Rys. 3.30. Proces pomiarowy: a - b) obiekt podczas pomiaru, c) chmura punktów, d) siatka trójkątów [89]

Skaner posiada specjalne rozwiązania konstrukcyjne tłumiące szkodliwy wpływ drgań oraz zintegrowany system awaryjnego podtrzymania zasilania [89].

Niestety stosowane oprogramowanie umożliwia jedynie pomiar kształtu, a nie wymiarów.



### System Optigo 200

Firma Cognitens proponuje system Optigo 200 oraz jego wersję z robotem OgniCell. Składa się on z połączonych ze sobą trzech kamer CCD o rozdzielczości 1.3 mega pikseli (usytuowane zostały one do siebie pod kątem aby możliwe było otrzymanie wyników mierzonego elementu bez konieczności obracania głowicy) oraz projektora, który wyświetla na obiekcie strukturalne światło białe. Kamery rejestrują powstały obraz w ten sposób, że najpierw są wykonywane zdjęcia 3D w celu uzyskania reprezentatywnej „chmury punktów”, a następnie zdjęcia 2D, które w dalszej kolejności pozwolą zmierzyć krawędzie, otwory, wygięcia. Zmierzony model jest porównywany następnie w trybie rzeczywistym z nominalnym modelem CAD, wyniki pomiarów otrzymuje się w postaci mapy kolorów nałożonej na model (patrz rys. 3.32.) zaledwie w kilka sekund po pomiarze.

Pomiar elementów typu karoseria samochodowa realizowany jest fragmentami. Aby dane zostały automatycznie połączone, samochód z umieszczonymi na nim retro - refleksami jest wcześniej mierzony metodą fotogrametryczną, z użyciem aparatu cyfrowego o wysokiej rozdzielczości.

System pozycjonowany jest wokół mierzonej części za pomocą platformy, stolika obrotowego lub robota. Odległość od obiektu nie powinna przekraczać 75 [mm].

a)



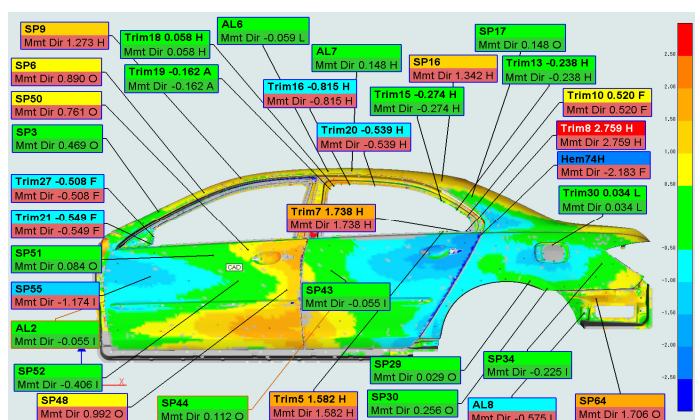
b)



Rys.3.31. System a) Optigo 200, b) Opticell [80]

Ilość ustawień głowicy jest uzależniona od wielkości pola widzenia FOV, która jest stosunkowo niewielka bo kształtuje się w granicach 140 x 180 x 60 - 290 x 380 x 200 [mm]. Również dokładność jest funkcją wielkości przestrzeni pomiarowej (im większe pole widzenia tym mniejsza dokładność). System mierzy z dokładnością 0.025 [mm] w przypadku maksymalnej przestrzeni pomiarowej.

Akwizycja z jednego kierunku wynosi kilka milisekund dlatego na pomiar nie mają wpływu drgania panujące na hali produkcyjnej. System ten może pracować w każdych warunkach oświetleniowych [80].

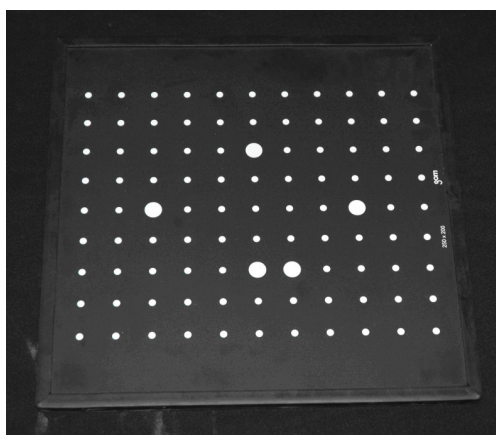


Rys.3.32. Rezultat pomiaru systemu Optigo 2000 [80]

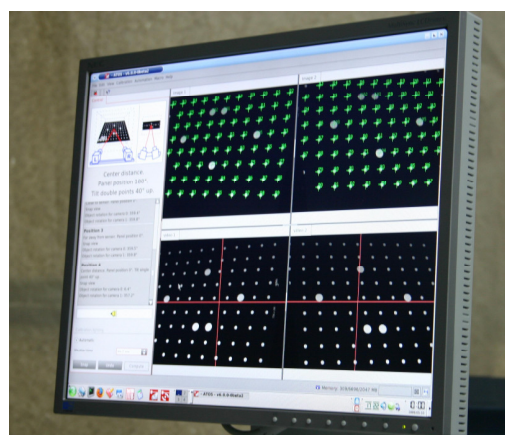
### 3.2.2. Wzorce stosowane do sprawdzania i kalibracji optycznych systemów pomiarowych

Integralną częścią systemów optycznych są wzorce stosowane do ich kalibracji. Przykładem takiego wzorca jest wzorec firmy GOM stosowany do kalibracji systemu ATOS. Wzorec składa się z czarnej płyty z naniesionymi białymi markerami w kształcie kół (patrz rys. 3.33). Koła o większej średnicy służą do orientacji położenia. System automatycznie rozpoznaje markery i dokonuje obliczeń (sprawdzane są współrzędne środków kół). Następnie w oparciu o wyliczone wartości dokonuje kalibracji całego systemu.

a)

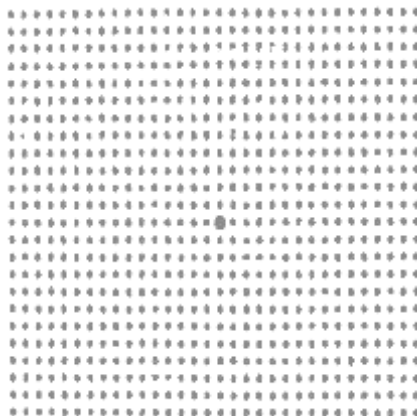


b)



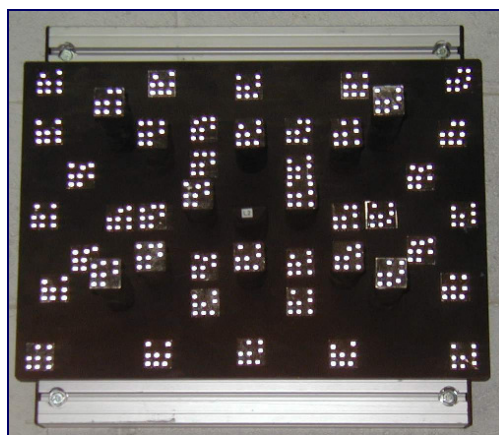
Rys. 3.33. Płyta wzorcowa GOM: a) widok ogólny, b) wyniki pomiaru

Kolejnym przykładem jest wzorzec do kalibracji skanera optycznego 3DMADMAC opisanego w punkcie 8.1. Jest to wydruk szarych markerów w kształcie kół na białym tle naklejony na płaską szybę. Proces kalibracji takim wzorcem zamieszczony jest w punkcie 8.1.2.



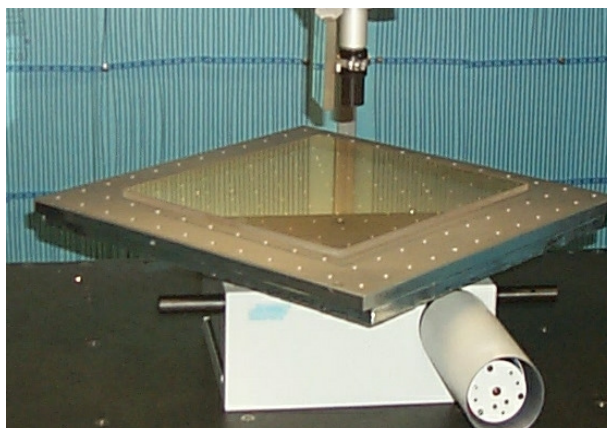
Rys 3.34. Wzorzec kalibracyjny skanera [57]

Firma Cognitens stosuje do kalibracji swojego systemu inną odmianę wzorca. Jest to wzorzec przestrzenny - słupkowy z rozmieszczonymi na nim w różny sposób białymi, markerami.



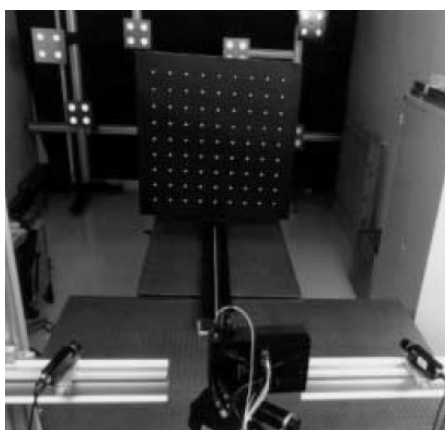
Rys. 3.37. Wzorzec do kalibracji systemu Optigo [80]

Na rysunku 3.35. został umieszczony wzorzec do sprawdzania maszyn współrzędnościowych z optyczną głowicą zalecany przez VDI/VDE 2617– 6 [N8]. Jest on wykonany z materiału ZERODUR® czyli ceramicznego szkła o bardzo niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej. Na kwadratowej płycie o wymiarach 400 x 400 [mm] umieszczonych jest 38 x 38 chromowych kół o średnicy 20 [mm].



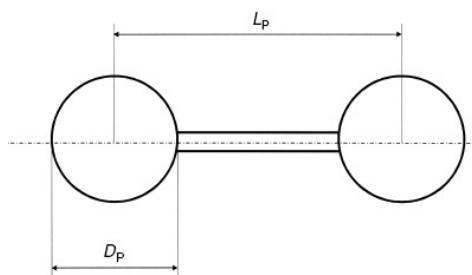
Rys 3.35. Wzorzec stosowany do głowic optycznych

Laboratorium Instytutu Technologii Informacyjnej National Research Council of Canada, przeprowadzające badania dokładności systemów optycznych, posługuje się zamieszczonymi na rysunku poniżej wzorcami. Podobnie jak w przypadku innych wzorców na czarnym tle są umieszczone białe markery w kształcie kół.



Rys. 3.36. Wzorzec Laboratorium National Research Council of Canada [30]

Wzorcem do sprawdzania optycznych systemów zalecanym przez VDI/VDE 2634 [N9] jest wzorzec (typu hantle) składający się z dwóch kul połączonych ze sobą na trzpieniu. Kule powinny być wykonane z materiału rozpraszającego światło.



Rys 3.38. Wzorzec zalecany przez VDI/VDE 2634 [N9]

Zgodnie z zaleceniami wymiary wzorca przedstawiać powinny poniższe zależności:

$$D_p = (0,1...0,2) \times L_o \quad (3.5)$$

$$L_p = 0,3 \times L_o \quad (3.6)$$

gdzie:

$L_o$  – przekątna najmniejszego czworoboku zawierającego przestrzeń pomiarową systemu.

### 3.2.3. Podsumowanie

Przedstawione systemy do digitalizacji są najnowocześniejszymi rozwiązaniami w tej dziedzinie przemysłu. Ciągły rozwój techniki mikroprocesorowej powoduje że wyniki pomiarów stają się coraz dokładniejsze. Prezentowane głowice firm DEA i Metris oparte na metodzie triangulacyjnej pozwalają uzyskać informacje o dokładności od 0.01 [mm], jednakże dokładność pomiaru zależy w dużej mierze od zastosowanej WMP lub robota pomiarowego. Ponadto montaż na WMP ogranicza możliwości pomiarów elementów o znacznych gabarytach, a żądana niewielka odległość głowicy od obiektu oraz zakres pomiarowy wykonywanych pomiarów, uniemożliwiają niekiedy w pełni wydajny pomiar. Niezaprzeczalną zaletą głowic laserowych jest natomiast ciągłość skanowania, co eliminuje błędy powstałe przy łączeniu poszczególnych fragmentów chmur punktów. Przy technologii skrzyżowanego skanowania dzięki zastosowaniu kąтового ustawienia trzech sensorów, została wyeliminowana konieczność skanowania z trzech różnych kierunków, co znacznie przyspiesza pomiar w stosunku do innych głowic, ale i tak ta metoda pomiarowa należy do wolniejszych metod wśród systemów optycznych.

Przedstawiony digitaizer Konica Minolta oparty na metodzie skanowania liniowego pomimo większego zakresu pomiarowego i szybszego pomiaru posiada mniejszą dokładność.

W przypadku pomiarów elementów wielkogabarytowych z pomocą przychodzą systemy oparte na metodzie fotogrametrycznej gdzie dokładność jest funkcją możliwości uzyskiwanej przestrzeni pomiarowej FOV – obrazowanej w postaci sześcianu. Systemy typu TRITOP charakteryzują się możliwością fotografowania elementów w dowolnym ustawieniu co jest ich podstawową zaletą, jednakże proces przygotowywania obiektu do pomiaru jest najbardziej czasochłonny z pośród wszystkich metod optycznych, nie bez znaczenia jest też długi czas przetwarzania danych pomiarowych.

Do procesu pomiaru karoserii samochodowej najkorzystniejszym rozwiązaniem wydają się być systemy oparte na metodzie projekcji światła strukturalnego typu ATOS, Optigo oraz

ScanBright. Nie wymagają skomplikowanego przygotowania warunków pracy – mogą być używane bezpośrednio na hali produkcyjnej, a w przypadku ScanBrigha po zapewnieniu odizolowania światła kierunkowego w stronę detektora i lekkim zaciemnieniu (w postaci kotar). Rozwiązanie konstrukcyjne systemów pozwalające na bardzo szybkie wykonywanie pomiarów przemawia na korzyść systemu Optigo, w przypadku którego pomiar całej karoserii i obróbka danych wynosi parę minut.

Klasyczne metody wzorcowania i korekcji maszyn pomiarowych opierają się o pomiar wykalibrowanych wzorców końcowych lub elementów wzorcowych np. płyty otworowej lub kulowej oraz wykorzystanie interferometru laserowego. Jeżeli chodzi o systemy optyczne do kalibracji najczęściej stosuje się wzorce dwuwymiarowe w postaci czarnej płyty z umieszczonymi na niej białymi markerami w kształcie kół oraz wzorce przestrzenne z zaznaczonymi znakami rozpoznawalnymi przez systemy optyczne. Do sprawdzania systemów zalecane jest stosowanie wzorców płytowych lub typu hantle.

## 4. Różnice pomiędzy systemami stykowymi, a optycznymi

Systemy optyczne i współrzędnościowe maszyny pomiarowe różnią się w wielu zasadniczych dziedzinach. Po przeglądzie licznych publikacji dotyczących metod optycznych i stykowych [1,4,12,13,16,27,28,33,35,38,45,49,50,55,57,73,74,78] postanowiono ująć te różnice w kilku kategoriach:

### **Czas pomiaru**

Główną przewagą systemów optycznych w stosunku do WMP jest akwizycja większej ilości danych w krótszym przedziale czasowym (nawet kilku sekund).

### **Dokładność pomiaru**

Kluczową zaletą wynikającą z zastosowania głowicy stykowej jest zdolność pomiaru pojedynczych punktów z niepewnością do 1 [ $\mu\text{m}$ ]. Systemy optyczne są co najmniej o rząd wielkości mniej dokładne.

### **Wrażliwość na parametry powierzchni obiektu**

Głównym ograniczeniem dla pomiarów optycznych jest wrażliwość na parametry powierzchni mierzonego obiektu tj. kolor, połysk, wykończenie warstwy. Największe trudności występują przy pomiarze szkła, marmuru, stali, plastiku, materiałów ciemnych, wypolerowanych, chropowatych, o zmiennej refleksyjności i niejednolitej teksturze.

### **Bezinwazyjność**

Brak nacisków umożliwia systemom optycznym pomiary elementów wykonanych z miękkich, delikatnych materiałów, profili cienkościennych, części wykonanych z tworzyw sztucznych, oraz pomiary antropometryczne, medyczne. Natomiast w przypadku WMP istnieje możliwość zniszczenia lub wypaczenia materiału, a także w przypadku kolizji uszkodzenia głowicy pomiarowej.

### **Odniesienie do geometrii obiektu**

Duży wpływ na wyniki pomiarów obiektu mają jego **cechy geometryczne**. Optyczne systemy mają problemy z pomiarami krawędzi, elementów nieciągłych i otworów. Wraz ze wzrostem głębokości, a co za tym idzie i kąta pomiędzy wektorem normalnym do powierzchni, a kierunkiem projekcji, maleje zdolność rozpraszania. Z kolei końcówka trzpienia pomiarowego współrzędnościowych maszyn pomiarowych nie jest w stanie penetrować wszystkich wgłębień, mierzyć zarysy o małych promieniach zaokrągleń. Współrzędnościowe maszyny pomiarowe są stosowane głównie do pomiaru prostych geometrycznie form. Systemy bezkontaktowe mogą mierzyć powierzchnie swobodne,

kształtowane z wykorzystaniem opisu parametrycznego, charakteryzujące się właściwością ciągłości powierzchni i jej pochodnych.

### **Kalibracja**

Określenie dokładności systemu wiąże się z metodą jego kalibracji. Powinna być ona przeprowadzona zgodnie z międzynarodowymi normami (odniesienie do standardowej jednostki długości). WMP są wzorcowane według krajowych i międzynarodowych norm i zaleceń. Użytkownicy takich maszyn są więc zdolni określić niepewność wykonywanych pomiarów. Ocena dokładności WMP realizowana jest na podstawie pomiaru znanych długości lub na podstawie kontrolnych pomiarów w referencyjnych punktach pomiarowych. Ocena oparta o kontrolny pomiar długości opisana jest w normie EN ISO 10360-2 [N2] oraz zaleceniach VDI/VDE 2617 [N7], wykorzystuje wzorce końcowe lub wzorce kuliste, zaś ocenę opartą o identyfikację dokładności w referencyjnym punkcie pomiarowym opisuje Metoda Macierzowa opisana w [59].

Duża różnorodność w strukturach systemów optycznych oraz metodach pozyskiwania danych powoduje, że brak jest standardowych procedur kalibracji tych systemów. Problem oceny dokładności został podjęty w kilku pracach [7,25,29,30,43,53,76], jednakże porównanie dokładności różnych systemów optycznych przy użyciu tych samych testów i kryteriów trudno znaleźć w literaturze.

Dobór techniki kalibracyjnej jest dyktowany w większości przez geometrię systemu i może się znacznie różnić. Niemieckie normy i zalecenia [N3,N9] zalecają wzorcowanie z użyciem stalowych, ceramicznych lub wykonanych z innego materiału rozpraszającego światło - kul, hantli (ang. dumbbells), elementów schodkowych, bloków, walców.

### **Częstotliwość kalibracji**

Generalnie prosta euklidesowa geometria WMP zapewnia, że wystarczy okresowe sprawdzanie dokładności. Raz uzyskane dane kalibracyjne są użyte do korekcji małych nieliniowości lub błędów wskazań odpowiedzi maszyny. Natomiast złożona geometria i nie linearna natura systemów optycznych powoduje, że pewne, wybrane zakresy kalibracji są wymagane przed każdym nowym zadaniem pomiarowym.

### **Idea pomiaru**

Systemy bezstykowe i stykowe różnią się filozofią pomiarów. Charakterystyczne dla wielu optycznych systemów 3D jest to, że pomiar indywidualnych cech obiektu nie może być wykonany bezpośrednio. Rezultatem pomiaru jest „chmura punktów 3D” obrazująca kompletny obiekt, która następnie musi być poddana procesowi parametryzacji. Maszyny



pomiarowe natomiast odwzorowują przedmiot mierzony, opierając się na metodach geometrii wektorowej, na podstawie współrzędnych zidentyfikowanych punktów.

### **Układ współrzędnych**

Optyczne systemy mają problemy z pomiarem krawędzi, co utrudnia prawidłowe wyznaczenie początku układu współrzędnych, ponadto aby uzyskać kompletną rekonstrukcję obiektu systemy te muszą dokonać wielu zobrazowań z różnych stron<sup>3</sup>, większość z nich pracuje więc w kilku lokalnych układach współrzędnych, które dopiero przy procesie łączenia danych kierunkowych sprowadzane są do jednego globalnego układu współrzędnych. Maszyny współrzędnościowe natomiast budują na obiekcie jeden lokalny układ współrzędnych opierając się na elementach geometrii obiektów.

### **Koszt**

Systemy optyczne z uwagi na coraz niższe ceny elementów optoelektronicznych tj. kamery CCD, projektory cyfrowe, stanowią konkurencyjną ofertę dla innych urządzeń pomiarowych.

### **Mobilność**

W przeciwieństwie do maszyn współrzędnościowych możliwe jest przemieszczanie systemu optycznego co jest istotne w przypadku braku możliwości transportu przedmiotu.

### **Uniwersalność**

Systemy oparte są na metodach bezstykowych są bardziej uniwersalne niż WMP, mają szerokie spektrum zastosowań. Możliwe jest wykorzystanie ich zarówno do pomiarów elementów precyzyjnych jak i wielkogabarytowych. Stosuje się je przede wszystkim w inżynierii odwrotnej, w medycynie, antropologii, archeologii (dokumentacja zabytków).

---

<sup>3</sup> Stosowane są w tym celu stoliki obrotowe, na których umieszcza się obiekt, lub łączenie systemu optycznego z robotem pomiarowym lub WMP (głowica laserowa), umożliwiając tym samym obrót systemu dookoła obiektu.

## 5. Teoretyczne podstawy dokładności pomiarów współrzędnościowych

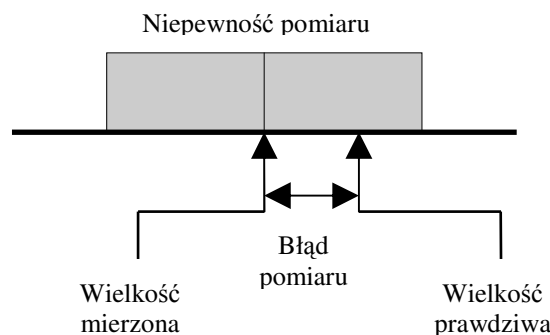
### 5.1. Niepewność pomiaru

Proces pomiaru wszelkich wielkości, związany jest z koniecznością jego oceny. Pomiar jest bowiem zawsze operacją niedokładną co oznacza, że wartość wielkości mierzonej różni się od jej wartości prawdziwej. Miarą tej różnicy jest niepewność pomiaru. Podany wynik pomiaru  $Y$  tylko wtedy jest kompletny i ma znaczenie, gdy zawiera zarówno wartość wielkości mierzonej  $y$ , jak i niepewność pomiaru, związaną z tą wartością  $U$ .

$$Y = y \pm U \quad (5.1)$$

Określenie niepewności pomiaru jest więc podstawowym zadaniem, które powinno być wykonane w procesie pomiaru [20].

Jak podaje „Międzynarodowy Słownik Podstawowych i Ogólnych Terminów Metrologii” [24] **niepewność pomiaru** definiowana jest jako: „...parametr związany z wynikiem pomiaru, charakteryzujący rozrzut wartości, które można w uzasadniony sposób przypisać wartości mierzonej...”.



Rys.5.1. Graficzne przedstawienie niepewności pomiaru [59]

Zgodnie z przewodnikiem dotyczącym sposobu określenia niepewności pomiaru [8] jako miarę niepewności stosuje się odchylenie standardowe eksperymentalne średniej, które określa liczbowo jak dobrze  $\bar{y}$  estymuje wartość oczekiwaną  $\mu_q$  zmiennej  $y$  i jest podane przez wzór:

$$u_p = s_p(\bar{y}) = \frac{s_p(y_i)}{\sqrt{n}} \quad (5.2)$$

gdzie:

$$s_p(y_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (5.3)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (5.4)$$

$s_p(y_i)$  - odchylenie standardowe eksperymentalne,

$\bar{y}$  - średnia arytmetyczna  $n$  niezależnych powtórzonych obserwacji  $Y_i$ .

W oparciu o niepewność standardową wyznacza się **niepewność rozszerzoną**. Określa ona przedział wokół wyniku pomiaru od którego można oczekiwać, że obejmuje dużą część rozkładu wartości, które w uzasadniony sposób można przypisać wielkości mierzonej. Niepewność ta otrzymywana jest przez pomnożenie niepewności standardowej  $u$  przez współczynnik rozszerzenia  $k$ , który wybiera się na podstawie wymaganego poziomu ufności i rozkładu prawdopodobieństwa [8].

$$U = k \cdot u \quad (5.5)$$

W przypadkach, gdy rozkład wielkości mierzonej można scharakteryzować rozkładem normalnym (Gaussa), a niepewność standardowa związana z estymatą wielkości wyjściowej jest wystarczająco wiarygodna, należy standardowo stosować współczynnik rozszerzenia  $k = 2$ . Tak zdefiniowana rozszerzona niepewność pomiaru odpowiada poziomowi ufności wynoszącemu około 95 % [20].

Rozkład  $Y$  często na mocy *centralnego twierdzenia granicznego*, można aproksymować rozkładem normalnym, nawet jeśli  $Y$  jest funkcją liniową wielkości wejściowych  $X_i$ , których rozkłady prawdopodobieństwa nie są rozkładami normalnymi,

*Centralne twierdzenie graniczne* podaje, że "...rozkład  $Y$  będzie w przybliżeniu normalny z wartością oczekiwaną  $E(Y) = \sum c_i \cdot E(X_i)$  i wariancją  $\sigma^2(Y) = \sum c_i^2 \cdot \sigma^2(X_i)$ , gdzie  $E(X_i)$  jest wartością oczekiwaną  $X_i$ , a  $\sigma^2(X_i)$  jest wariancją  $X_i$ , jeśli  $X_i$  są niezależne i  $\sigma^2(Y)$  jest dużo większe niż jakikolwiek pojedynczy składnik  $c_i^2 \cdot \sigma^2(X_i)$  odnoszący się do wielkości  $X_i$ , mającej inny rozkład, niż rozkład normalny..." [8].

Do wyznaczenia niepewności rozszerzonej przyjmuje się wtedy współczynnik  $k_p = t_p(v_{eff})$ , z czynnikiem  $t$  wynikającym z wypadkowej liczby stopni swobody  $v_{eff}$  dla  $u_c(y)$ , danej wzorem Welcha – Satterthwaite'a:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (5.6)$$

gdzie:

$$u_c^4(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (5.7)$$

Zgodnie z wytycznymi przewodnika [8] do obliczenia niepewności pomiaru wykorzystuje się dwie metody:

**Metoda typu A** metoda obliczenia niepewności drogą analizy statystycznej serii pojedynczych obserwacji, gdzie wartość niepewności standardowej jest równa odchyleniu standardowemu średniej arytmetycznej.

**Metoda typu B** opiera się na budowie matematycznego modelu pomiaru tzw. *budżetu niepewności pomiaru*, zawierającego listę źródeł niepewności występujących podczas pomiaru (wpływ narzędzia pomiarowego oraz warunków pomiaru, w tym: otoczenia, strategii, operatora i przedmiotu mierzonego) wraz z odpowiednimi niepewnościami standardowymi, jak również metodami ich obliczenia. Źródła błędów są szczegółowo identyfikowane na drodze analizy naukowej opartej na wszystkich dostępnych informacjach o możliwej zmienności wielkości wejściowej [3,8,20] tj.:

- poprzednie dane pomiarowe,
- posiadane doświadczenie wraz z ogólną znajomością zjawisk i charakterystyk użytych materiałów odniesienia i przyrządów,
- specyfikacje wytwórców, dane uzyskane z wzorcowania i certyfikacji,
- niepewności przypisane danym odniesienia zaczerpniętym z literatury.

Należy zwrócić uwagę, że dobrze uzasadnione obliczanie niepewności standardowej metodą typu B jest równie wiarygodne jak obliczanie jej metodą typu A, zwłaszcza w takiej sytuacji, gdzie obliczanie niepewności standardowej metodą typu A opiera się na stosunkowo małej liczbie niezależnych obserwacji.

Niepewności standardowe uzyskane metodą A albo B poprzez odpowiednie złożenie wchodzi w skład **niepewności złożonej**  $u_c$ , która jest wyznaczana na podstawie prawa propagacji wg wzoru [8]:

$$u^2_c(y) = \sum \left( \frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot (u(x_i))^2 \quad (5.8)$$

gdzie:

$u(x_i)$  - składowe niepewności

## 5. 2. Dokładność maszyn pomiarowych

Z oceną dokładności pomiaru łączy się ściśle zagadnienie oceny dokładności samego urządzenia pomiarowego. Zagadnień tych w zasadzie nie da się od siebie odseparować, z tym, że ocena dokładności pomiaru jest zagadnieniem szerszym, obejmującym swym zakresem błąd urządzenia mierzącego. Przyjęło się też uważać, że błąd pomiaru zależy głównie od dokładności urządzenia mierzącego. Podejście to jest uzasadnione gdy przyjmiemy, że inne przyczyny błędu pomiaru tj. strategia pomiaru, wpływ przedmiotu, wpływ warunków zewnętrznych są zminimalizowane lub korygowane [59].

Najczęściej stosowaną metodą oceny dokładności Współrzędnościowych Maszyn Pomiarowych jest **metoda oparta na pomiarze znanej długości**. Zgodnie z nią selektywnie wybierane długości przedmiotu pomiaru (wzorca końcowego) powinny pokrywać większość obszaru pomiarowego urządzenia. Stosuje się tu więc procedurę porównywania wymiarów wzorca długości z wynikiem pomiaru wskazanym przez sprawdzane urządzenie. Pomiar wzorca o błędzie znacznie mniejszym od dokładności sprawdzanej maszyny pozwala bowiem uzyskać w wyniku pomiaru **błąd wskazania E** urządzenia mierzącego.

Wartość błędu wskazania przy pomiarze długości (ang. *error of indication for size measurement*) opisuje zależność:

$$E = l_{zm} - l_w \quad (5.9)$$

gdzie:

$l_{zm}$  - wartość zmierzona,

$l_w$  - wartość wzorcowa.

Niewątpliwą zaletą takiego badania jest to, że wynik pomiaru jest spójny z jednostką długości - metrem i pozwala na przewidywanie, jak zachowa się urządzenie podczas przeprowadzania innych podobnych pomiarów.

Wartości błędu wskazania wyznaczone w ściśle wyspecyfikowanych warunkach nie przekraczają pewnego obszaru, który może być wyznaczony jako **maksymalny dopuszczalny błąd graniczny** wskazania urządzenia podczas pomiaru długości MPE (ang. maximum permissible error of indication for size measurement). Przyjęcie wartości dopuszczalnych dla błędów granicznych jest jednym z podstawowych zadań w procesie kalibracji maszyn. Na tej właśnie koncepcji opierają się państwowe lub międzynarodowe normy i zalecenia ISO10360 - 2 [N2], VDI/VDE 2617 [N7], CMMA [N10].

Błąd graniczny dopuszczalny MPE jest wyrażany w jednej z trzech postaci [N1]:

$$MPE = A + L/K \leq B \quad (\text{patrz rys. 5.1 a}) \quad (5.10)$$

$$MPE = A + L/K \quad (\text{patrz rys. 5.1.b}) \quad (5.11)$$

$$MPE = B \quad (\text{patrz rys. 5.1.c}) \quad (5.12)$$

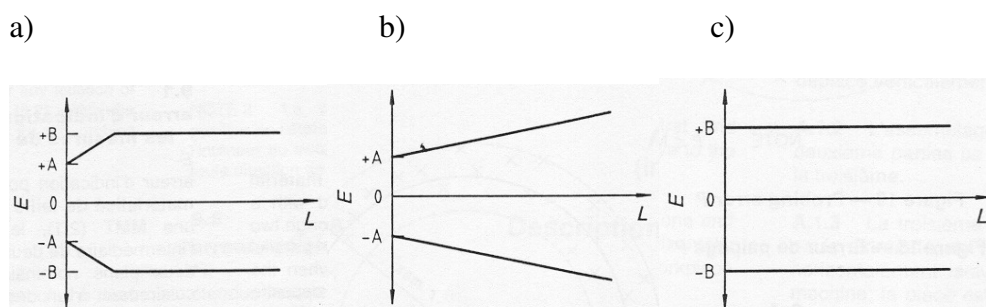
gdzie:

$A$  - jest stałą wyrażoną w mikrometrach,

$K$  - jest stałą bezwymiarową,

$L$  - jest mierzoną długością wyrażoną w milimetrach,

$B$  - jest błędem granicznym dopuszczalnym MPE wyrażonym w mikrometrach.



Rys.5.2. Różne metody określenia błędu granicznego dopuszczalnego podczas pomiaru wymiaru MPE [N1]

W zależności od zorientowania wzorca rozróżniamy niepewność przyrządu:

- jednowymiarową; wyznaczaną wzdłuż pojedynczej osi X, Y lub Z,
- dwuwymiarową; wyznaczaną w jednej z głównych płaszczyzn przestrzeni pomiarowej systemu XY, XZ lub YZ,
- trójwymiarową; wyznaczaną nierównoległe względem wszystkich trzech głównych płaszczyzn przestrzeni pomiarowej w przestrzeni XYZ.

## 6. Teza i cel pracy

Jednym z podstawowych wymogów skutecznego systemu zarządzania jakością jest kontrola zgodności wymiarowo - kształtowej. Z uwagi na wzrastające wymogi (między innymi bezpieczeństwa) żąda się zachowania coraz węższych granic tolerancji wykonania, a co za tym idzie wyższej dokładności pomiaru. Jak widzimy w tabeli 6.1. wymagane dokładności pomiaru kompleksowego są różne dla różnych aplikacji. Przykładowo dla przemysłu samochodowego wymagana jest dokładność pomiaru rzędu 0.05 [mm] (dla 10 % karoserii samochodowej). Ponadto pomiar elementów o złożonych kształtach typu karoseria samochodowa, wymaga akwizycji i przetworzenia setek tysięcy punktów w krótkim przedziale czasowym. Stosowane techniki pomiarowe muszą być więc szybkie, precyzyjne, elastyczne oraz porównywalne.

*Tabela.6.1. Wymogi dla kompleksowego pomiaru przemysłowego [5]*

<b>SEKTOR PRZEMYSŁOWY</b>	<b>FOV [m]</b>	<b>DOKŁADNOŚĆ [mm]</b>
<b>Samochodowy</b>		
90 % samochodu	1 x 1	0.5
10 % samochodu	0.2 x 0.2	0.05
<b>Morski</b>	20 x 20	5
<b>Aerokosmiczny</b>	10 x 10	1
	100 x 100	10
<b>Mechaniczny</b>	0.25 x 0.25	0.025
<b>Mikroelektroniczny</b>	0.05 x 0.05	0.0025

Aktualny stan rozwoju współrzędnościowej techniki pomiarowej nie pozwala na znaczne skrócenie czasu pomiaru przy zachowaniu jej dokładności.

Optyczne metody pomiarów współrzędnościowych z uwagi na swoje zalety (bezkontaktowy pomiar, krótki czas pozyskiwania danych, mobilność jak również coraz niższe koszty urządzeń optoelektronicznych) są coraz częściej używanym narzędziem pomiarowym. Wśród nich do najszybszych należy zaliczyć polowe techniki pomiaru bazujące na projekcji światła strukturalnego na obiekt. Pewnym ograniczeniem ich stosowania jest niska dokładność, brak standartowych procedur sprawdzenia dokładności pomiarów realizowanych tymi metodami oraz skutecznych metod kalibracji i powiązania z wzorcem długości.

Po przeprowadzonej analizie literatury stwierdzono, że brak jest uniwersalnego systemu do szybkich, kompleksowych i dokładnych zdań pomiarowych. Podjęto się więc opracowania systemu pomiarowego, który pozwoliłby na spełnienie wymogów stawianych przez przemysł oraz sposobu jego kalibracji.

W pracy postawiono następującą **tezę**:

**Istnieje możliwość opracowania hybrydowej metody pomiarowej łączącej dokładność systemu stykowego w zakresie identyfikacji punktów pomiarowych z szybkością i kompleksowością metod optycznych oraz opracowania procedury sprawdzenia dokładności systemu w oparciu o zestaw elementów wzorcowych i powiązanie go z wzorcem długości.**

**Celem pracy jest opracowanie koncepcji oraz podstaw teoretycznych oceny dokładności wysokoefektywnej metody pomiarowej łączącej techniki stykowe i optyczne, do pomiarów i analizy geometrii obiektów.**

Długofalowym celem projektu jest opracowanie metod i urządzeń, które pozwolą na stworzenie szybkich przemysłowych systemów pomiarowych pozwalających na wysokoefektywną kontrolę wymiarową (nawet przy 100 % kontroli nie zmieniającej rytmu wytwarzania), a co za tym idzie zwiększenie jakości i niezawodności produkcji.



## 7. Model koncepcyjny systemu hybrydowego

Koncepcja systemu hybrydowego zakłada, że jest możliwe połączenie w jeden system dwóch technik pomiarowych: stykowej Współrzędnościowej Maszyny Pomiarowej i bez - stykowej optycznego systemu pomiarowego w celu zbudowania systemu do szybkich, kompleksowych i dokładnych pomiarów. Do realizacji koncepcji przyjęto następujące założenia:

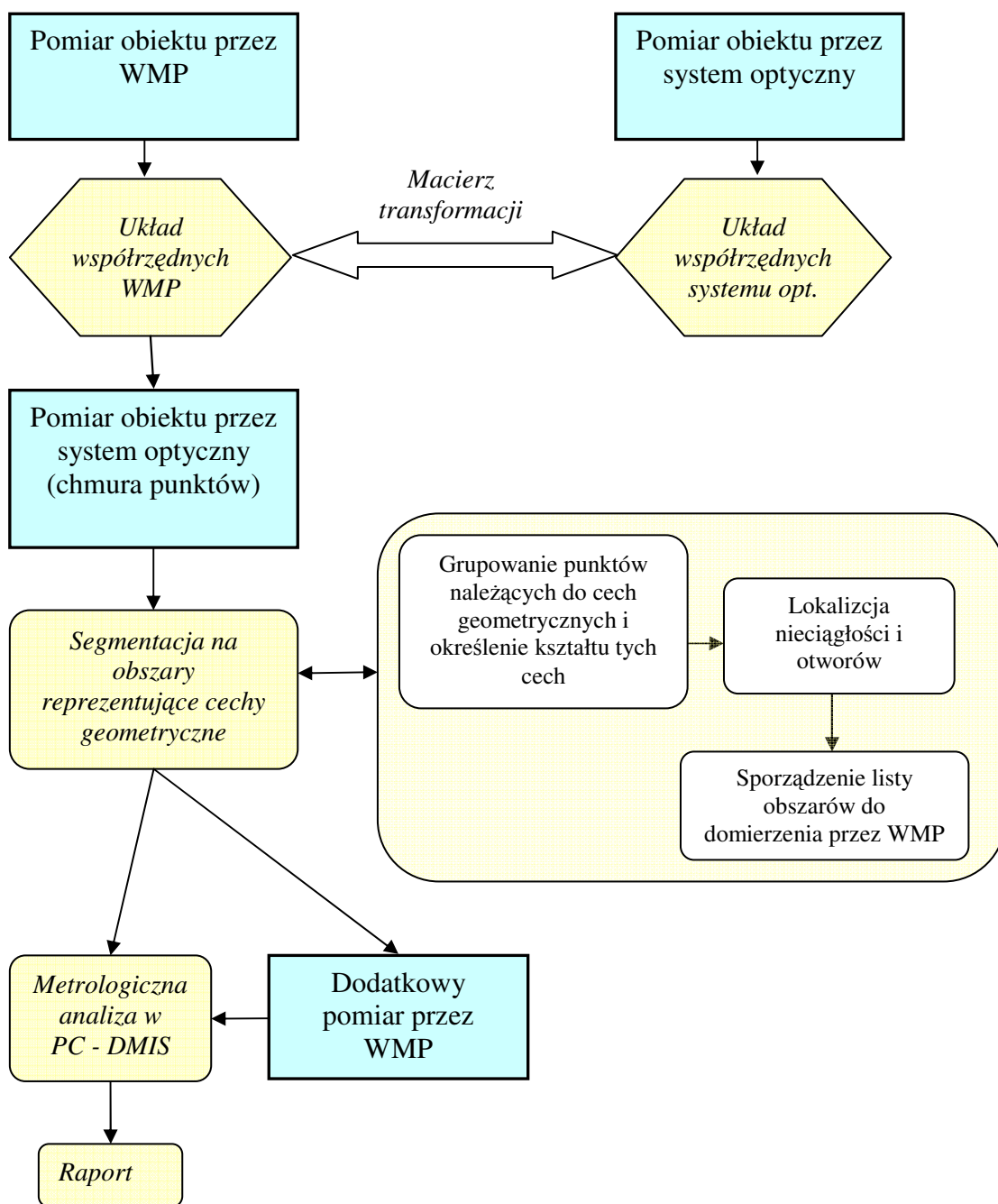
- układ współrzędnych, którego wyznaczenie stanowi istotne źródło błędów dla metody optycznej, jest wyznaczony metodą stykową według istniejących strategii metrologicznych,
- istnieje możliwość stworzenia macierzy transformacji (przejścia) z przestrzennych współrzędnych skanera optycznego do przestrzennych współrzędnych WMP,
- dalsze pomiary obiektu realizowane są metodą optyczną w czasie kilku sekund,
- rezultatem pomiaru metodą optyczną jest „chmura punktów 3D” obrazująca kompletny obiekt,
- możliwa jest automatyczna lub półautomatyczna analiza „chmur punktów pomiarowych”, czyli grupowanie i podział na obszary reprezentujące cechy geometryczne,
- istnieje możliwość transformacji pomiarów optycznych niosących informację o geometrii przedmiotu do klasycznego oprogramowania metrologicznego,
- wyniki pomiarów optycznych są opracowywane przy użyciu silnika numerycznego certyfikowanego oprogramowania metrologicznego:
  - a) przetworzenie informacji o obiekcie na zastępcze elementy geometryczne,
  - b) wyznaczenie odchyłek od wymiarów nominalnych lub modelu CAD części.
- znana jest niepewność pomiaru WMP,
- wzorzec do kalibracji optycznego systemu pomiarowego posiada optymalne z punktu widzenia metrologicznego właściwości,
- ustalenie dokładności systemu hybrydowego (optyczno-stykowego) realizowane jest w oparciu o zestaw elementów wzorcowych, których charakterystyki metrologiczne zostaną podane w oparciu o pomiary na referencyjnej WMP,

- ustalenie dokładności realizowane jest na podstawie pomiaru długości, co daje możliwość powiązania z wzorcem metra.

Sposób działania systemu oparty jest na zasadzie przedstawionej na rysunku 7.1.

Początkowy etap pomiarów polega na uzgodnieniu układów współrzędnych WMP oraz systemu optycznego (wyznaczeniu macierzy transformacji pomiędzy układami), poprzez pomiar dowolnego obiektu składającego się z trzech kul. Następnie buduje się lokalny układ współrzędnych związany z przedmiotem, opierając się na danych pomiaru stykowego i mierzy badany obiekt w tym układzie przez skaner optyczny. Dalszy etap polega na analizie otrzymanej „chmury punktów pomiarowych”, czyli ich automatycznemu grupowaniu i podziale na obszary reprezentujące cechy geometryczne (tj. kula, płaszczyzna, walec, stożek) oraz powierzchnie swobodne. Bazując na otrzymanych wynikach wyznacza się obszary, które muszą być dodatkowo pomierzone przez WMP. Wydzielone elementy geometryczne są przesyłane do klasycznego oprogramowania metrologicznego współpracującego z WMP. W tym programie zostają wyznaczone odchyłki od wymiarów nominalnych lub modelu CAD części.

Przedmiotem tej pracy jest zintegrowanie układów współrzędnych obu systemów (będące głównym założeniem koncepcji) oraz metrologiczna analiza wyników (istotna z punktu przydatności systemu), co stanowi integralną część grantu nr 3 T10C 010 29.



Rys.7.1. Ogólny schemat koncepcyjny systemu hybrydowego

## 8. Stanowisko badawcze

W skład laboratoryjnego, prototypowego systemu hybrydowego wchodzi:

- 1) skaner optyczny 3DMADMAC [57]
  - a) kamera cyfrowa,
  - b) projektor,
  - c) oprogramowanie 3D Mesh,
  - d) wzorzec do kalibracji skanera.
- 2) maszyna współrzędnościowa PMM 12106 [86]
- 3) stacja robocza
- 4) oprogramowanie PC- DMIS [79]

### 8.1. System 3DMADMAC

Jak już wspomniano wcześniej do najlepiej rokujących metod optycznych jeżeli chodzi o aplikację w przemyśle samochodowym należy metoda projekcji światła strukturalnego, dlatego też do realizacji koncepcji systemu hybrydowego wybrano system 3DMADMAC (patrz poniższy rysunek) opracowany i rozwijany w Instytucie Mikromechaniki i Fotoniki Politechniki Warszawskiej. System ScanBright jest wersją systemu 3DMADMAC wdrożoną do przemysłu w latach 2001 - 2003. Dzięki współpracy w ramach grantu była możliwość jego modyfikacji na poziomie sprzętowym i programowym co było niezbędne do planowanych badań.



*Rys.8.1. Skaner optyczny*

System ten bazuje na projekcji cyfrowych prążków sinusoidalnych oraz kodów Gray'a (projekcja realizowana z wykorzystaniem technologii DLP) oraz akwizycji obrazu przez kamerę CCD. Parametry kamery i projektora przedstawiają poniższe tabele:

*Tabela 8.1. Parametry kamery PGR Flea FLEA-HIBW, firmy Point Grey Research*

Interfejs:	IEEE-1394a
Matryca:	1/3 " Sony CCD sensor
Wymiary:	30 x 31 x 29 [mm] (bez obiektywu)
Waga:	60g (bez optyki)
Wymiary piksela:	4.65 x 4.65 [ $\mu\text{m}$ ]
Stosunek sygnału do szumu:	> 59dB
Rozdzielczość:	640 x 480 przy 60FPS i 1024x768 przy 30FPS
Temp. pracy:	0° to 45 [°C]

*Tabela 8.2. Parametry projektora TOSHIBA TDP-MT700*

Sposób tworzenia obrazu	Procesor obrazu Faroudja 0,8" Digital Light Processing™ (DLP Chip™)
Rozdzielczość	1280 x 720, format obrazu 16:9 przełączany do 4:3
Jasność; kontrast	1000 ANSI lumenów; 2500:01:00
Ilość wyświetlanych kolorów	16.7 miliona kolorów
Moc lampy / żywotność (h)	250 W/200 W ECO do 2.000 godz./3.000 godz.ECO
Częstotliwości (pozioma/pionowa)	50 - 85 Hz / 15 - 93 kHz
Obiektyw	Ręczny zoom i focus
Poziom hałasu	>30 dB
Przekątna obrazu	0.94 - 7.62 [m]
Odległość od ekranu	1.08 - 11.91 [m]
Wymiary (dł. x wys. x szer.); waga	380 x 115 x 300 [mm]; 5.7 [kg]

Proces pomiaru składa się z pomiaru fazy oraz skalowania do współrzędnych x,y,z (kalibracji).

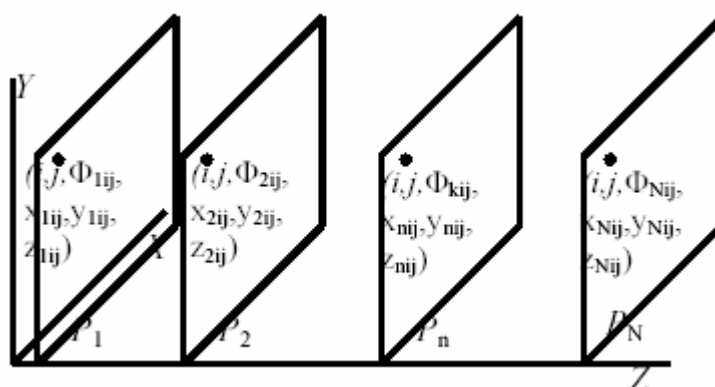
### 8.1.1. Pomiar fazy

Zasadę pomiaru fazy zademonstrowano ponad 20 lat temu [66,67,69,70]. Bazuje ona na analizie zdeformowanych obrazów prążkowych i odbywa się w dwóch krokach: wyznaczenia fazy oraz usunięcia skoków fazy.

Za najefektywniejszą i najdokładniejszą metodą *wyznaczenia fazy* przy pomiarach kształtu statycznych obiektów trójwymiarowych uznaje się metodę czasowego przesunięcia fazy TPS wspomagana przez technikę usuwania skoków fazy, a w szczególności metodą kodów Gray'a. Metoda TPS wymaga projekcji na badany obiekt sekwencji obrazów prążkowych przesuniętych w fazie względem siebie. Na tej podstawie wyznacza się fazę modulo  $2\pi$  dla każdego piksela kamery oddzielnie z wartości intensywności pobranych obrazów. Następnie przeprowadzana jest procedura *usuwania skoków fazy* z wykorzystaniem kodów Gray'a, pozwalających na ponumerowanie prążków sinusoidalnych w obrazie w sposób jednoznacznie je identyfikujący. Ostatni etap polega na dodaniu faz cząstkowych: z projekcji prążków oraz z projekcji kodów Gray'a. Otrzymana w ten sposób faza całkowita stanowi ciągłą reprezentację powierzchni mierzonego obiektu [57].

### 8.1.2. Kalibracja systemu

*Skalowanie mapy fazowej* [38] do współrzędnych  $(x,y,z)$  polega na wyznaczeniu zależności pomiędzy wartościami fazy, a rzeczywistymi współrzędnymi. Podstawą jest stworzenie macierzy kalibracji, dzięki której możliwe będzie wyznaczenie z wartości fazy ( $\Phi$ ) w każdym pikselu  $(i,j)$  obrazu, wartości współrzędnych  $(x,y,z)$  w wykalibrowanej objętości pomiarowej. Macierz kalibracji tworzona jest podczas *procesu kalibracji* przez sekwencyjny pomiar **wzorca** (modelu płaszczyzny z naniesionymi znacznikami), w różnych położeniach tej płaszczyzny wzdłuż osi do niej prostopadłej. Macierz kalibracji jest zapisem wirtualnych płaszczyzn, które zostały pomierzone w procesie kalibracji. Każda płaszczyzna jest zbiorem punktów o współrzędnych  $(i,j,\Phi,x,y,z)$ . Wartości  $(i,j)$  są indeksami pikseli w obrazie kamery,  $\Phi$  wartością fazy obliczoną dla tego punktu, a  $(x,y,z)$  to współrzędne tego punktu w przestrzeni macierzy kalibracji [38].



Rys.8.2. Kalibracja przestrzeni pomiarowej - rozmieszczenie wirtualnych płaszczyzn [38]

W przypadku, gdy łączenie chmur punktów pozyskanych z wielu kierunków ma być realizowane na podstawie parametrów doświadczalnych, należy obliczyć równania osi obrotu stolika obrotowego. Przedtem należy dokonać pomiaru płaszczyzny w czterech różnych położeniach stolika obrotowego. Następnie wyznaczamy z równań czterech płaszczyzn równanie osi obrotu stolika. Równanie to jest niezbędne do złożenia chmur punktów mierzonych z różnych kierunków [38,57].

### 8.1.3. Oprogramowanie sterujące pracą skanera – Mesh 3D

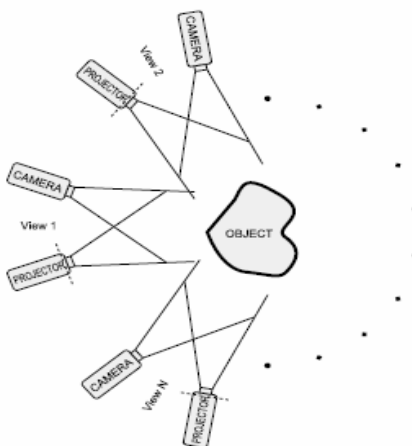
Do kompleksowej obsługi systemu służy oprogramowanie Mesh 3D. Wykorzystuje się go do pozyskania „chmur punktów” z pomiaru i dalszej ich obróbki. Składa się ono z trzech głównych modułów.

#### Moduł edycji punktów pomiarowych.

Chmurę otrzymaną w procesie skanowania (akwizycji danych) należy poddać czyszczeniu, usuwaniu szumów pomiarowych oraz nieciągłości. Szumy pomiarowe stanowią nieznaczną część danych, są to pojedyncze punkty losowo rozrzucone wokół chmury właściwej, które powstają wskutek błędów pomiaru (refleksyjny obiekt, źródła światła zniekształcające pomiar). Po odpowiednim ustawieniu parametrów filtracji punkty te są zaznaczane, a następnie kasowane. Natomiast nieciągłości powstają zazwyczaj na krawędziach mierzonego obiektu lub gdy mierzona powierzchnia jest równoległa do kierunku emitowanego przez moduł projekcyjny światła.

#### Moduł łączenia danych

W większości przypadków do uzyskania w pełni trójwymiarowej reprezentacji obiektu wymagany jest pomiar z więcej niż jednego kierunku (rys.8.3).



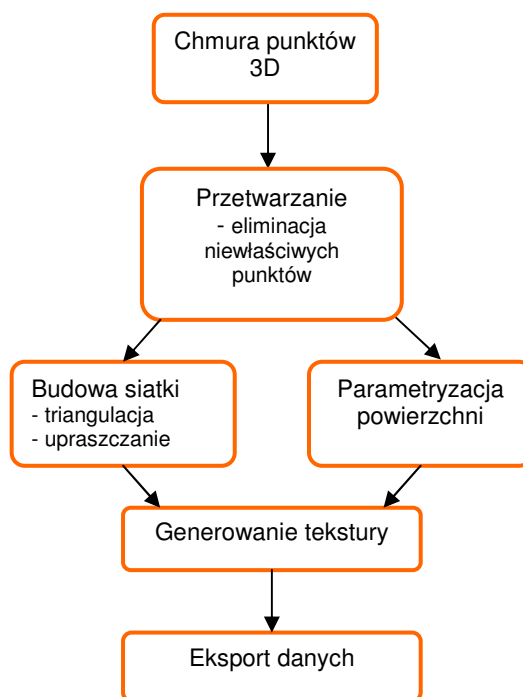
Rys.8.3. Pomiar z wielu kierunków

Algorytmy łączenia danych umożliwiają automatyczne łączenie chmur punktów pozyskanych w wyniku pomiaru z wielu kierunków. Ilość kierunków zależy od stopnia skomplikowania kształtu obiektu. Każdy pomiar kierunkowy przeważnie jest przeprowadzany w innym (lokalnym) układzie współrzędnych. Moduł łączenia danych zawiera w sobie szereg metod, które poprzez eksperymentalne (z wykorzystaniem stolika obrotowego), lub numeryczne (korelacja punktów charakterystycznych w łączonych chmurach, iteracja najbliższych punktów) wyznaczanie transformacji pomiędzy lokalnymi układami współrzędnych umożliwiają łączenie danych kierunkowych.

### Moduł konwersji

Wynikowe dane pomiarowe otrzymywane w postaci chmury punktów często nie są akceptowane przez inne aplikacje. Zadaniem modułu konwersji jest zmiana chmury punktów reprezentującej obiekt do innej akceptowalnej postaci. Oprócz tego ze względu na znaczną liczbę punktów w chmurze sięgającą czasami kilkunastu milionów wymagana jest ich redukcja.

Algorytmy konwersji zmieniają reprezentację obiektu wirtualnego z chmury punktów na siatkę trójkątów. Zawierają one moduły triangulacji, upraszczania siatki, generacji tekstury i eksportu danych do innych programów [57].



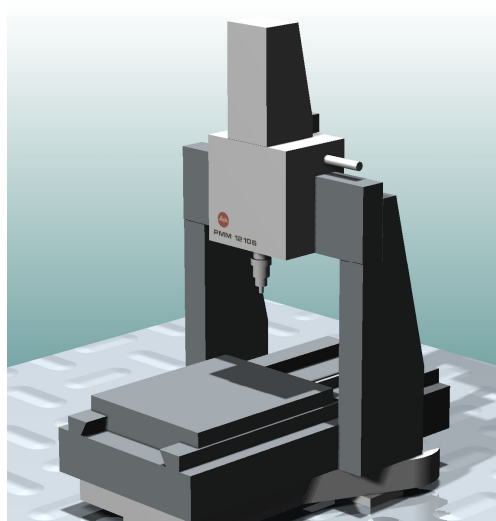
Rys.8.4. Proces przetwarzania chmury punktów



## 8.2. Maszyna współrzędnościowa PMM 12106

Drugim składnikiem systemu hybrydowego jest współrzędnościowa maszyna pomiarowa klasy referencyjnej, PMM 12106 firmy Leitz Messtechnik GmbH, znajdująca się w Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej na Politechnice Krakowskiej. Maszyna ta jest konstrukcji portalowej z przesuwным stołem. Wyposażona jest w aktywną głowicę skanującą, magazyn końcówek pomiarowych oraz system korekcji temperaturowej. Posiada inkrementalny układ pomiarowy o rozdzielczości 0.025 [ $\mu\text{m}$ ]. Współpracuje z systemem pomiarowym Quindos oraz PC - DMIS. Zakres pomiarowy maszyny dla poszczególnych osi wynosi:  $x = 1200$ ,  $y = 1000$ ,  $z = 600$  [mm]. Błąd graniczny wg. danych producenta wynosi  $\text{MPE} = 0.8 + L / 400$  [ $\mu\text{m}$ ] [86]. Maszyna umieszczona jest w pomieszczeniu klimatyzowanym wyposażonym w wysokiej jakości centrale klimatyzacyjną, która zapewnia w całym pomieszczeniu temperaturę  $20 \pm 1$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Spełnia ono wymogi opracowane przez PTB dla laboratoriów akredytowanych dotyczące stosowanych w pracach kalibracyjnych maszyn.

Ogólny opis zasady działania takiej maszyny można znaleźć w punkcie 2.1.



Rys.8.5. PMM 12106 – widok ogólny

## 8.3. Stacja robocza

Niezbędnym komponentem systemu hybrydowego jest stacja robocza. Dysponowano komputerem DELL PRECISION WorkStation 490.

#### Podstawowe parametry techniczne:

Procesory:	2 x Intel(R) Xeon(TM)CPU 3.00GHz dwa dwurdzeniowe, 64-bitowe procesory, co daje razem 4 rdzenie przetwarzania zamontowane w dwóch gniazdach.
Karta grafiki:	NVIDIA Quadro FX 3500 wydajna karta, zaprojektowana z myślą o obsłudze aplikacji 2D i 3D we wszystkich zastosowaniach z zakresu inżynierii, architektury i projektowania.
Pamięć RAM:	2GB
Dysk twardy:	MAXTOR ATLAS10K5_147SAS SCSI Disk 120GB
Monitor:	DELL19" 1280x1024

Całość pracuje pod kontrolą systemu operacyjnego: Microsoft(R) Windows XP Professional PL z dodatkiem Service Pack 2.

#### **8.4. Oprogramowanie PC –DMIS**

Aby zrealizować koncepcję hybrydową należy skaner optyczny doposażyć w oprogramowanie metrologiczne. Zdecydowano się na program PC - DMIS opracowany przez firmę WILCOX ASSOCIATES INC., który jest liderem wśród oprogramowań współpracujących z maszynami współrzędnościowymi. Termin PC - DMIS pochodzi od skrótu DMIS powstałego z pierwszych liter wyrazów Dimensional Measuring Interface Standard. PC - DMIS to zaawansowany pakiet pomiarów geometrycznych napisany i działający w systemie Windows, którego zarówno interface jak i styl pracy skutecznie wykorzystuje wiodące środowisko okienkowe. Algorytmy obliczeniowe programu są certyfikowane przez PTB (Physikalisch-Technischen Bundesanstalt). Program PC - DMIS należy do programów grupy CAD/CAMe/CAM. Głównymi celami przy projektowaniu pakietu PC - DMIS było zapewnienie uniwersalności i łatwości obsługi. Aby je spełnić w PC - DMIS udostępniono środowisko pozwalające na korygowanie błędów w czasie rzeczywistym, w przeciwieństwie do długiego i żmudnego procesu charakterystycznego dla innych pakietów geometrycznych. Oprogramowanie zorientowano na wymiarowanie, aby zmniejszyć potrzebę analizowania i interpretacji wyników pomiarów na WMP [79].

## **9. Budowa wzorca do sprawdzania i kalibracji optycznych systemów pomiarowych**

Proces wzorcowania systemów optycznych jest kluczowym czynnikiem wpływającym na ich dokładność.

Badania wstępne opisane w [63,64] potwierdziły możliwość technicznej realizacji metody hybrydowej oraz pozwoliły na oszacowanie dokładności systemu optycznego w warunkach pomiaru wielkości geometrycznych, jednakże ujawniły konieczność zmiany wzorca kalibracyjnego dla poprawienia dokładności systemu.

Jak już wspomniano większość wzorców do kalibracji i sprawdzania optycznych systemów pomiarowych jest wzorcami dwuwymiarowymi. Brak jest stabilnych wzorców o przystępnej cenie wraz z możliwością kalibracji przy stosunkowo niskiej niepewności.

Uznano, że ważne jest, aby wzorzec był jak najbardziej zbliżony do obiektów mierzonych, tak więc, jeżeli system optyczny ma służyć do pomiarów 3D to również powinien być wykalibrowany z wykorzystaniem wzorców 3D. Zdecydowano się więc na zaprojektowanie i budowę nowego wzorca. Wzorzec ten ma służyć do zadania wzorcowania dowolnego systemu optycznego identyfikującego obiekty przestrzenne. Niepewność wzorca nie powinna przekraczać 20 % obszaru błędów granicznych wzorcowanego systemu.

### **9.1. Założenia konstrukcyjne**

Opracowywany wzorzec powinien charakteryzować się możliwością pomiarów zarówno metodą stykową jak i bezstykową, dlatego też:

- ✓ wzorzec powinien być trójwymiarowy tzn. elementy wzorcowe powinny mieć charakter przestrzenny,
- ✓ powinien składać się z regularnie powtarzających się elementów, najlepiej o stałej krzywiznie umieszczanych na płaskiej powierzchni,
- ✓ elementy wzorcowe i płyta powinny kontrastować względem siebie,
- ✓ wzorzec powinien cechować się małą refleksyjnością świetlną – powinien być zbudowany z materiałów rozpraszających światło lub pokryty odpowiednimi powłokami,
- ✓ wzorzec z uwagi na konstrukcję powinien być możliwie jak najmniej wrażliwy na oddziaływanie warunków zewnętrznych,
- ✓ materiały konstrukcyjne wzorca powinny mieć bardzo mały współczynnik rozszerzalności termicznej,

- ✓ wzorzec powinien zapewnić możliwość kalibracji na referencyjnej maszynie pomiarowej,
- ✓ wymiary skrajne obiektów wzorcowych powinny być mniejsze niż 30 [mm], aby wyeliminować wpływ błędów długookresowych podczas wzorcowania na WMP,
- ✓ elementy wzorcowe powinny charakteryzować się błędami kształtu o dopuszczalnej wartości granicznej  $\pm 1$  [ $\mu\text{m}$ ],
- ✓ zastosowane elementy wzorcowe powinny być barwą zbliżone do powierzchni metalowych.

Konstrukcja wzorca powinna zapewniać:

- ✓ odpowiednią sztywność,
- ✓ zamocowanie elementów wzorcowych powinno być stabilne i nie może wywierać naprężeń na inne elementy wzorca,
- ✓ łatwość i stabilność montażu w przestrzeni pomiarowej przyrządów pomiarowych.

Wzorzec w postaci płyty z umieszczonymi kulami spełnia wyżej wymienione wymogi, ponadto zapewnia kompatybilność z wzorcami stosowanymi do kalibracji oraz badań odbiorczych i okresowych współrzędnościowych maszyn pomiarowych.

Zastosowanie elementów kulistych lub sferycznych umożliwia wykalibrowanie takich wzorców we wszystkich trzech współrzędnych. Zarysy kuliste ze względu na ich charakter przestrzenny najlepiej odpowiadają cechom mierzonych kształtów, dodatkową ich zaletą jest łatwość wzorcowaniu z wykorzystaniem WMP.

## 9.2. Budowa prototypu

Aby opracować wzorzec przeprowadzono szereg badań i prób oraz opracowano kilka prototypów. Głównym celem budowy prototypów było dobór i weryfikacja powłok kul wzorcowych i płyty.

Poniższy rysunek przedstawia kilka powłok powstałych poprzez: trawienie, chromowanie, fosforyzowanie (parz rys 9.1). W efekcie przeprowadzonych licznych badań na maszynie współrzędnościowej i skanerze optycznym została wybrana powłoka chromowa, która daje małą refleksyjność, a zarazem w bardzo małym stopniu wpływa na błąd kształtu na całej powierzchni. Powłoka chromowa zapewnia też kolor podobny do koloru blachy, a było to celowe ze względu na to, że skaner optyczny ma docelowo służyć do pomiarów karoserii

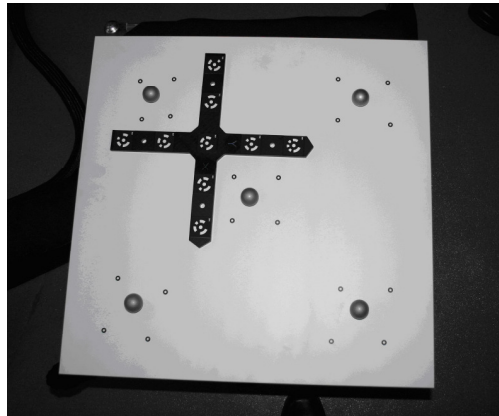
samochodowej. W kulach wydrążono otwory aby można było zamocować je do płyty ceramicznej.



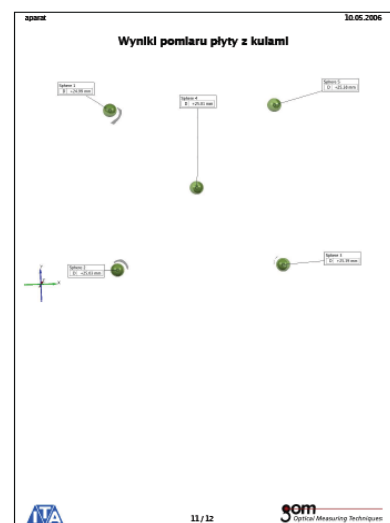
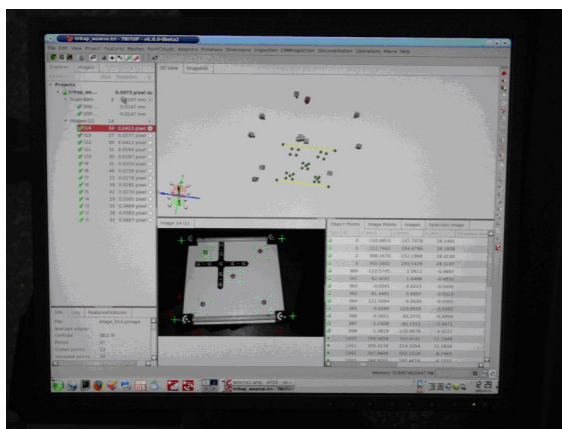
Rys.9.1. Kule wzorcowe z powłoką uzyskaną metodą:  
a) czernienia, b) chromowania, c) fosforyzowania

Płyta wzorca została wykonana ze szkła, a następnie powleczone białą powłoką antyrefleksyjną.

Prototyp wzorca z zamontowanym pięcioma kulami został dodatkowo przetestowany na skanerze ATOS III firmy GOM. Zastosowane powłoki nie wprowadziły szumu podczas skanowania i można je było zastosować do budowa wzorca.



Rys .9.2. Prototyp wzorca z dodatkowymi markerami

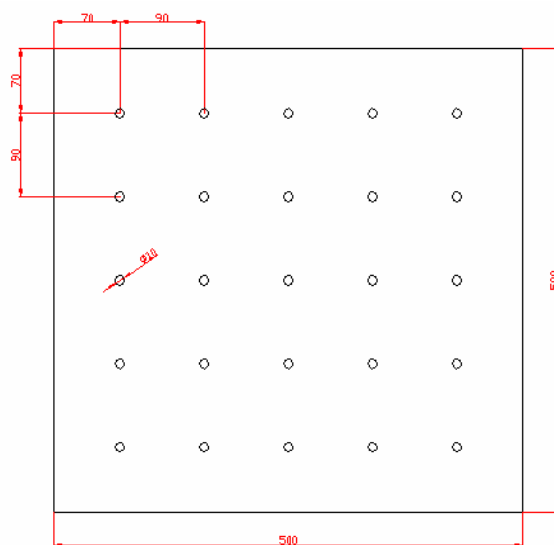


Rys.9.3. Raport z pomiaru prototypu z oprogramowania ATOS

### 9.3. Budowa wzorca

#### *Płyta szklana ceramiczna*

Elementem odpowiadającym za sztywność i stabilność temperaturową wzorca jest płyta. Po przeanalizowaniu materiałów do budowy wzorca zastosowano materiał z ceramiki szklanej. Materiał ten posiada współczynnik rozszerzalności temperaturowej  $\alpha = (0 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} [1/K]$ . Jest to wartość znikoma przyrównując do współczynnika stali  $\alpha = 11.5 \cdot 10^{-6} [1/K]$ . Wymiary zewnętrzne płyty wynoszą 500 x 500 x 4 [mm]. W płycie nawiercone są otwory o średnicy  $\varnothing = 10 [mm]$ , rozmieszczone co 90[mm].



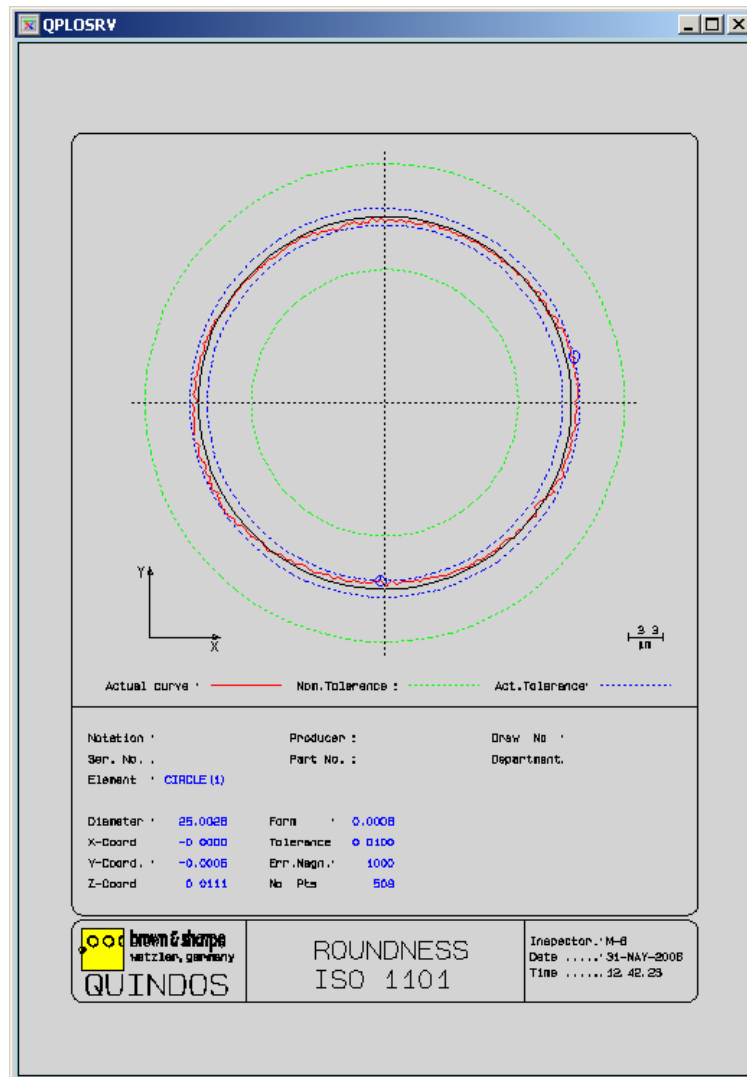
Rys.9.4. Projekt płyty

W celu uzyskania powierzchni rozpraszającej światło, płytę powleczono białą matową powłoką jak przy budowie prototypu.

#### *Elementy wzorcowe*

Jako elementy wzorcowe zastosowano kule wykonane ze stali, o średnicy  $\varnothing = 25 [mm]$  i błędzie kształtu nie większym niż  $R = 1 [\mu m]$ . Kule pokryto chemicznie powłoką chromową w fabryce łożysk tocznych Kraśnik S.A.

Każda kula przed zamontowaniem na płycie została zmierzona na współrzędnościowej maszynie PMM 12106 firmy Leitz w celu sprawdzenia jej odchyłki kształtu. Poniższy rysunek przedstawia raport z pomiaru jednej z kul.



Rys.9.5. Raport z programu Quindos przedstawiający odchyłkę kształtu

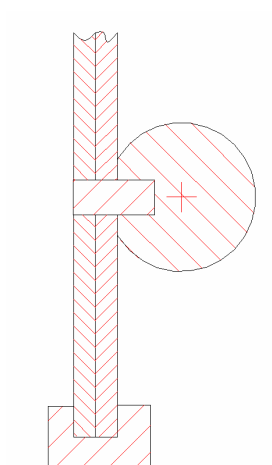
### Rama wzorca

Płytę ceramiczną zamontowano w ramie aluminiowej w celu umożliwienia stabilnego montażu w przestrzeni pomiarowej kalibrowanego urządzenia, oraz ochrony przed uszkodzeniem mechanicznym płyt ceramicznej. Płyta wykonana jest z aluminium, aby waga całego wzorca nie była zbyt duża. Ramę następnie powleczono matowym popielatym lakierem.

### Montaż płyty

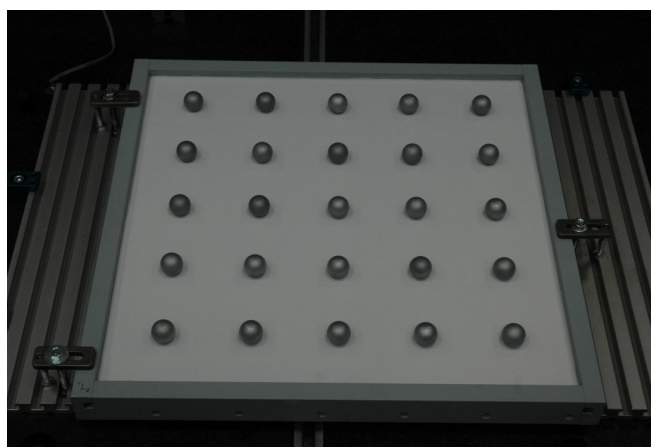
Podczas montażu ważne jest, aby elementy nie wywierały naprężeń. Naprężenia mogą powodować odkształcenia co wpływa na jakość wzorca. Kule wzorcowe zamontowano do płyty ceramicznej za pomocą trzpienia, tak by cała ich powierzchnia była powyżej płaszczyzny mocowania. Sztywne połączenie i wolne od naprężeń zapewniło połączenie

klejone. Ze względu na małą grubość płyty ceramicznej 4 [mm] sklejono ze sobą dwie płyty ceramiczne. Takie sklejenie zapewnia sztywność wzorca i wytrzymałość mechaniczną [37].



*Rys.9.6. Fragment przekroju płyty ilustrujący złożenia ze sobą elementów wzorca*

Rysunek (9.7) przedstawia gotowy wzorec (w dalszej części pracy nazywany płytowym) zbudowany według założonych kryteriów.



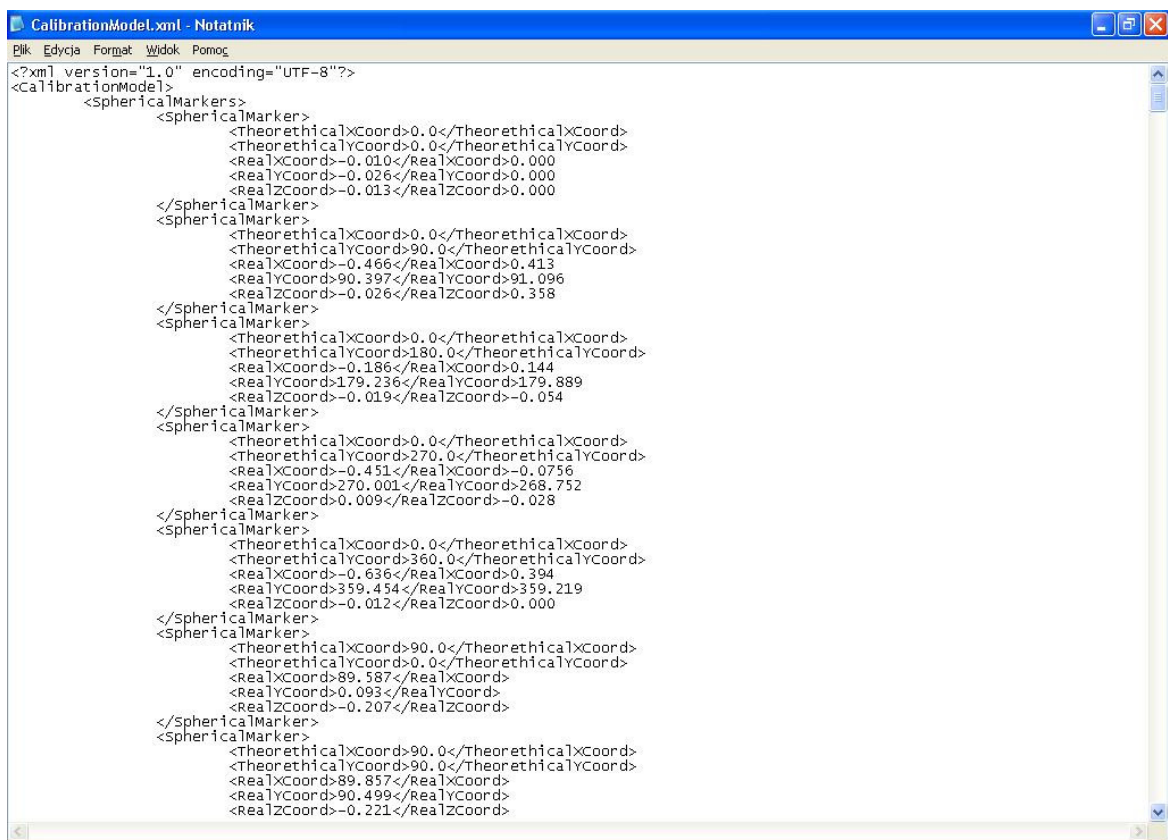
*Rys.9.7. Fotografia wzorca płytowego*



## 10. Realizacja koncepcji pomiarów hybrydowych

### 10.1. Kalibracja układu optycznego z wykorzystaniem wzorca i WMP

Procedurę kalibracji wzorca płytowego przy użyciu referencyjnej maszyny pomiarowej PMM 12106 opisuje punkt 12.2.3. W wyniku pomiarów otrzymano współrzędne środków kul, które następnie uśredniono dla wszystkich położenia otrzymując wartości charakteryzujące wzorzec. Wartości te zostały automatycznie eksportowane do formatu XML (Extender Markup Language) dzięki specjalnie dla tego celu opracowanemu programowi. Jest to uniwersalny format danych dla aplikacji bazujących na językach wyższego poziomu (Delphi, C++, Visual Basic i innych).

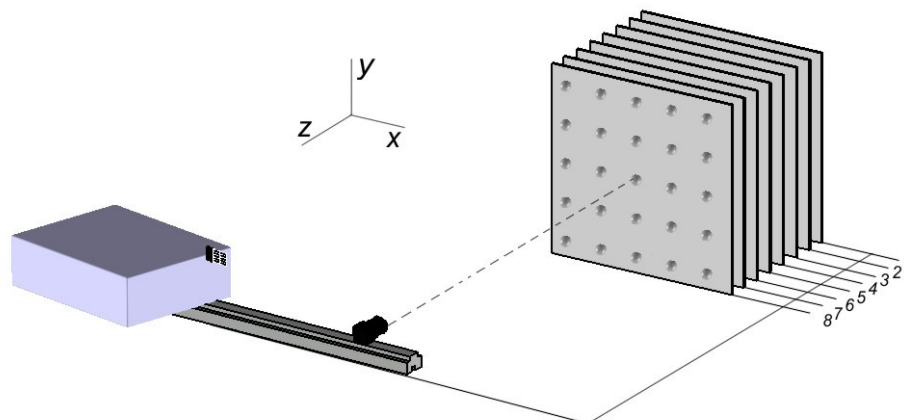


```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<CalibrationModel>
  <sphericalMarkers>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>0.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>0.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>-0.010</RealXCoord>0.000
      <RealYCoord>-0.026</RealYCoord>0.000
      <RealZCoord>-0.013</RealZCoord>0.000
    </sphericalMarker>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>0.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>90.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>-0.466</RealXCoord>0.413
      <RealYCoord>90.397</RealYCoord>91.096
      <RealZCoord>-0.026</RealZCoord>0.358
    </sphericalMarker>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>0.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>180.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>-0.186</RealXCoord>0.144
      <RealYCoord>179.236</RealYCoord>179.889
      <RealZCoord>-0.019</RealZCoord>-0.054
    </sphericalMarker>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>0.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>270.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>-0.451</RealXCoord>-0.0756
      <RealYCoord>270.001</RealYCoord>268.752
      <RealZCoord>0.009</RealZCoord>-0.028
    </sphericalMarker>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>0.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>360.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>-0.636</RealXCoord>0.394
      <RealYCoord>359.454</RealYCoord>359.219
      <RealZCoord>-0.012</RealZCoord>0.000
    </sphericalMarker>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>90.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>0.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>89.587</RealXCoord>
      <RealYCoord>0.093</RealYCoord>
      <RealZCoord>-0.207</RealZCoord>
    </sphericalMarker>
    <sphericalMarker>
      <TheoreticalXCoord>90.0</TheoreticalXCoord>
      <TheoreticalYCoord>90.0</TheoreticalYCoord>
      <RealXCoord>89.857</RealXCoord>
      <RealYCoord>90.499</RealYCoord>
      <RealZCoord>-0.221</RealZCoord>
    </sphericalMarker>
  </sphericalMarkers>
</CalibrationModel>
```

Rys.10.1. Fragment wygenerowanego pliku w formacie XML

Tak powstałe dane służą w dalszej kolejności jako parametry macierzy kalibracji systemu optycznego.

Podczas procesu kalibracyjnego systemu optycznego ustawienia projektora i kamery należy dobrać tak, aby ich pola widzenia obejmowały zakładaną objętość pomiarową, następnie model płaszczyzny jest mierzony przez skaner optyczny, w ośmiu położeniach oddalonych od siebie o 50 [mm] wypełniając całą objętość pomiarową, wzdłuż osi do niego prostopadłej.



*Rys.10.2. Proces kalibracji systemu optycznego*

Proces jest przeprowadzany raz i wyniki są aktualne dopóki nie nastąpią zmiany w ustawieniach geometrycznych lub optycznych skanera. W dalszej kolejności model może posłużyć do wyznaczenia macierzy transformacji z optycznego układu współrzędnych do WMP.

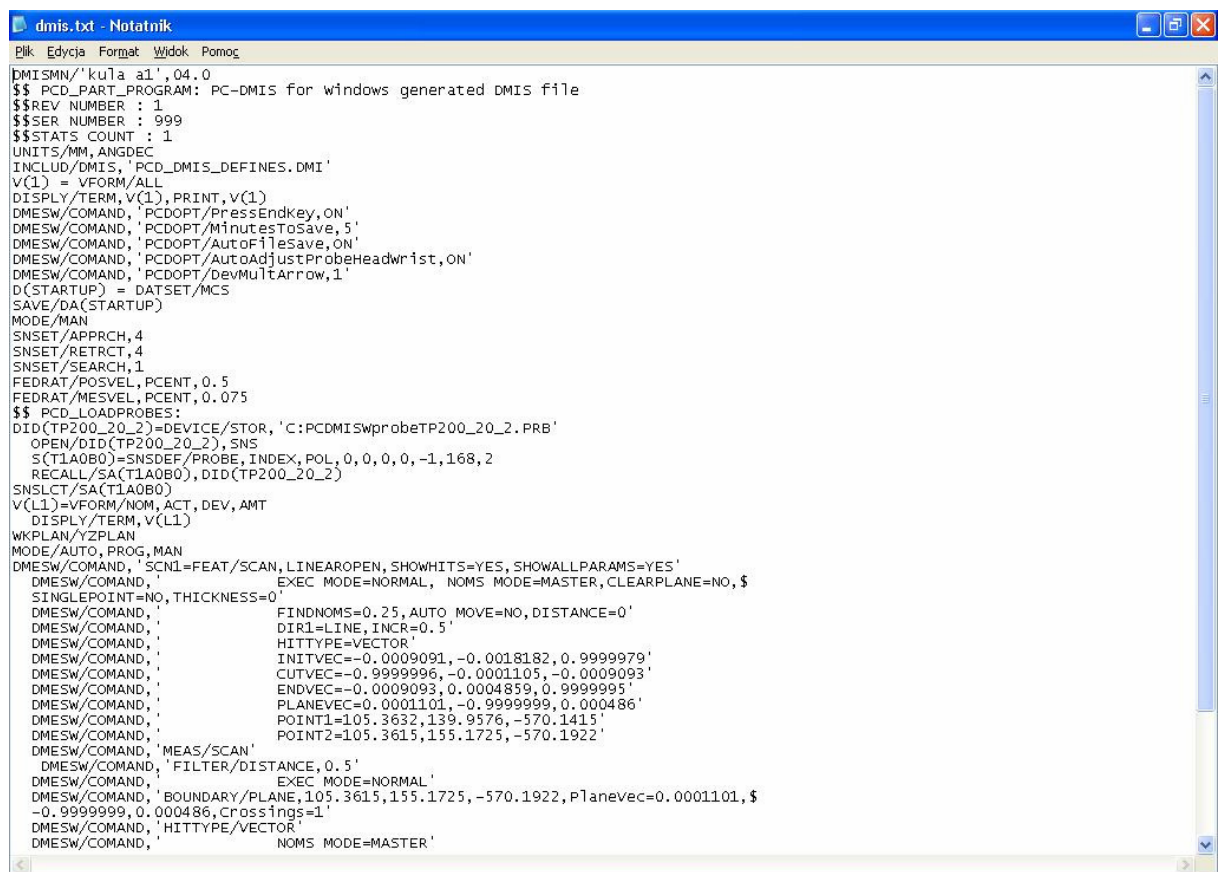
W początkowej fazie badań skaner optyczny był zamocowany niezależnie od stołu maszyny współrzędnościowej na którym dokonywano przesunięć i pomiaru elementów wzorca, jednakże ciężar wzorca powodował ugięcie stołu rzędu 0.01 [mm] w stosunku do poprzedniej pozycji. Powodowało to nachylenie wzorca względem nieruchomo stojącego skanera. Dawało to błędną kalibrację. Dlatego też żeby wyeliminować ten błąd również skaner został zamocowany do stołu WMP.

Kalibracja systemu optycznego może być przeprowadzona zarówno z zastosowaniem WMP z przesuwным stołem jak i ruchomym portalem. W pierwszym przypadku do przesunięć wzorca korzysta się z bardzo dokładnego ruchomego stołu. W celu zorientowania płaszczyzny wzorca względem skanera należy pomierzyć stykowo trzy kule bazowe w globalnym układzie maszyny w pierwszym położeniu. Da to również możliwość stworzenia macierzy transformacji z przestrzennych współrzędnych skanera optycznego do przestrzennych współrzędnych WMP.

Jeżeli dysponujemy maszyną z ruchomym portalem (nieruchomy stół) należy pomierzyć stykowo trzy kule bazowe, w każdym położeniu, aby określić dokładny przesuw. Program korzysta zarówno z wygenerowanego wcześniej pliku z danymi nominalnymi wzorca optycznego jak i położenia trzech kul bazowych.

## 10.2. Integracja skanera z oprogramowaniem metrologicznym

W przeprowadzonych badaniach wstępnych sprawdzono sposób transformacji optycznych punktów pomiarowych w formacie \*.xyz do programu PC - DMIS. Metoda ta opisana w [63] była nieefektywna. Otrzymano tylko reprezentację graficzną chmury punktów, wydzielanie z niej punktów opisujących cechy geometryczne poprzez klikanie kursorem na punkty było żmudne i nie dawało oczekiwanych rezultatów. Dlatego poszukiwano nowych sposobów. Zdecydowano się na format \*.dms, dzięki któremu w edytorze tekstowym otrzymuje się listę współrzędnych punktów. Ten sposób jednak nie daje możliwości rozpoznania, które punkty należą do poszczególnych cech geometrycznych (nie ma reprezentacji graficznej punktów). Dlatego ostatecznie zdecydowano się na grupowanie chmury punktów w programie skanera optycznego 3D - Mesh, a następnie tak pogrupowane punkty jako cechy w formacie \*.dms exportowano do programu PC - DMIS, gdzie już można bardzo szybko z listy punktów reprezentujących daną cechę utworzyć elementy zastępcze.

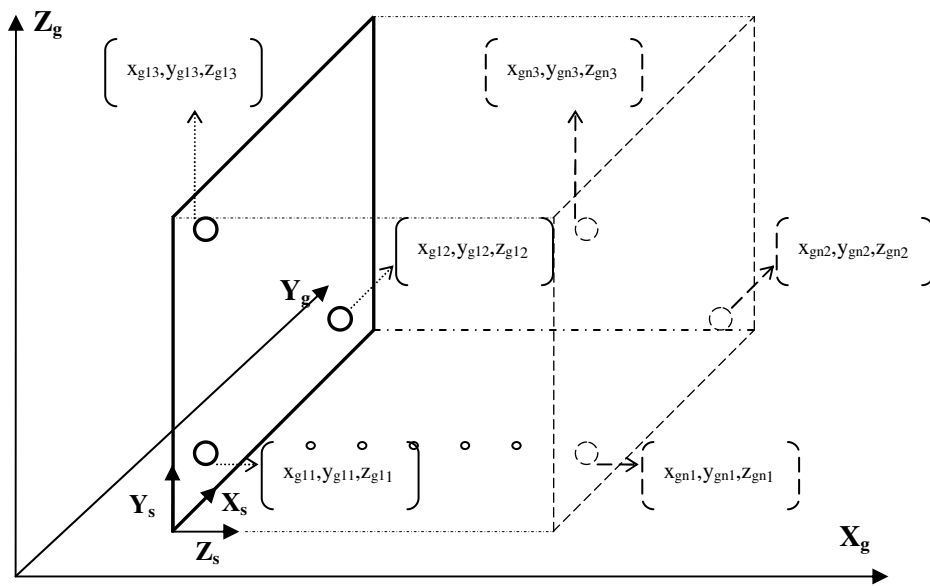


```
dmis.txt - Notatnik
Plik Edycja Format Widok Pomoc
DMISMN/'kuła a1',04,0
$$ PCD_PART_PROGRAM: PC-DMIS for windows generated DMIS file
$$REV NUMBER : 1
$$SER NUMBER : 999
$$STATS COUNT : 1
UNITS/MM,ANGDEC
INCLUD/DMIS,'PCD_DMIS_DEFINES.DMI'
V(1) = VFORM/ALL
DISPLY/TERM,V(1),PRINT,V(1)
DMESW/COMAND,'PCDOPT/PressEndkey,ON'
DMESW/COMAND,'PCDOPT/MinutesToSave,5'
DMESW/COMAND,'PCDOPT/AutoFileSave,ON'
DMESW/COMAND,'PCDOPT/AutoAdjustProbeHeadwrist,ON'
DMESW/COMAND,'PCDOPT/DevMultArrow,1'
D(STARTUP) = DATSET/MCS
SAVE/DA(STARTUP)
MODE/MAN
SNSSET/APPRCH,4
SNSSET/RETRACT,4
SNSSET/SEARCH,1
FEDRAT/POSVEL,PCENT,0.5
FEDRAT/MESVEL,PCENT,0.075
$$ PCD_LOADPROBES:
DID(TP200_20_2)=DEVICE/STOR,'C:PCDMISwprobeTP200_20_2.PRB'
OPEN/DID(TP200_20_2),SNS
S(T1A0B0)=SNSDEF/PROBE,INDEX,POL,0,0,0,0,-1,168,2
RECALL/SA(T1A0B0),DID(TP200_20_2)
SNSLCT/SA(T1A0B0)
V(L1)=VFORM/NOM,ACT,DEV,AMT
DISPLY/TERM,V(L1)
WKPLAN/YZPLAN
MODE/AUTO,PROG,MAN
DMESW/COMAND,'SCN1=FEAT/SCAN,LINEROPEN,SHOWHITS=YES,SHOWALLPARAMS=YES'
DMESW/COMAND,' EXEC MODE=NORMAL,NOMS MODE=MASTER,CLEARPLANE=NO,$
SINGLEPOINT=NO,THICKNESS=0'
DMESW/COMAND,' FINDNOMS=0.25,AUTO MOVE=NO,DISTANCE=0'
DMESW/COMAND,' DIR1=LINE,INCR=0.5'
DMESW/COMAND,' HITTYPE=VECTOR'
DMESW/COMAND,' INITVEC=-0.0009091,-0.0018182,0.9999979'
DMESW/COMAND,' CUTVEC=-0.9999998,-0.0001105,-0.0009093'
DMESW/COMAND,' ENDVEC=-0.0009093,0.0004859,0.9999995'
DMESW/COMAND,' PLANEVEC=0.0001101,-0.9999999,0.000486'
DMESW/COMAND,' POINT1=105.3632,139.9576,-570.1415'
DMESW/COMAND,' POINT2=105.3615,155.1725,-570.1922'
DMESW/COMAND,' MEAS/SCAN'
DMESW/COMAND,' FILTER/DISTANCE,0.5'
DMESW/COMAND,' EXEC MODE=NORMAL'
DMESW/COMAND,' BOUNDARY/PLANE,105.3615,155.1725,-570.1922,PlaneVec=0.0001101,$
-0.9999999,0.000486,Crossings=1'
DMESW/COMAND,' HITTYPE=VECTOR'
DMESW/COMAND,' NOMS MODE=MASTER'
```

Rys.10.3. Struktura pliku DMS

### 10.3. Uzgodnienie układów współrzędnych WMP oraz systemu optycznego

Pierwszy etap polega na dopasowaniu układów współrzędnych. Do tego celu może posłużyć dowolny wzorzec składający się z trzech kul. Wzorzec mierzy się zarówno skanerem optycznym jak i maszyną współrzędnościową, a środek jednej z kul wyznacza początek układu współrzędnych dla obu systemów. W ten sposób oba systemy pracują w tym samym „globalnym” układzie współrzędnych. Najlepsze dopasowanie uzyskuje się jednakże jeżeli integracja układów następuje już na poziomie kalibracji systemu optycznego, gdzie bazuje się na współrzędnych środków trzech kul wyznaczonych metoda stykową co obrazuje rysunek 10.4.



Rys. 10.4. Dopasowanie układów współrzędnych maszyny ( $X_g, Y_g, Z_g$ ) i skanera ( $X_s, Y_s, Z_s$ ) – wyznaczenie wspólnego obszaru pomiarowego na etapie kalibracji

Poniższy wzór ujmuje przekształcenie jakiemu należy poddać współrzędne punktów optycznych:

$$\begin{bmatrix} x_{s11} & x_{s12} & x_{s13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{snl} & x_{snl} & x_{snl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_{s11} & y_{s12} & y_{s13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{snl} & y_{snl} & y_{snl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{s11} & z_{s12} & z_{s13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ z_{snl} & z_{snl} & z_{snl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{g11} & y_{g12} & y_{g13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ y_{gnl} & y_{gnl} & y_{gnl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{g11} & z_{g12} & z_{g13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ z_{gnl} & z_{gnl} & z_{gnl} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{g11} & x_{g12} & x_{g13} \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ x_{gnl} & x_{gnl} & x_{gnl} \end{bmatrix}$$

gdzie:

$x_s, y_s, z_s$  – współrzędne punktów optycznych,

$x_g, y_g, z_g$  – współrzędne punktów WMP

W dalszej kolejności można budować lokalne układy współrzędne związane z obiektami, opierając się na danych pomiaru stykowego. Dostępne są dwie opcje, w pierwszej z nich generuje się plik \*.txt zawierający sześć punktów wyznaczonych poprzez pomiar elementów bazujących obiektu na maszynie współrzędnościowej. Trzy pierwsze punkty służą do wyznaczenia przestrzennego kierunku głównego, dwa następne definiują kierunek pomocniczy jako wektor prostopadły do kierunku głównego, trzeci punkt określa początek układu. Następnie plik ten jest wczytywany do programu Mesh 3D, gdzie z punktów tych tworzony jest układ lokalny i wszystkie dane z pomiaru skanerem są przeliczane do nowego układu i przesyłane do programu PC – DMIS w celu dalszej analizy.

W drugiej opcji mierzy się elementy bazowe maszyną współrzędnościową i cały obiekt skanerem, a następnie wczytuje się wszystkie punkty optyczne do programu PC – DMIS. Program ten na podstawie elementów bazowych zmierzonych stykowo tworzy układ lokalny na obiekcie.

Dane pomiarowe skanera przelicza się do nowego układu zgodnie z zależnością:

$$\vec{W}_{wmp} = R \cdot \vec{W}_s + \vec{T} \quad (10.1)$$

gdzie:

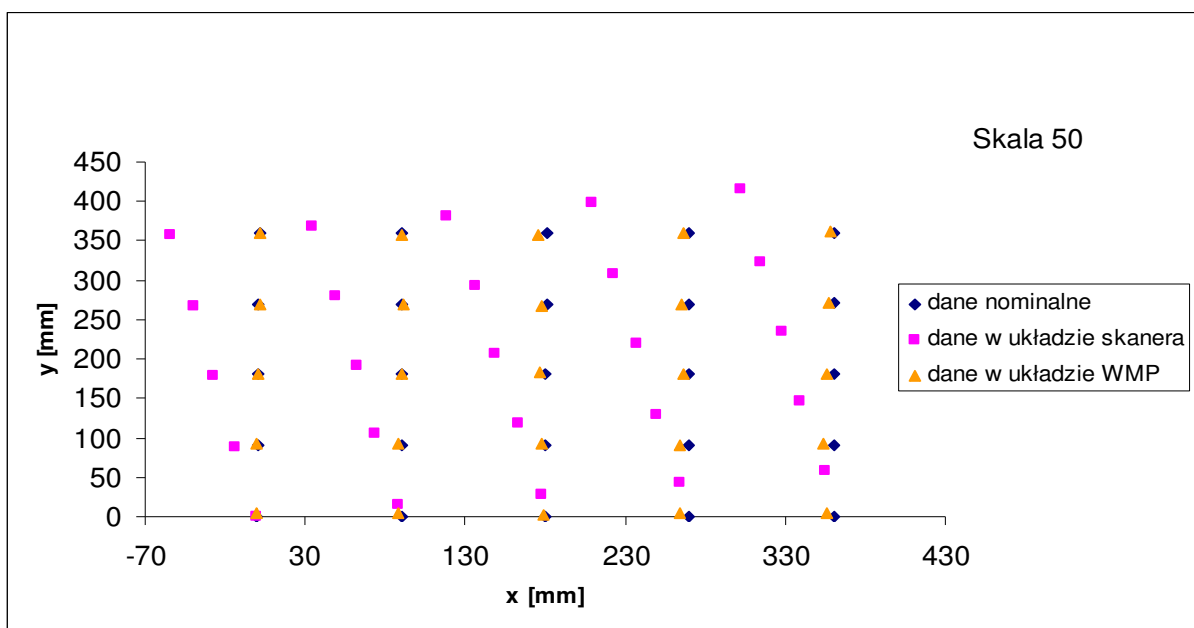
$\vec{W}_{wmp}$  - współrzędne punktu w lokalnym układzie maszyny współrzędnościowej,

$R$  – macierz rotacji,

$\vec{W}_s$  - współrzędne punktu w układzie skanera,

$\vec{T}$  - wektor translacji.

Wykres 10.1 obrazuje wpływ budowy układu współrzędnych na wyniki pomiaru (w celu lepszego zobrazowania wyników zastosowano mnożnik odchyłek 50). Jak widać błędy pomiaru położenia środków kul są znacznie mniejsze dla układu lokalnego zbudowanego w oparciu o pomiary WMP, natomiast dla układu zbudowanego z danych pomiarowych skanera narastają wraz z odległością od początku układu współrzędnych w osi  $Y$ . Miało to swoje przełożenie na wyniki pomiaru długości co ukazuje rozdział 12.1.



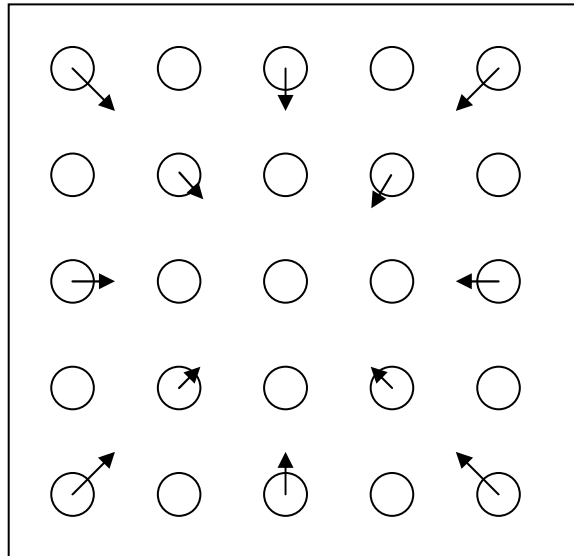
Wykres.10.1 Położenie środków kul w odniesieniu do różnych układów

#### 10.4. Korekcja dokładności pomiarowej systemu

Na etapie przetwarzania obrazów wzorca z kalibracji powstaje problem dokładnego wyznaczenia relacji pomiędzy współzrzednymi kamery (i,j) i rzeczywistymi współzrzednymi (x,y,z) otrzymanymi na podstawie pomiarów wzorca przez Współzrzednościową Maszynę Pomiarową. Jest to kluczowy etap ponieważ od niego zależy końcowa niepewność pomiaru systemu optycznego.

Przyjęte rozwiązanie zakłada zastosowanie elementów geometrycznie łatwych do pomiaru (kul rozmieszczonych na powierzchni wzorca). Na podstawie pomiaru współzrzednych środków kul przez WMP i ich środków z obrazów pobranych przez kamerę systemu optycznego, wyznaczana jest relacja pomiędzy współzrzednymi kamery, a rzeczywistymi.

Powłoka chromowa zastosowana na kulach nie była na tyle matowa (częściowo rozpraszająca, a częściowo refleksyjna), aby uniknąć błędu wyznaczenia środków kul we współzrzednych obrazu. Rozkład tego błędu ustalony eksperymentalnie przedstawia się następująco:



Rys.10.5. Rozkład błędu wyznaczenia środków kul

Jak widzimy wartości zwiększają się promieniowo od centrum wzorca. Wynika to głównie z rozproszenia i odbicia światła od powierzchni wzorca. Jest ono nierównomierne dla znaczników na krawędzi, w przeciwieństwie do środka wzorca, gdzie z każdej strony znacznik jest oświetlony równomiernie. Wskutek czego powstaje duży błąd systematyczny związany z błędem wyznaczenia środka znaczników w układzie detektora.

Sposób korekcji tego błędu został autorsko opracowany przez dr inż. Roberta Sitnika, jako jeden z elementów projektu badawczego nr 3 T10C 010 29. Polega on na wyznaczeniu położenia środkowego i najdalszego znacznika (kuli). Każda współrzędna  $(i,j)$  znacznika jest modyfikowana o wektor wynikający z kierunku pomiędzy aktualnym, a środkowym znacznikiem. Długość wektora modyfikacji jest ustalana na podstawie stosunku odległości aktualnego znacznika od środkowego do odległości pomiędzy środkowym, a najdalszym znacznikiem.

Dostępne są różne współczynniki korekcji, które wybiera się doświadczalnie na drodze porównywania uzyskanych wyników po korekcji z wartościami nominalnymi. Jeśli wartość korekcji jest poprawna to układ prawidłowo działania (oczywiście w zakresie dopuszczalnego błędu). Jeśli nie to wyniki po korekcji mogą być gorsze niż bez korekcji.

## 11. Budowa modelu niepewności systemu hybrydowego

Jak już wcześniej wspomniano aby skaner mógł mieć zastosowanie do zadań pomiarów geometrycznych powinien być sprawdzany tak jak inne urządzenia do realizacji pomiarów współrzędnościowych, dlatego też powinien być wzorcowany i sprawdzany w oparciu o procedury kontrolnego pomiaru długości (tj. norma ISO 10360-2 [N2] i zalecenia VDI/VDE 2617 [N7]). Zgodnie z nimi porównuje się wymiary wzorca (długości) z wynikiem pomiaru wskazanym przez sprawdzane urządzenie i uzyskuje w wyniku pomiaru błąd (wskazania) urządzenia mierzącego [59]. Dużą ich zaletą jest bezpośrednia informacja odnośnie dokładności realizowanego pomiaru i łatwość odniesienia w stosunku do wzorca metra.

**Ustalenie dokładności pomiarów metodą hybrydową (optyczno-stykową) realizowane będzie w oparciu o zestaw elementów wzorcowych, których charakterystyki metrologiczne zostaną podane w oparciu o pomiary na referencyjnej WMP PMM12106 firmy Leitz o podwyższonej dokładności. Dzięki temu będzie można zapewnić spójność pomiaru poprzez powiązanie z systemem krajowych i międzynarodowych wzorców długości.**

Rysunek 11.1. przedstawia model niepewności systemu hybrydowego. Jego górna część pokazuje główne składowe niepewności systemu optycznego związane z jego kalibracją, strategią pomiaru, wpływem wzorca i otoczenia. Z przeprowadzonych badań wstępnych wynika, że niepewność skanera kształtuje się na poziomie 0.15 [mm]. Zastępując stary wzorzec kalibracyjny nowym i zastępując stolik liniowy (używany do przesuwania wzorca w procesie kalibracji) stołem przesuwным WMP oraz budując układ współrzędnych metodą stykową zmniejsza się trzy znaczące składowe niepewności skanera, dzięki czemu jest możliwe uzyskanie niepewności o rząd wielkości mniejszej.

Rysunek 11.2. prezentuje autorsko opracowany rozbudowany model niepewności systemu hybrydowego dla pomiaru porównawczego. Uwzględniono w nim najistotniejsze składowe niepewności wchodzące w skład głównych składowych niepewności systemu hybrydowego.

W skład niepewności związanej z  *pomiarem* hybrydowym wchodzi: składowa niepewności wyznaczenia układu współrzędnych  $u(\delta_{ukl})$ , a w tym niepewność związana ze zmienną strategią budowy układu współrzędnych  $u(str)$  oraz niepewność użytej maszyny do budowy układu współrzędnych  $u(WMP)$  (przy wyznaczeniu której uwzględnia się wpływ niepewności kalibracji wzorca długości  $u(K_w)$ , niepewności pomiaru wzorca  $u(P_w)$ , niepewności związanej z pomiarem stykowym  $u(E_g)$  oraz niepewności temperaturowej  $u(T_w)$ ). Składową niepewności



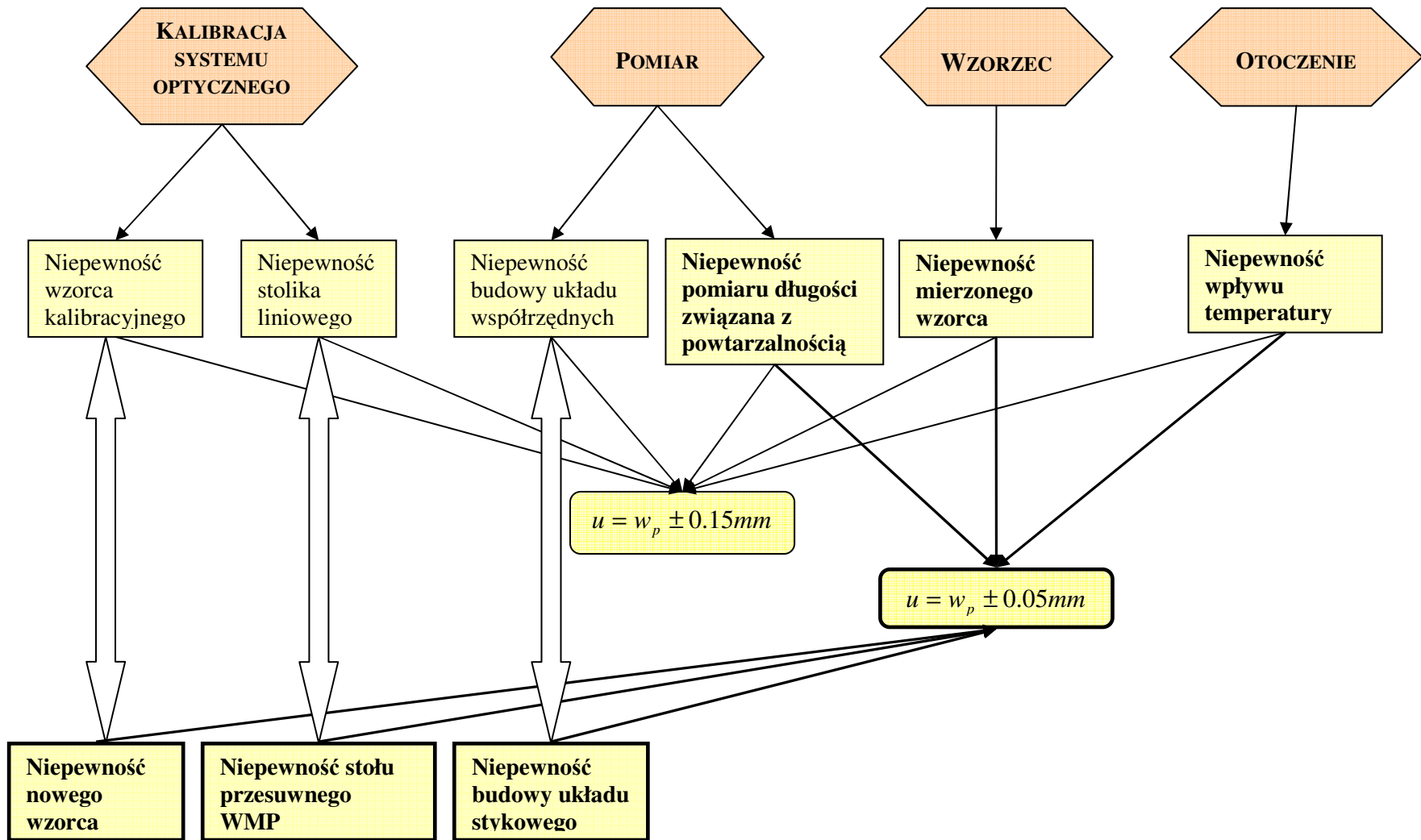
związanej z  *pomiarem* hybrydowym jest również niepewność pochodząca od powtarzania pomiaru przy pomiarze długości  $u(\delta_{rep})$ .

W skład niepewności związanej z  *wpływem wzorca* czyli niepewności kalibracji wzorca  $u(\delta_w)$  wchodzi: niepewność maszyny referencyjnej służącej do kalibracji wzorców  $u(PMM)$ , niepewność pochodząca od powtarzalności pomiaru wzorca przez WMP  $u(P_w)$  oraz niepewność zastosowanej powłoki antyrefleksyjnej na wzorcu  $u(P_{aref})$ .

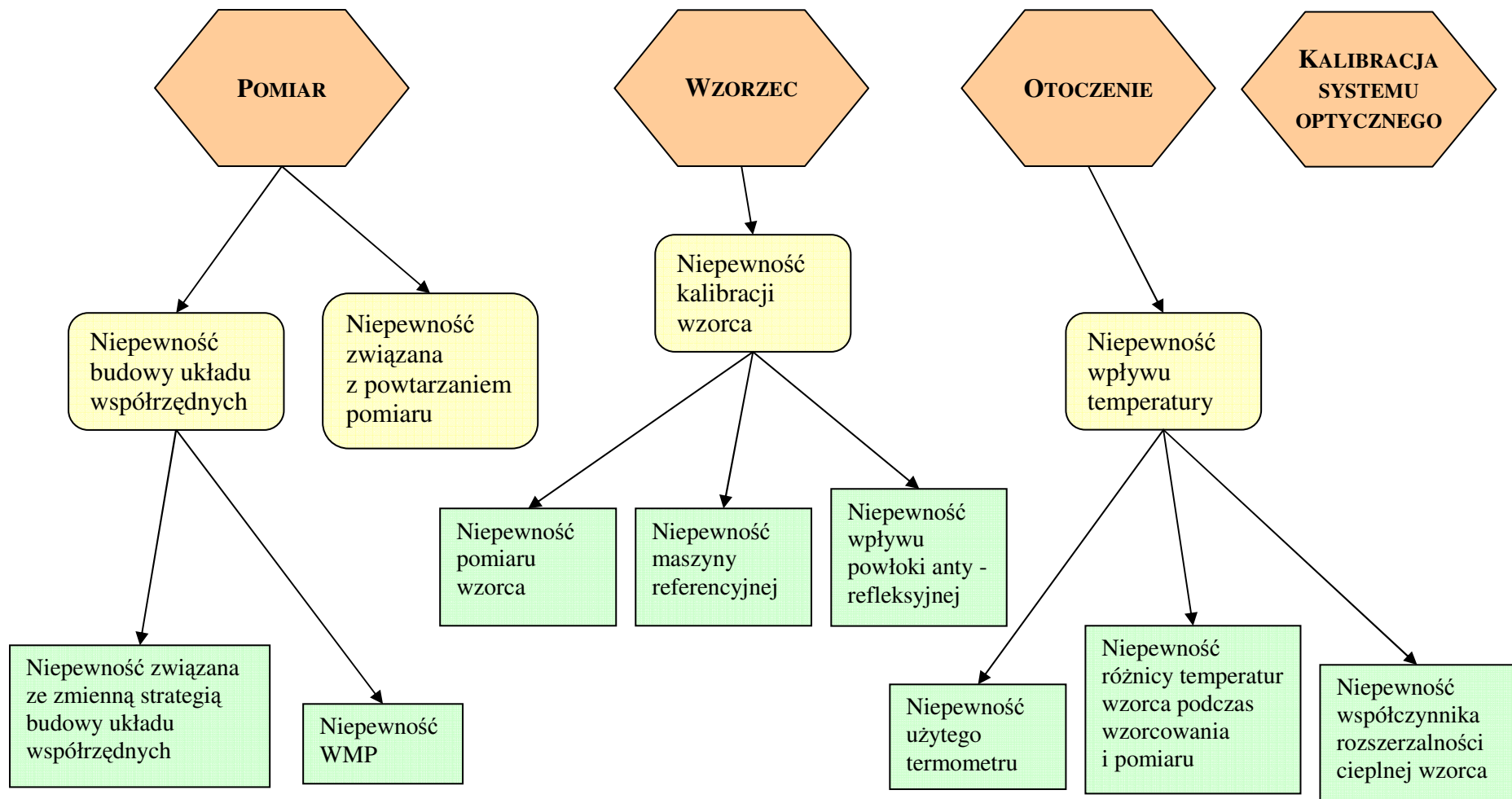
Składowe niepewności związanej z  *wpływem temperatury*  $u(\delta_{temp})$  zależą od tego czy używamy tych samych czy różnych termometrów do określenia temperatury podczas wzorcowania i pomiaru. W zależności od tego przyjmujemy odpowiedni wariant składowych opisanych w podpunkcie 11.2.4.

Na niepewność  *kalibracji systemu optycznego*  $u(\delta_{kal})$ , której model został przedstawiony na rysunku 11.3 składają się niepewność kalibracji opracowanego wzorca płytowego  $u(\delta_{wp})$ , niepewność wpływu temperatury na wzorec  $u(T_{kal})$ , jak również w przypadku zastosowania do kalibracji stołu przesuwne WMP jego niepewność  $u(P_x)$  (niepewność tę wyznacza się przy uwzględnieniu tych samych składowych co przy wyznaczeniu niepewności WMP).

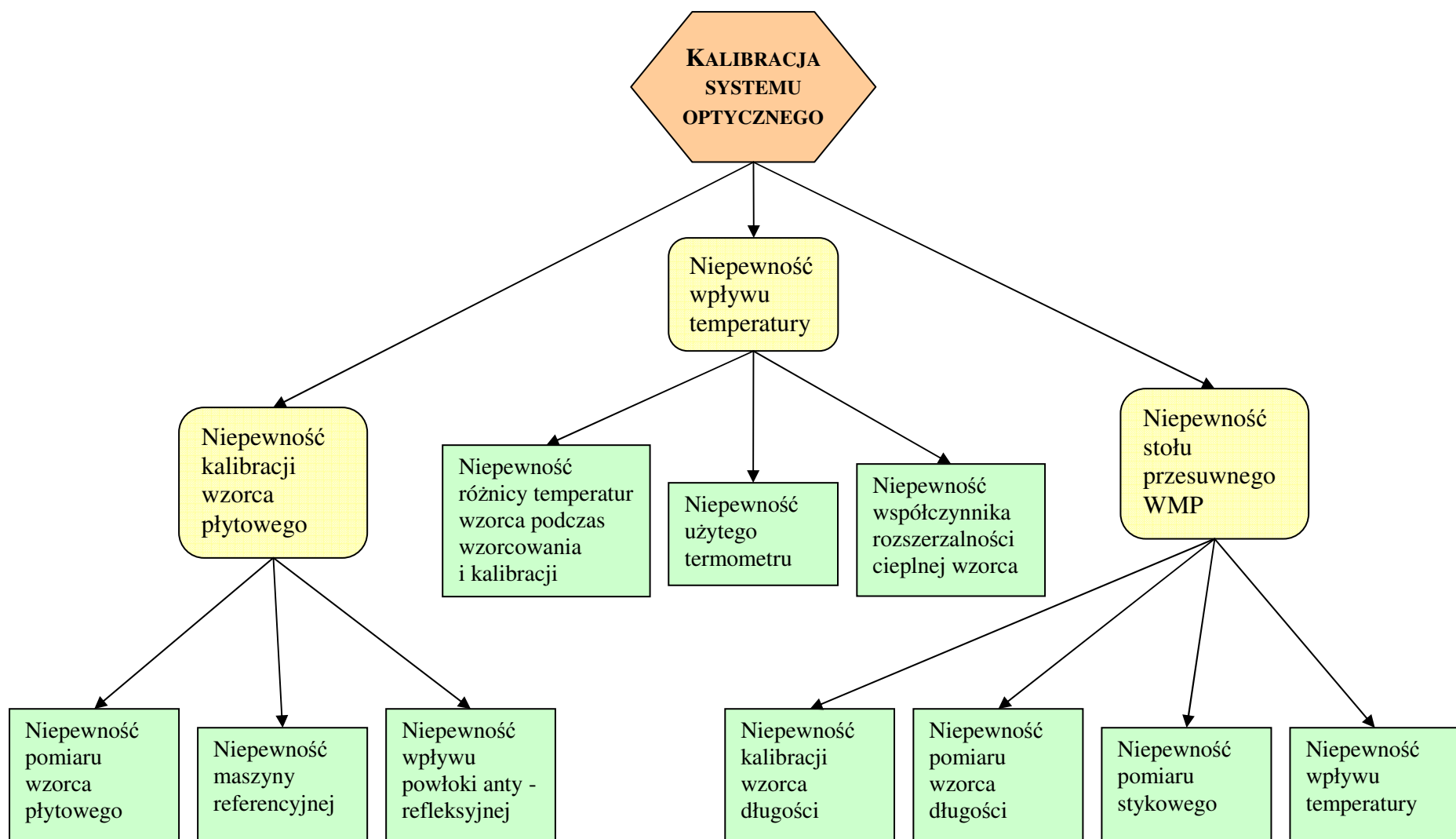
W dalszej części rozdziału opisany został sposób wyznaczenia poszczególnych składowych niepewności przy zastosowaniu obu metod wyznaczania niepewności A i B opisanych w punkcie 5.1.



Rys.11.1. Model niepewności systemu hybrydowego



Rys.11.2. Rozbudowany model niepewności systemu hybrydowego



Rys.11.3 Model niepewności kalibracji sytemu optycznego

## 11.1. Równanie niepewności

Jak już wspomiano sprawdzamy dokładność systemu hybrydowego porównując wyniki pomiarów systemem hybrydowym przedmiotu testowego (wzorca), z wynikami pomiarów tego samego przedmiotu dokładniejszym narzędziem, jakim jest referencyjna maszyna współrzędnościowa. Błąd wskazania  $E$  systemu hybrydowego podajemy w postaci:

$$E = l_{zm} - l_w = (l_{sh} + \delta_{rep} + \delta_{ukl} + \delta_{temp} + \delta_{kal}) - (l_n + \delta_w) \quad (11.1)$$

gdzie:

$l_{zm}$  - długość zmierzona podana przez system hybrydowy,

$l_w$  - długość wzorcowa podana przez maszynę referencyjną,

$l_{sh}$  - wynik pomiaru długości systemem hybrydowym,

$\delta_{rep}$  - poprawka na niepewność związaną z powtarzaniem pomiaru przy pomiarze długości,

$\delta_{ukl}$  - poprawka na niepewność wyznaczenia układu współrzędnych,

$\delta_{temp}$  - poprawka temperaturowa,

$\delta_{kal}$  - poprawka na niepewność kalibracji skanera,

$l_n$  - długość nominalna (nieznana wartość prawdziwa wzorca),

$\delta_w$  - poprawka na niepewność kalibracji wzorców.

Stąd równanie niepewności błędu wskazania wynikające z tej zależności przy uwzględnieniu wzoru (5.8) przedstawia się następująco:

$$u^2(E) = \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_{rep}}\right)^2 \cdot u^2(\delta_{rep}) + \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_{ukl}}\right)^2 \cdot u^2(\delta_{ukl}) + \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_{temp}}\right)^2 \cdot u^2(\delta_{temp}) + \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_{kal}}\right)^2 \cdot u^2(\delta_{kal}) + \left(\frac{\partial E}{\partial \delta_w}\right)^2 \cdot u^2(\delta_w) \quad (11.2)$$

Ponieważ pochodne cząstkowe  $\frac{\partial E}{\partial \delta_{rep}}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial \delta_{ukl}}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial \delta_{temp}}$ ,  $\frac{\partial E}{\partial \delta_{kal}}$  są równe 1, a pochodna  $\frac{\partial E}{\partial \delta_w}$

jest równa -1, to złożona niepewność standardowa błędu wskazania systemu hybrydowego dana jest przez wzór:

$$u^2(E) = u^2(\delta_{rep}) + u^2(\delta_{ukl}) + u^2(\delta_{temp}) + u^2(\delta_{kal}) + u^2(\delta_w) \quad (11.3)$$

Ostatecznie, niepewność błędu wskazania systemu hybrydowego będzie wyznaczona ze wzoru:

$$U(E) = k \cdot \sqrt{u^2(\delta_{rep}) + u^2(\delta_{ukl}) + u^2(\delta_{temp}) + u^2(\delta_{kal}) + u^2(\delta_w)} \quad (11.4)$$

gdzie:

$k$  – przyjęty współczynnik rozszerzenia.

## 11.2. Analiza składowych niepewności

### 11.2.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru $u(\delta_{rep})$ (przy pomiarze długości)

Przyjęto, że niepewność  $u(\delta_{rep})$  będzie liczona metodą typu A poprzez wielokrotny pomiar wzorca długości w różnych ustawieniach i wyrażona w formie:

$$u(\delta_{rep}) = \frac{1}{\sqrt{n_1}} \sqrt{\frac{1}{n_2} * \sum_{j=1}^{n_2} ({}^j u_{rep})^2} \quad (11.5)$$

$${}^j u_{rep} = \sqrt{\frac{1}{n_1 - 1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} \left[ {}^{ij} L_{zm} - \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} ({}^{ij} L_{zm}) \right]^2} \quad (11.6)$$

gdzie:

${}^j u_{rep}$  - odchylenie standardowa dla  $j$ -tej orientacji,

${}^{ij} L_{zm}$ - wartość wyniku pomiaru w  $i$ -tym cyklu dla  $j$ -tej orientacji,

$n_1$ - liczba cykli,  $n_2$ - liczba orientacji,

$i$  - indeks cyklu,  $j$ - indeks orientacji.

### 11.2.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych $u(\delta_{ukl})$

Na niepewność wyznaczenia układu współrzędnych mają wpływ: *niepewność użytej maszyny współrzędnościowej  $u(WMP)$*  oraz *niepewność związana ze zmienną strategią budowy układu  $u(str)$* . Korzystając z prawa propagacji niepewności [5.8] powyższe niepewności składamy we wzór:

$$u(\delta_{ukl}) = \sqrt{u^2(WMP) + u^2(str)} \quad (11.7)$$

### *Niepewność maszyny współrzędnościowej $u(WMP)$*

Równanie niepewności dla maszyn współrzędnościowych jest podawane przez producentów najczęściej w formie wzoru:

$$u = A + k \cdot L \quad (11.8)$$

gdzie:

$A$  - stała opisująca udział błędów przypadkowych,

$k$  - współczynnik opisujący charakter zmian błędów systematycznych,

$L$  - mierzona długość w [mm].

Równanie to wyznacza się poprzez pomiar odchyłki mierzonej długości i poszerza o niepewność kalibracji wzorca długości  $u(K_w)$ , niepewność pomiaru wzorca  $u(P_w)$ , niepewność związaną z pomiarem stykowym  $u(E_g)$  oraz niepewność temperaturową  $u(T_w)$ .

Niepewność kalibracji wzorca długości  $u(K_w)$  jest określana w certyfikacie kalibracyjnym, a niepewność pomiaru długości wzorca  $u(E_L)$  wyznacza się ze wzoru (5.2).

### Niepewność związana z pomiarem stykowym $u(E_g)$

Niepewność tę szacuje się na podstawie normy ISO/TS 23165 [N6] poprzez analizę wyników pomiaru wzorca kuli wg. strategii opisanej w ISO 10360-2 [N2]. Kulę o średnicy nominalnej nie mniejszej niż 10 [mm] i nie większej niż 50 [mm] należy zmierzyć w 25 punktach w przybliżeniu równomiernie rozmieszczonych na obszarze przynajmniej połowy kuli badawczej. Zaleca się następujący ich rozkład (patrz rys.11.4.) Mając dane z 25 pomiarów należy obliczyć metodą najmniejszych kwadratów wg. Gaussa element skojarzony, którym jest sfera. Następnie oblicza się błąd głowicy pomiarowej  $E_g$ , który stanowi zakres zmienności 25 obliczonych metodą Gaussa długości promieni,  $R_{\max} - R_{\min}$ . Niepewność pomiaru stykowego opisuje wzór:

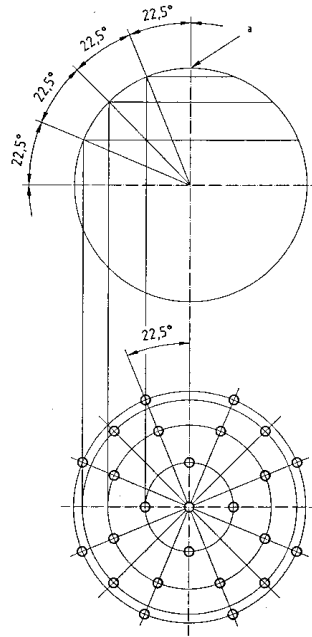
$$u(E_g) = E_g + \sqrt{\left(\frac{F}{2}\right)^2 + u^2(F)} \quad (11.9)$$

gdzie:

$E_g$  – błąd głowicy pomiarowej,

$F$  – błąd kształtu wzorca kulistego podany w certyfikacie kalibracyjnym,

$u(F)$  – niepewność standardowa błędu kształtu wzorca podana w certyfikacie kalibracyjnym.



Rys.11.4. Rozmieszczenie punktów pomiarowych

Niepewność temperaturowa dla pomiaru przedmiotu (wzorca)  $u(T_w)$ .

Do wyliczenia tej niepewności korzystamy z zamodelowanej funkcji:

$$\delta_{temp} = f(\Delta T_w, \alpha_w) = L \cdot (T_w - T_o) \cdot \alpha_w = L \cdot \Delta T_w \cdot \alpha_w \quad (11.10)$$

Stąd niepewność wynikająca z wpływu zmian termicznych dla pomiaru wzorca będzie mieć postać:

$$u(T_w) = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial \Delta T_w}\right)^2 \cdot u^2(\Delta T_w) + \left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial \alpha_w}\right)^2 \cdot u^2(\alpha_w)} \quad (11.11)$$

$$u(T_w) = L \cdot \sqrt{\alpha_w^2 \cdot u^2(\Delta T_w) + \Delta T_w^2 \cdot u^2(\alpha_w)} \quad (11.12)$$

gdzie:

$L$  – mierzona długość,

$T_w$  – temperatura wzorca podczas pomiaru,

$T_o$  – temperatura odniesienia,

$\Delta T_w$  – odchylenie temperatury wzorca od temperatury otoczenia,

$\alpha_w$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej wzorca.



Niepewności  $u(\Delta T_w)$  oblicza się korzystając ze wzoru:

$$u(\Delta T_w) = \frac{\Delta T_{w\max}}{\sqrt{2}} \quad (11.13)$$

gdzie:

$\Delta T_{w\max}$  - maksymalne odchylenia temperatury wzorca od temperatury otoczenia podczas pomiaru, traktowane jako amplituda w przybliżeniu cyklicznych zmian temperatury w czasie, tworzących rozkład antymodalny V [8].

Przyjmując rozkład równomierny dla odchyłek wartości współczynników rozszerzalności cieplnej niepewności  $u(\alpha_w)$  wyliczamy z zależności:

$$u(\alpha_w) = \frac{a_{aw}}{\sqrt{3}} \quad (11.14)$$

gdzie:

$a_{aw}$  – graniczna odchyłka wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej.

#### ***Niepewność związana ze zmienną strategią budowy układu $u(str)$***

Na niepewność  $u(str)$  mają wpływ różne strategie budowy układu (pomiar różnych cech), a przez to odchyłki kształtu i chropowatość mierzonego przedmiotu. Dlatego też określamy tę niepewność poprzez zastosowanie kilku strategii wyznaczania układu współrzędnych z zastosowaniem różnego rozmieszczenia punktów pomiarowych oraz sprawdzaniu położenia danej cechy geometrycznej (patrz Tabela 11.1).

*Tabela 11.1. Indywidualne rezultaty  $y^i_j$  w przypadku czterech strategii i pięciu cykli pomiarowych*

	<b>strategia 1</b>	<b>strategia 2</b>	<b>strategia 3</b>	<b>strategia 4</b>
pomiar 1	<i>rozmieszczenie1</i> $^{11}_y$	<i>rozmieszczenie6</i> $^{12}_y$	<i>rozmieszczenie11</i> $^{13}_y$	<i>rozmieszczenie16</i> $^{14}_y$
pomiar 2	<i>rozmieszczenie2</i> $^{21}_y$	<i>rozmieszczenie7</i> $^{22}_y$	<i>rozmieszczenie12</i> $^{23}_y$	<i>rozmieszczenie17</i> $^{24}_y$
pomiar 3	<i>rozmieszczenie3</i> $^{31}_y$	<i>rozmieszczenie8</i> $^{32}_y$	<i>rozmieszczenie13</i> $^{33}_y$	<i>rozmieszczenie18</i> $^{34}_y$
pomiar 4	<i>rozmieszczenie4</i> $^{41}_y$	<i>rozmieszczenie9</i> $^{42}_y$	<i>rozmieszczenie14</i> $^{43}_y$	<i>rozmieszczenie19</i> $^{44}_y$
pomiar 5	<i>rozmieszczenie5</i> $^{51}_y$	<i>rozmieszczenie10</i> $^{52}_y$	<i>rozmieszczenie15</i> $^{53}_y$	<i>rozmieszczenie20</i> $^{54}_y$
<b>Odchylenie standardowe</b>	$^1_s$	$^2_s$	$^3_s$	$^4_s$

Niepewność standardowa położenia wybranej cechy dla pojedynczej strategii jest dana przez wzór:

$${}^jS(str) = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n \left( {}^i_j y - \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n {}^i_j y \right)^2} \quad (11.15)$$

Końcowym wyrażeniem określającym niepewność  $u(ukl)$  jest pierwiastek kwadratowy ze średniej z  $k$  wariancji eksperymentalnych pojedynczych strategii przy  $n$  powtórzeniach.

$$u(str) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot k} \cdot \sum_{j=1}^k ({}^jS(str))^2} \quad (11.16)$$

gdzie:

${}^jS$ - odchylenie standardowa dla  $j$ -tej strategii budowy układu,

${}^i_j y$ - wartość wyniku pomiaru w  $i$ -tym cyklu dla  $j$ -tej strategii,

$n$ - liczba powtórzeń,  $k$ - liczba strategii,

$i$  - indeks cyklu,  $j$ - indeks strategii.

### 11.2.3. Niepewność wzorcowania wzorców kalibracyjnych $u(\delta_w)$

Wartość niepewności wzorców będzie złożona z *niepewności maszyny referencyjnej służącej do kalibracji wzorców  $u(PMM)$ , niepewności pomiaru wzorców  $u(P_w)$  oraz niepewności spowodowanej pokryciem wzorców powłoką anty-refleksyjną  $u(P_{aref})$  podczas pomiaru optycznego. Niepewności spowodowana wpływem temperatury na wzorce podczas wzorcowania  $u(T_{ww})$  zostanie uwzględniona z osobna w punkcie (11.2.4).*

Ostatecznie więc:

$$u(\delta_{wz}) = \sqrt{u^2(P_w) + u^2(PMM) + u^2(P_{aref})} \quad (11.17)$$

#### ***Niepewność maszyny referencyjnej $u(PMM)$***

Niepewność ta jest liczona analogicznie jak w punkcie 11.2.2.

#### ***Niepewność pomiaru wzorców $u(P_w)$***

Niepewność pomiaru wzorców  $u(P_w)$  będzie liczona metodą typu A poprzez wielokrotny pomiar wzorca w różnych ustawieniach i wyrażona w formie:

$$u(P_w) = \sqrt{u_{rep}^2 + u_{geo}^2} \quad (11.18)$$

gdzie:

$$u_{rep} = \frac{1}{\sqrt{n_1}} \sqrt{\frac{1}{n_2} \cdot \sum_{j=1}^{n_2} ({}^j S)^2} \quad (11.19)$$

$${}^j S = \sqrt{\frac{1}{(n_1 - 1)} \sum_{i=1}^{n_1} \left( {}^{ij} y - \frac{1}{n_1} \cdot \sum_{i=1}^{n_1} {}^{ij} y \right)^2}$$

$$u_{geo} = \frac{1}{\sqrt{n_2}} \sqrt{\frac{1}{(n_2 - 1)} \cdot \sum_{j=1}^{n_2} ({}^j y - \bar{y})^2 - \frac{u_{rep}^2}{n_1}} \quad (11.20)$$

$$(11.21)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n_1 \cdot n_2} \cdot \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} {}^{ij} y \quad (11.22)$$

$u_{rep}$ - niepewność powtarzalności pomiaru związana z pomiarem tego samego elementu w różnych orientacjach,

$u_{geo}$ - niepewność geometrycznych błędów WMP związana z różnicami jakie uzyskamy w przypadku pomiaru obiektu dla różnych orientacji,

${}^j S$ - odchylenie standardowa dla j-tej orientacji,

$\bar{y}$  - średnia wartość ze wszystkich pomiarów,

${}^{ij} y$ - wartość wyniku pomiaru w i -tym cyklu dla j-tej orientacji,

$n_1$ - liczba cykli,  $n_2$ - liczba orientacji,

$i$  - indeks cyklu,  $j$ - indeks orientacji,

${}^j y$  - średnia wartość j orientacji.

### **Niepewność wpływu powłoki antyrefleksyjnej $u(P_{aref})$**

Na dokładność pomiaru wpływa znacząco możliwości pochłaniania i odbijania światła przedmiotu. Błąd spowodowany wpływem refleksyjności powierzchni można w znacznym

stopniu zminimalizować stosując odpowiednie materiały matujące – powłoki antyrefleksyjne, które jednakże powodują zwiększenie odchyłki kształtu.

Niepewność wpływu powłoki matującej na wzorzec będzie wyznaczona metodą B z danych producenta.

#### 11.2.4. Niepewność wpływu temperatury $u(\delta_{temp})$

W warunkach przemysłowych rozrzut temperatury może dochodzić do 10 stopni. Zmiana temperatury otoczenia wpływa znacząco zarówno na urządzenie pomiarowe jak i mierzony przedmiot. Rezultatem jest zmienność mierzonej długości w czasie.

W zakresie zmian długości obowiązuje zależność na zmianę długości  $\Delta l$  w funkcji zmiany temperatury  $\Delta T$  [34]:

$$\Delta l = L \cdot \Delta T \cdot \alpha \quad (11.23)$$

gdzie:

$L$  – mierzona długość,

$\Delta T$  – zmiana temperatury,

$\alpha$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej przedmiotu.

Odpowiednio przekształcając wyrażenie tak aby dostosować go do warunków pomiaru porównawczego otrzymujemy wzór na poprawkę temperaturową:

$$\delta_{temp} = f(T_{wp}, T_{ww}, \alpha_w) = L \cdot [(T_{wp} - T_o) \cdot \alpha_w - (T_{ww} - T_o) \cdot \alpha_w] \quad (11.24)$$

gdzie:

$L$  - długość wzorca,

$T_{wp}$  - temperatura wzorca podczas pomiaru,

$T_{ww}$  - temperatura wzorca podczas wzorcowania,

$T_o$  - temperatura odniesienia (zakłada się 20°),

$\alpha_w$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej wzorca.

#### WARIANT 1

Rozpatrujemy przypadek gdy używamy różnych termometrów do określenia temperatury podczas wzorcowania i pomiaru. Niepewność wynikającą z wpływu temperatury przybiera wtedy postać:

$$u(\delta_{temp}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial T_{wp}}\right)^2 \cdot u^2(T_{wp}) + \left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial T_{ww}}\right)^2 \cdot u^2(T_{ww}) + \left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial \alpha_w}\right)^2 \cdot u^2(\alpha_w)} \quad (11.25)$$

gdzie:

$u(T_{wp})$  - niepewność temperatury wzorca podczas pomiaru,

$u(\alpha_w)$  - niepewność współczynnika rozszerzalności cieplnej wzorca,

$u(T_{ww})$  - niepewność temperatury wzorca podczas wzorcowania.

stąd:

$$u(\delta_{temp}) = L \cdot \sqrt{\alpha_w^2 \cdot u^2(T_{wp}) + \alpha_w^2 \cdot u^2(T_{ww}) + (T_{wp} - T_{ww})^2 \cdot u^2(\alpha_w)} \quad (11.26)$$

#### ***Niepewność temperatury wzorca podczas wzorcowania $u(T_{ww})$***

Należy tu rozpatrzyć następujące czynniki składające się na tę niepewność.

#### ***Niepewność odchylenia temperatury wzorca od otoczenia podczas wzorcowania $u(\Delta T_{ww})$***

Cykliczne zmiany temperatury w czasie tworzą rozkład antymodalny o kształcie litery V [8]. Maksymalne odchylenie  $\Delta T_{wwmax}$  traktujemy jako amplitudę w przybliżeniu cyklicznych zmian temperatury. Daje to niepewność standardową w postaci:

$$u(\Delta T_{ww}) = \frac{\Delta T_{wwmax}}{\sqrt{2}} \quad (11.27)$$

gdzie:

$\Delta T_{wwmax}$  -maksymalne odchylenia temperatury wzorca od temperatury otoczenia podczas wzorcowania.

#### ***Niepewność termometru $u(T_{ter})$***

Przyjmuje się niepewność podaną w certyfikacie kalibracyjnym termometru. Podana jest najczęściej w postaci niepewności rozszerzonej  $U$ . Niepewność tę należy przekształcić w niepewność standardową poprzez podzielenie przez współczynnik rozszerzenia  $k$  również podanym w świadectwie. Najczęściej spotykaną wartością dla  $k$  jest 2.

Niepewność ta powinna być tylko rozważana dla maszyny współrzędnościowej z liniową kompensacją temperatury przy odczycie temperatury, innym niezależnym do WMP termometrem. Jeżeli maszyna współrzędnościowa użyta do kalibracji wzorca nie posiada liniowej kompensacji temperatury, lub posiada, ale temperatura jest mierzona czujnikami na wyposażeniu WMP to ta niepewność nie jest uwzględniana i jej wartość przyjmujemy jako zerową. Wynika to z faktu, że wchodzi one w skład niepewności  $u(WMP)$  podanej przez producenta [N6].

#### ***Niepewność spowodowana niejednakowym rozkładem temperatury we wzorcu $u(\Delta T_{ptw})$***

Wyliczana jest ona ze wzoru [N6]:

$$u(\Delta T_{ptw}) = \frac{\Delta T_{ptw}}{\sqrt{3}} \quad (11.28)$$

gdzie:

$\Delta T_{ptw}$  - różnica temperatur w dwóch wybranych punktach wzorca podczas wzorcowania.

Niepewność temperatury wzorca podczas wzorcowania  $u(T_{ww})$  charakteryzuje zależność:

$$u(T_{ww}) = \sqrt{u^2(\Delta T_{ww}) + u^2(T_{1ter}) + u^2(\Delta T_{ptw})} \quad (11.29)$$

### ***Niepewność temperatury wzorca podczas pomiaru $u(T_{wp})$***

Jak poprzednio należy tu rozpatrzyć następujące składowe niepewności.

#### *Niepewność odchylenia temperatury wzorca od otoczenia podczas pomiaru $u(\Delta T_{wp})$*

Korzystamy tu ze wzoru:

$$u(\Delta T_{wp}) = \frac{\Delta T_{wp \max}}{\sqrt{2}} \quad (11.30)$$

gdzie:

$\Delta T_{wp \max}$  - maksymalne odchylenia temperatury wzorca od temperatury otoczenia podczas pomiaru.

#### *Niepewność użytego termometru $u(T_{2ter})$*

Przyjmuje się niepewność podaną w certyfikacie kalibracyjnym termometru. Niepewność tę należy przekształcić w niepewność standardową poprzez podzielenie przez współczynnik rozszerzenia  $k$ .

#### *Niepewność spowodowana niejednakowym rozkładem temperatury we wzorcu $u(\Delta T_{ptp})$*

Wyliczana jest ona ze wzoru [N6]:

$$u(\Delta T_{ptp}) = \frac{\Delta T_{ptp}}{\sqrt{3}} \quad (11.31)$$

gdzie:

$\Delta T_{ptp}$  - jest różnicą temperatur w dwóch wybranych punktach wzorca podczas pomiaru.

Ostatecznie wszystkie powyższe niepewności składamy we wzór:

$$u(T_{wp}) = \sqrt{u^2(\Delta T_{wp}) + u^2(T_{1ter}) + u^2(\Delta T_{ptp})} \quad (11.32)$$

### ***Niepewność współczynnika rozszerzalności cieplnej wzorca $u(\alpha_w)$***

Dla odchyłek wartości współczynników rozszerzalności cieplnej przyjmuje się rozkład prostokątny o granicach  $\pm a_{\alpha_w}$ . Wobec tego:

$$u(\alpha_w) = \frac{a_{\alpha_w}}{\sqrt{3}} \quad (11.33)$$

#### WARIANT 2

Rozpatrujemy przypadek, gdy używamy tych samych termometrów do określenia temperatury podczas wzorcowania i pomiaru.

Jak podaje [8] korelacja pomiędzy dwoma wielkościami wejściowymi może wystąpić jeżeli do ich wyznaczenia zastosowano ten sam przyrząd pomiarowy. Jeżeli ten sam czujnik jest używany do określenia temperatury podczas wzorcowania i pomiaru, to wielkości  $T_{wp}$  i  $T_{ww}$  są skorelowane. Jeśli jednak różnicę temperatur wzorca podczas pomiaru i wzorca podczas kalibracji przedstawi się jako  $\Delta T_w$ , a tym samym równanie (11.24) przekształci się do postaci:

$$\delta_{temp} = f(\Delta T_w, \alpha_w) = L \cdot \Delta T_w \cdot \alpha_w \quad (11.34)$$

to uniknie się korelacji. Ponadto można wprowadzić wspólny czynnik jako dodatkową niezależną wielkość wejściową. W naszym przypadku będzie to poprawka na wskazanie termometru  $\Delta T_{ter}$ . Ostatecznie, więc otrzymujemy wzór:

$$\delta_{temp} = f(\Delta T_w, \alpha_w, \delta_{ter}) = L \cdot \Delta T_w \cdot \alpha_w + L \cdot \Delta T_{ter} \cdot \alpha_w \quad (11.35)$$

Niepewność wynikającą z wpływu temperatury będzie mieć więc postać:

$$u(\delta_{temp}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial \Delta T_w}\right)^2 \cdot u^2(\Delta T_w) + \left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial \alpha_w}\right)^2 \cdot u^2(\alpha_w) + \left(\frac{\partial \delta_{temp}}{\partial \Delta T_{ter}}\right)^2 \cdot u^2(\Delta T_{ter})} \quad (11.36)$$

stąd:

$$u(\delta_{temp}) = L \cdot \sqrt{\alpha_w^2 \cdot u^2(\Delta T_w) + (\Delta T_w + \Delta T_{ter})^2 \cdot u^2(\alpha_w) + \alpha_w^2 \cdot u^2(\Delta T_{ter})} \quad (11.37)$$

### ***Niepewność różnicy temperatur wzorca podczas kalibracji i pomiaru $u(\Delta T_w)$***

Oczekuje się, że przedmiot będzie kalibrowany i mierzony w tej samej temperaturze, jednakże w warunkach przemysłowych jest to trudne do realizacji. Dlatego też różnica temperatur może przyjmować z równym prawdopodobieństwem dowolną wartość z oszacowanego przedziału od  $-a$  [°C] do  $+a$  [°C].



Niepewność standardowa wynosi więc:

$$u(\Delta T_w) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (11.38)$$

#### ***Niepewność użytego termometru $u(T_{ter})$***

Przyjmuje się niepewność podaną w certyfikacie kalibracyjnym termometru. Podana jest najczęściej w postaci niepewności rozszerzonej  $U$ . Niepewność tę należy przekształcić w niepewność standardową poprzez podzielenie przez współczynnik rozszerzenia  $k$  również podany w świadectwie.

#### ***Niepewność współczynnika rozszerzalności cieplnej wzorca $u(\alpha_w)$***

Dla odchyłek wartości współczynników rozszerzalności cieplnej przyjmuje się rozkład prostokątny o granicach  $\pm a_{\alpha_w}$ . Wobec tego:

$$u(\alpha_w) = \frac{a_{\alpha_w}}{\sqrt{3}} \quad (11.39)$$

#### **11.2.5. Niepewność kalibracji systemu optycznego $u(\delta_{kal})$**

Jak wspomniano w punkcie 8.1.2. w procesie kalibracji wzorzec płytowy (zamocowany na stole WMP) jest mierzony przez skaner w kilku równoległych położeniach, wzdłuż osi do niego prostopadłej. Na niepewność  $u(\delta_{kal})$  składają się więc *niepewność wzorcowania wzorca płytowego  $u(\delta_{wp})$ , niepewność wpływu temperatury na wzorzec  $u(T_{kal})$ , jak również w przypadku zastosowania do kalibracji stołu przesuwne WMP niepewność  $u(P_x)$  tego stołu (wersja 1). Dla wersji 2 kalibracji na stole WMP z przesuwym portalem (nieruchomy stół) uwzględniamy niepewności wskazań WMP  $u(WMP)$ .*

*Niepewność związaną z ugięciem stołu  $u(U_s)$  pod wpływem ciężaru wzorca (plus pinoli dla wersji 2), co skutkowało pochyleniem wzorca względem nieruchomo stojącego systemu optycznego, została wyeliminowana poprzez zamontowanie skanera na stole.*

Ostatecznie więc *niepewność poprawki na kalibrację systemu optycznego  $u(\delta_{kal})$  przybiera postać:*

$$u^2(\delta_{kal}) = \sqrt{u^2(\delta_{wp}) + u^2(P_x) + u^2(T_{kal})} \quad (11.40)$$

### **Niepewność wzorcowania wzorca płytowego $u(\delta_{wp})$**

Procedura wyznaczenia tej niepewności została opisana w punkcie 11.2.3.

### **Niepewność temperaturowa dla procesu kalibracji $u(T_{kal})$**

Niepewność ta będzie wyznaczona w oparciu o procedurę zamieszczoną w punkcie 11.2.4.

#### **WARIANT 1**

Rozpatrujemy przypadek gdy używamy różnych termometrów do określenia temperatury wzorca optycznego podczas jego wzorcowania oraz kalibracji systemu optycznego. Niepewność wynikająca z wpływu temperatury przybiera wtedy postać:

$$u(T_{kal}) = L \cdot \sqrt{\alpha_w^2 \cdot u^2(T_{wk}) + \alpha_w^2 \cdot u^2(T_{ww}) + (T_{wk} - T_{ww})^2 \cdot u^2(\alpha_w)} \quad (11.41)$$

gdzie:

$L$  - mierzona długość wzorcowa,

$\alpha_w$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej wzorca,

$u(T_{wk})$  - niepewność temperatury wzorca podczas kalibracji systemu optycznego,

$u(T_{ww})$  - niepewność temperatury wzorca podczas jego wzorcowania,

$T_{wk}$  - temperatura wzorca podczas kalibracji systemu optycznego,

$T_{ww}$  - temperatura wzorca podczas wzorcowania,

$u(\alpha_w)$  - niepewność współczynnika rozszerzalności cieplnej wzorca.

#### **WARIANT 2**

Rozpatrujemy przypadek, gdy używamy tych samych termometrów do określenia temperatury podczas wzorcowania i pomiaru. Korzystamy wtedy z zależności:

$$u(T_{kal}) = L \cdot \sqrt{\alpha_w^2 \cdot u^2(\Delta T_w) + (\Delta T_w + \Delta T_{ter})^2 \cdot u^2(\alpha_w) + \alpha_w^2 \cdot u^2(\Delta T_{ter})} \quad (11.42)$$

gdzie:

$L$  - mierzona długość wzorcowa,

$\alpha_w$  - współczynnik rozszerzalności cieplnej wzorca,

$u(\Delta T_w)$  - niepewność różnicy temperatur wzorca podczas wzorcowania i kalibracji systemu optycznego,

$\Delta T_w$  - różnica temperatur wzorca podczas wzorcowania i kalibracji systemu optycznego,

$\Delta T_{ter}$  - poprawka na wskazanie termometru,

$u(\alpha_w)$  - niepewność współczynnika rozszerzalności cieplnej wzorca,

$u(T_{ter})$  - niepewność użytego termometru.

### ***Niepewność stołu przesuwnego WMP $u(P_x)$***

Niepewność stołu przesuwnego traktujemy jako niepewność pozycji w osi X, którą charakteryzuje zależność:

$$u(P_x) = A_x + k_x * \Delta L \quad (11.43)$$

gdzie:

$A_x$  - wartość stała, określająca udział błędów liniowo niezależnych,

$k_x$  - współczynnik, określający udział błędów liniowo zależnych,

$\Delta L$  - długość odmierzona pomiędzy punktem pomiarowym, a punktem odniesienia.

Równanie to wyznacza się poprzez porównanie danych pomiarowych z danymi nominalnymi wzorca długości i jest modyfikowane o *niepewność kalibracji wzorca długości*  $u(K_w)$ , *niepewność pomiaru wzorca*  $u(P_w)$ , *niepewność pomiaru stykowego*  $u(E_g)$  oraz *niepewność temperaturową*  $u(T_w)$ , które wyznacza się zgodnie z procedurą zamieszczoną w podpunkcie 11.2.2.

## 12. Badania weryfikujące z wykorzystaniem kontrolnego pomiaru długości

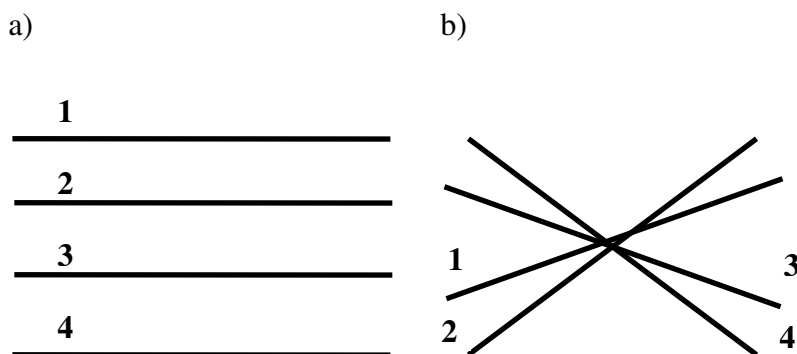
Bazując na wytycznych normy PN-EN ISO 10360-2 [N2] oraz zaleceniach VDI/VDE 2617 [N7] i VDI/VDE 2634-2 [N9] opracowano własne metody wyznaczenia błędu wskazania E oraz MPE, bardziej adekwatne do cech i funkcjonalności skanera.

Błędy te zostały wyznaczone za pomocą wzorców wykalibrowanych na maszynie referencyjnej. Były to: opisany w punkcie (9) wzorzec płytowy, wzorzec hantle (wykonany specjalnie dla tego celu w oparciu o zalecenia VDI/VDE 2634-2 [N9]) oraz wzorzec słupkowy o nieregularnym rozmieszczeniu w jego podprzestrzeni elementów stałych – kul.

Pomiar wzorca w jednym położeniu ogranicza możliwość poznania rozkładu wartości błędów jedynie do podprzestrzeni wzorca, która zawiera się w przestrzeni pomiarowej systemu. W celu zwiększenia zakresu sprawdzanego obszaru, opracowano systemy przestawiania wzorców indywidualnie dla każdego z nich uwzględniając jego geometrię i wymiary.

### 12.1. Wyznaczanie obszaru błędów granicznych (MPE) przy użyciu wzorca płytowego

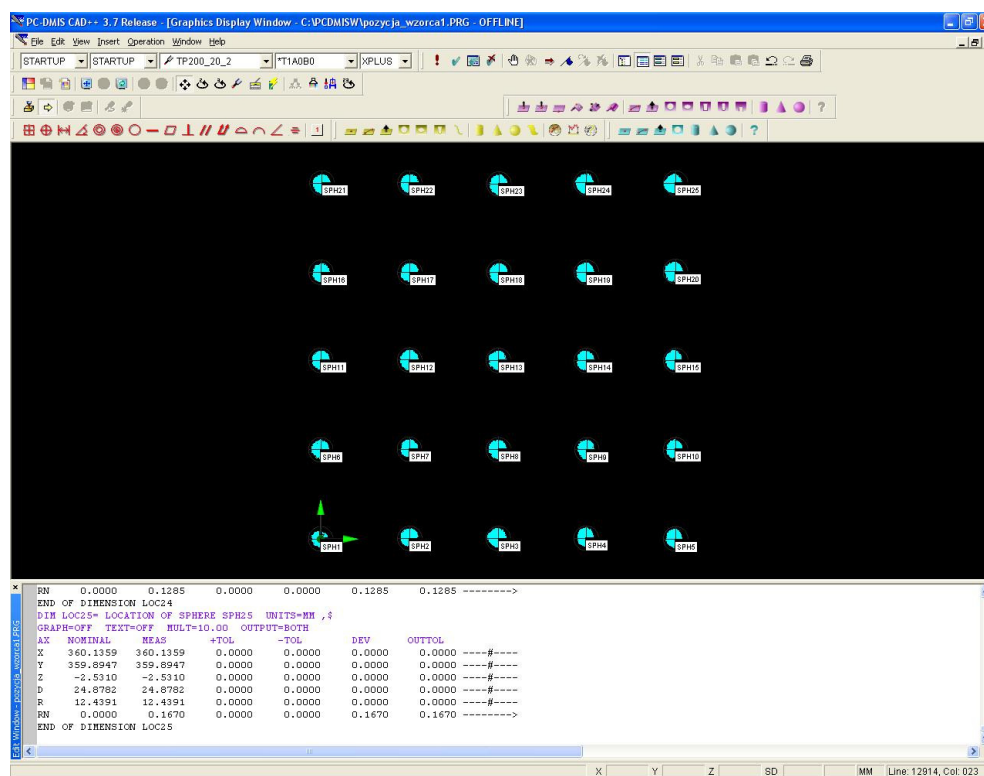
Wzorzec płytowy został pomierzony w ośmiu położeniach po trzy razy. Cztery pierwsze położenia równoległe do siebie i prostopadłe do osi optycznej skanera (patrz rys. 12.1.a) służyły do wyznaczenia równania błędów granicznych systemu w płaszczyźnie XY, pozostałe cztery (patrz rys. 12.1.b) ułożone nierównoległe do wszystkich trzech głównych płaszczyzn przestrzeni pomiarowej posłużyły do wyznaczenia równania błędów granicznych w przestrzeni XYZ.



Rys.12.1. Ustawienia płyty wzorcowej w przestrzeni pomiarowej skanera- widok z góry

Na skutek pomiaru systemem optycznym uzyskano chmurę punktów 3D. Następnie wyodrębniono punkty należące do każdej z kul i w formacie dms przesłano do programu PC - DMIS, gdzie wyznaczono elementy zastępcze (dokonano parametryzacji kul metodą najlepszego dopasowania – patrz rys.12.2) oraz wyznaczono współrzędne środków kul w układzie zbudowanym stykowo na bazie 1, 5 i 21 kuli. Na ich podstawie obliczono następnie 300 odległości między środkami kul. W dalszej kolejności wyznaczono odchyłki od wartości nominalnej uzyskanej z pomiarów dokładniejszym narzędziem jakim była maszyna współrzędnościowa.

Uzyskane wyniki oraz wyznaczone dla nich obszary błędów granicznych przedstawiają wykresy 12.1 - 12.8, gdzie na osi odciętych naniesiona jest wartość wzorcowa mierzonej długości dla której był przeprowadzony pomiar wzorcujący, a na osi rzędnych wartość błędu wskazania E.



Rys.12.2. Wyznaczenie elementów zastępczych w programie PC-DMIS

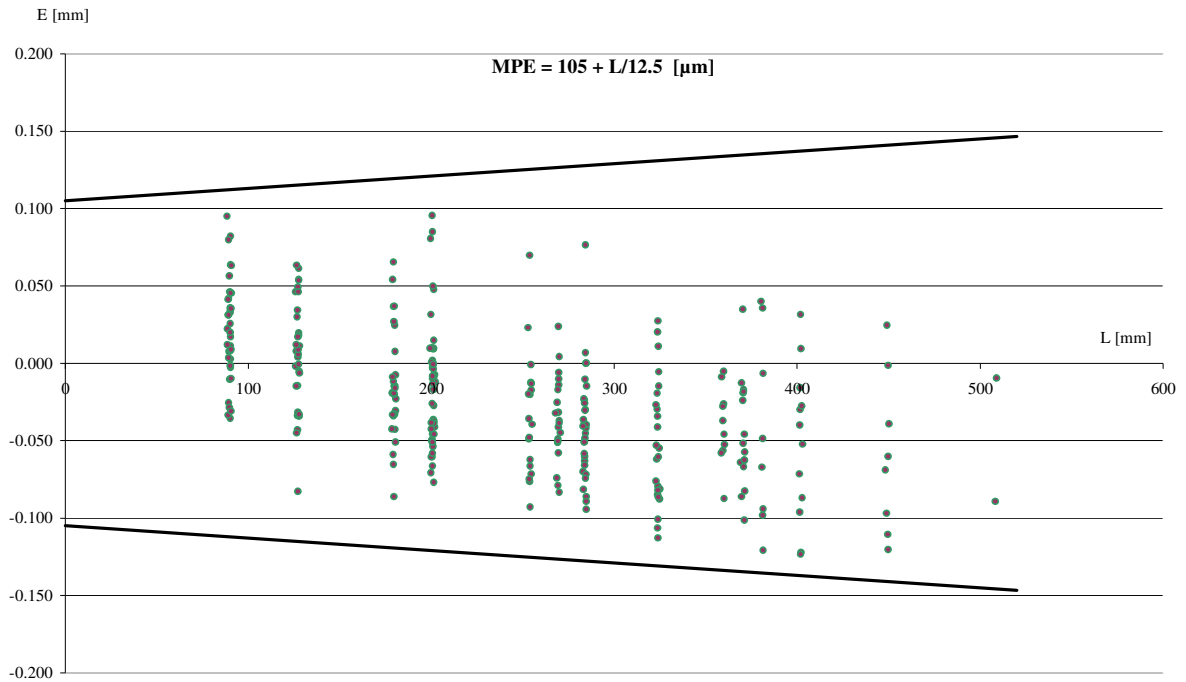
Równanie błędów granicznych MPE systemu hybrydowego przed korekcją jego dokładności, jak wynika z poniższych wykresów, można zapisać w postaci:

Dla przypadku dwuwymiarowego:

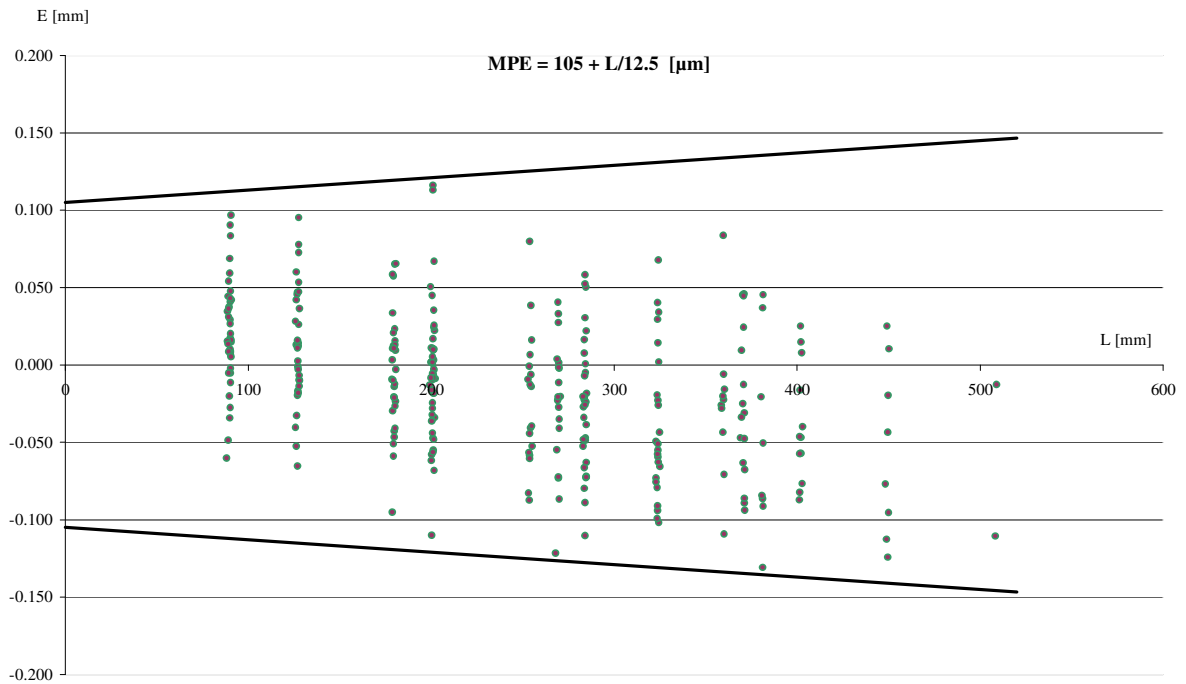
$$MPE = \pm 105 + 0.08 \cdot L [\mu m]$$

Dla przypadku trójwymiarowego:

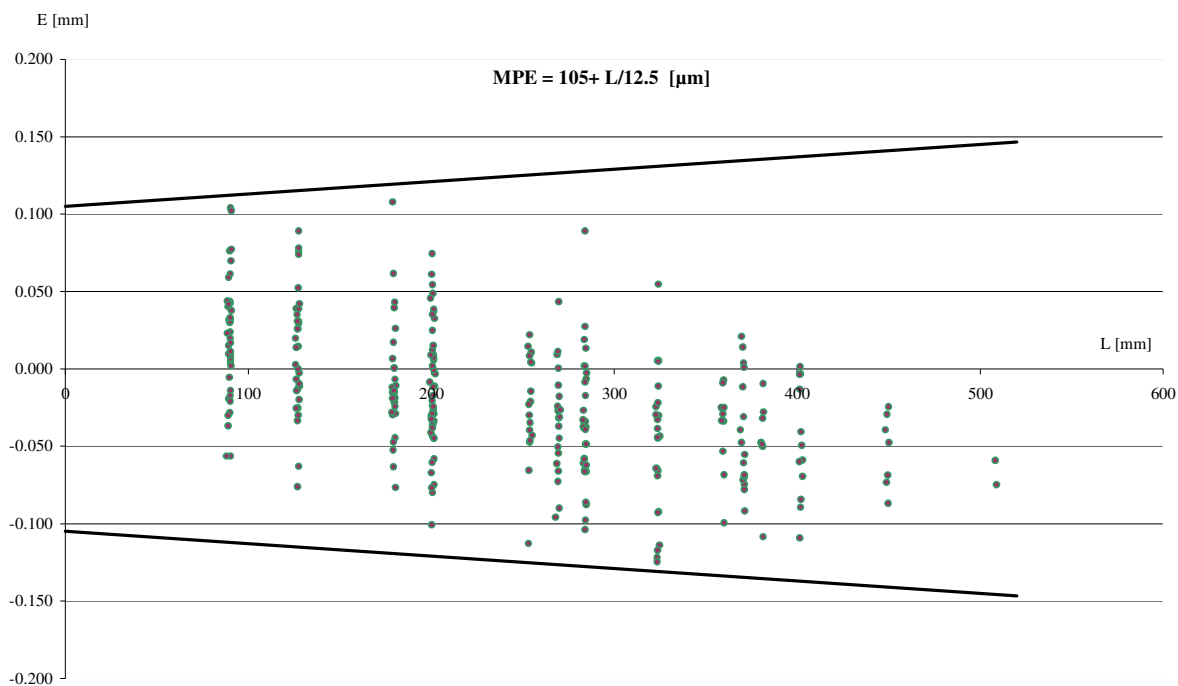
$$MPE = \pm 105 + 0.23 \cdot L [\mu m]$$



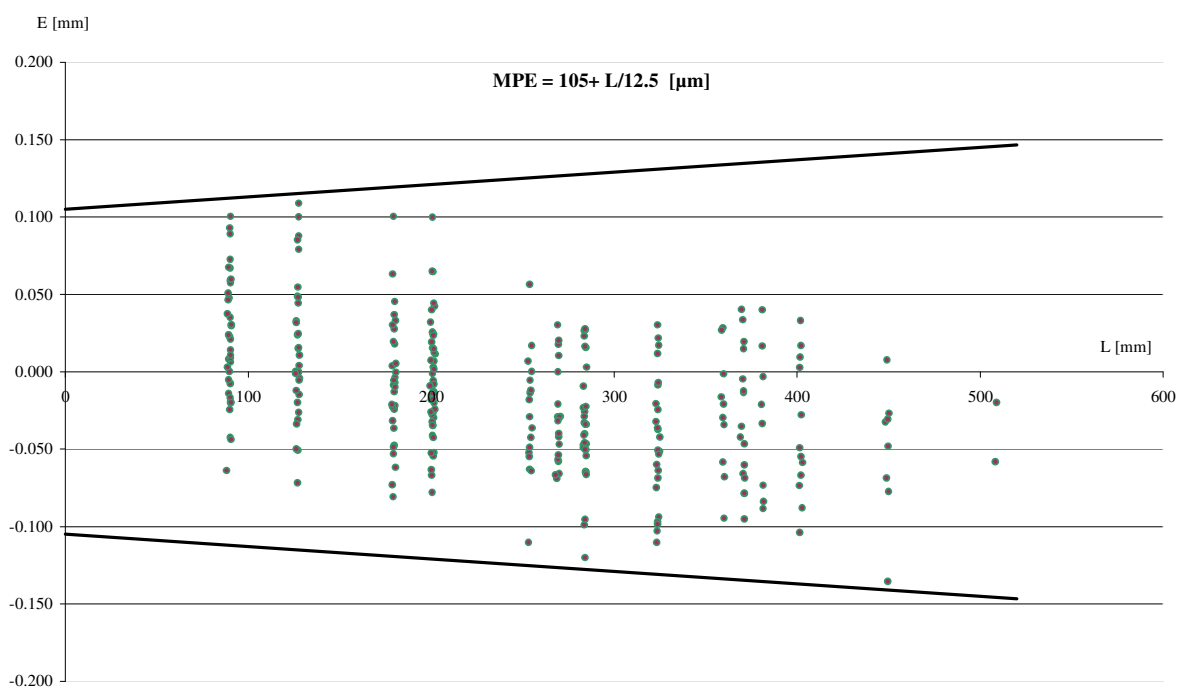
Wykres 12.1. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XY 1



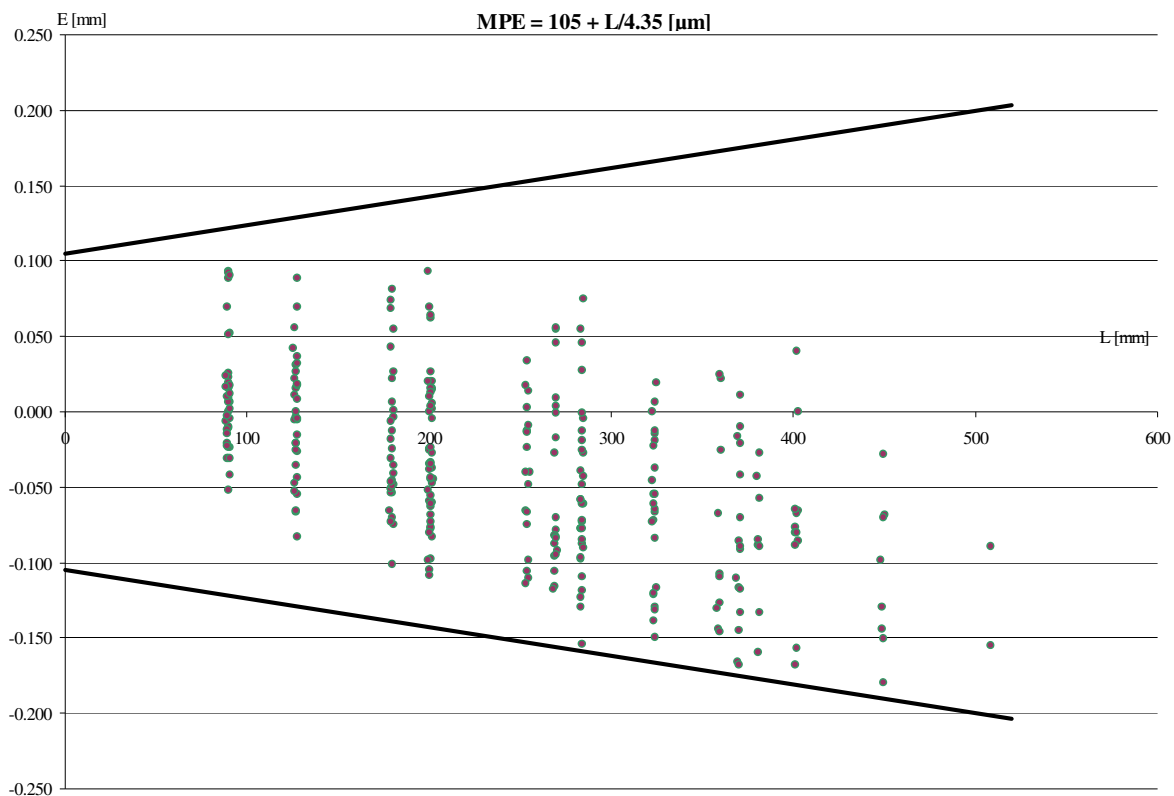
Wykres 12.2. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XY 2



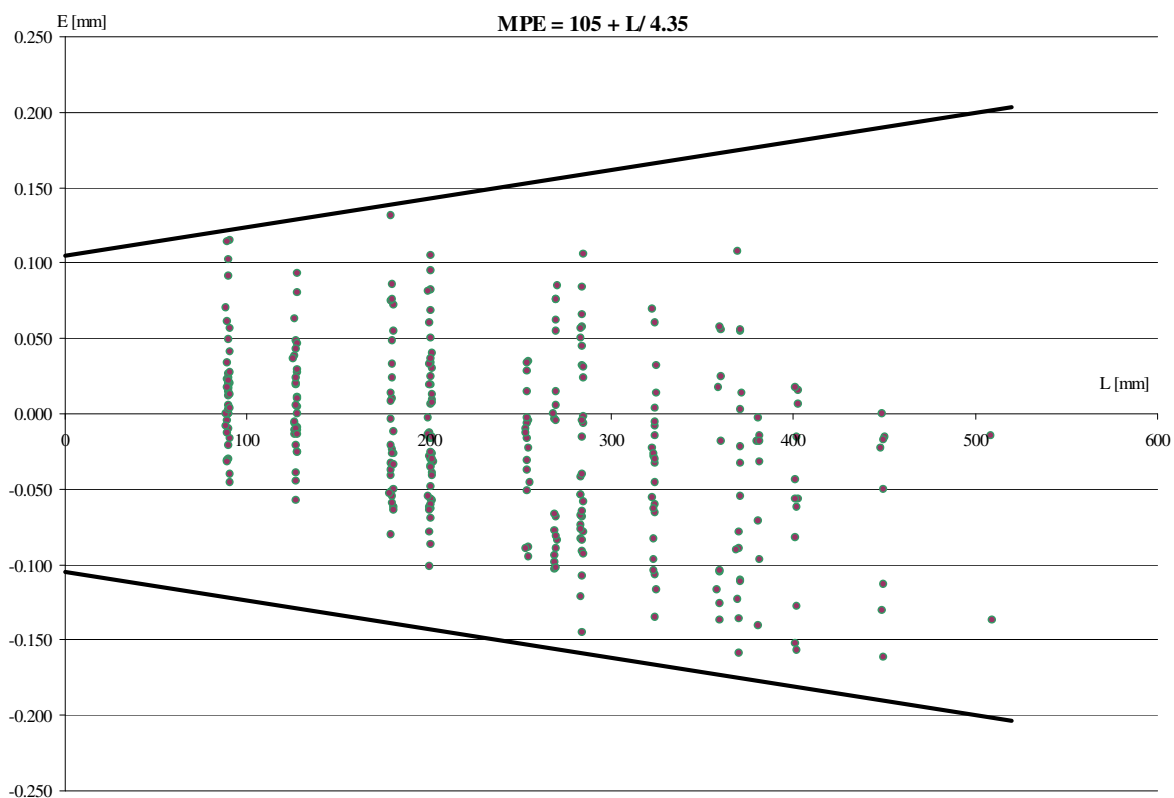
Wykres 12.3. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XY 3



Wykres 12.4. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XY 4

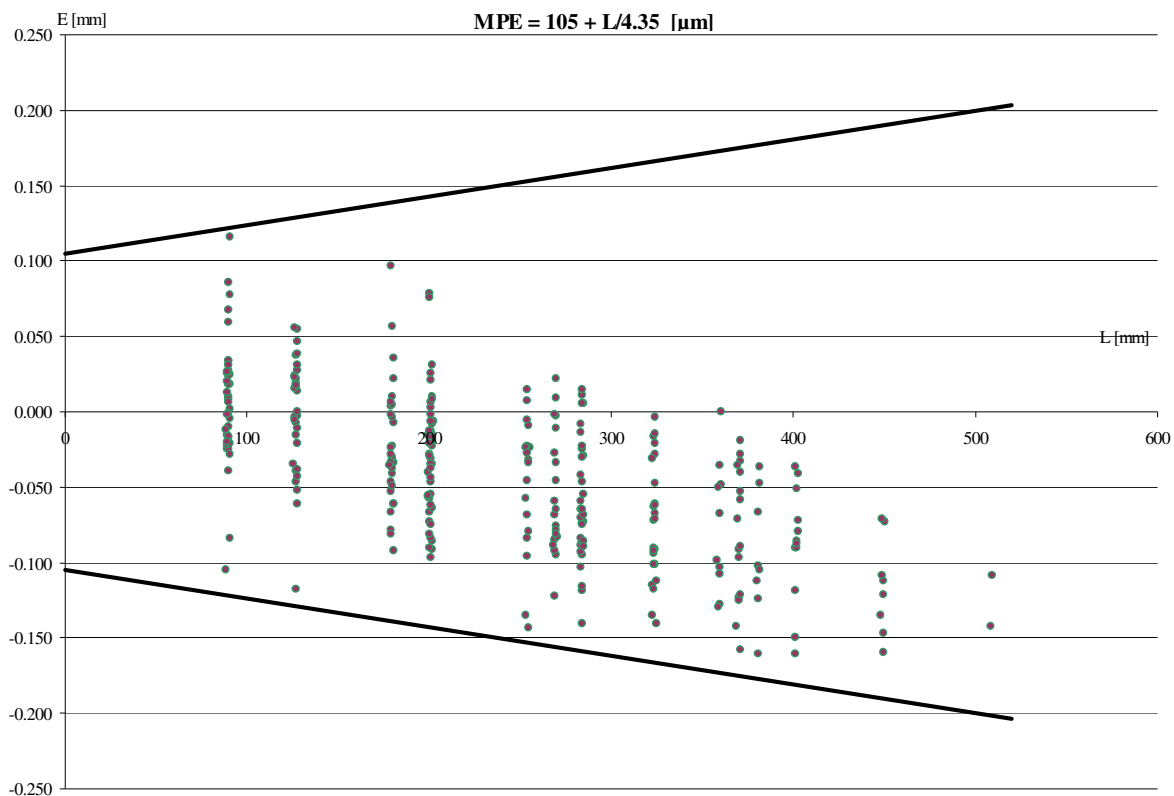


Wykres 12.5. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XYZ 1

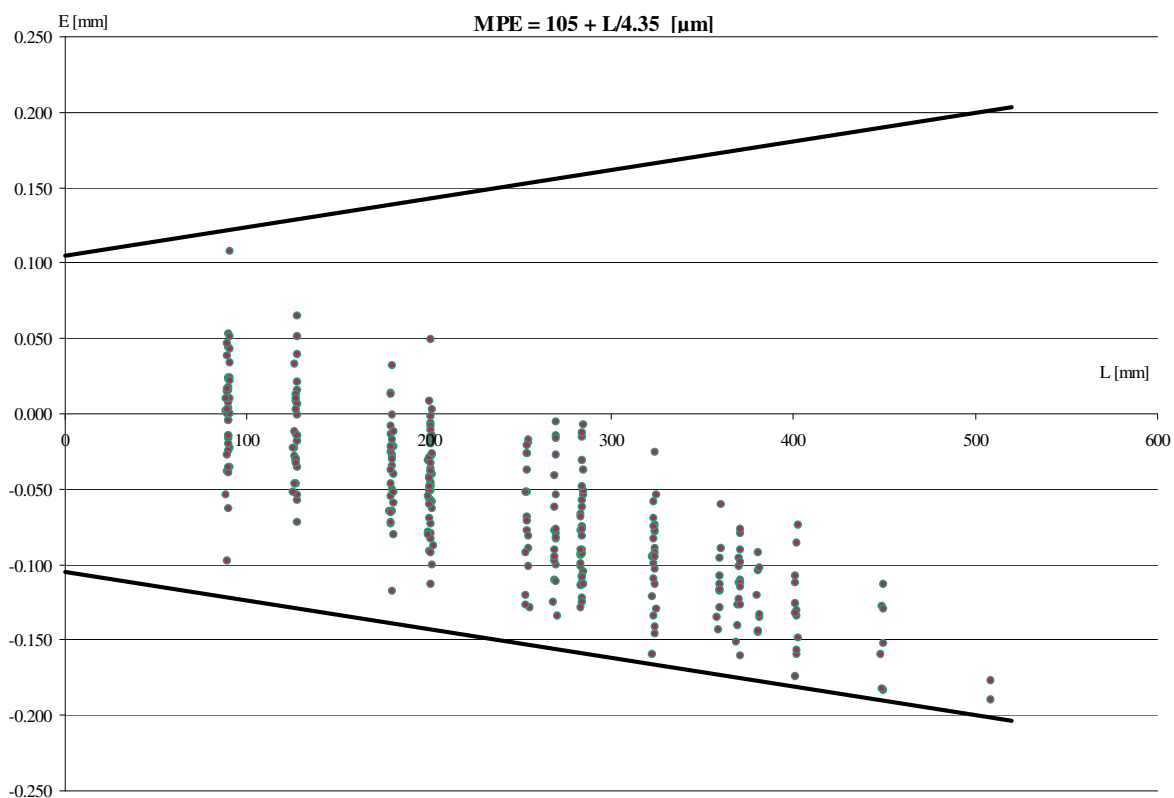


Wykres 12.6. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XYZ 2





Wykres 12.7. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego - położenie XYZ 3



Wykres 12.8. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego – położenie XYZ 4

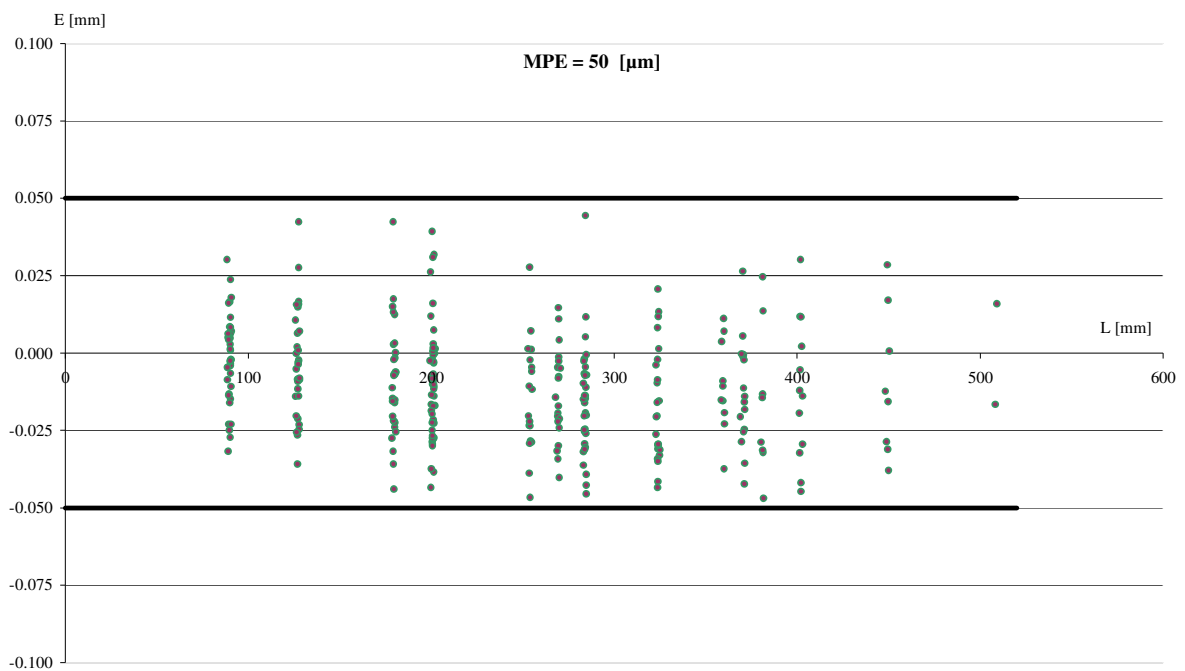
Podobnie przeprowadzono pomiary przy odpowiednio dobranym współczynniku korekcji optycznej (według zasady opisanej w punkcie 10.4.) oraz w układzie lokalnym zbudowanym w oparciu o pomiary stykowe. W wyniku tych działań uzyskano znaczną poprawę dokładności systemu, zmniejszając obszar błędów MPE prawie dwukrotnie. Równanie błędów granicznych skorygowanego systemu, jak wynika z poniższych wykresów, można zapisać w postaci:

Dla przypadku dwuwymiarowego:

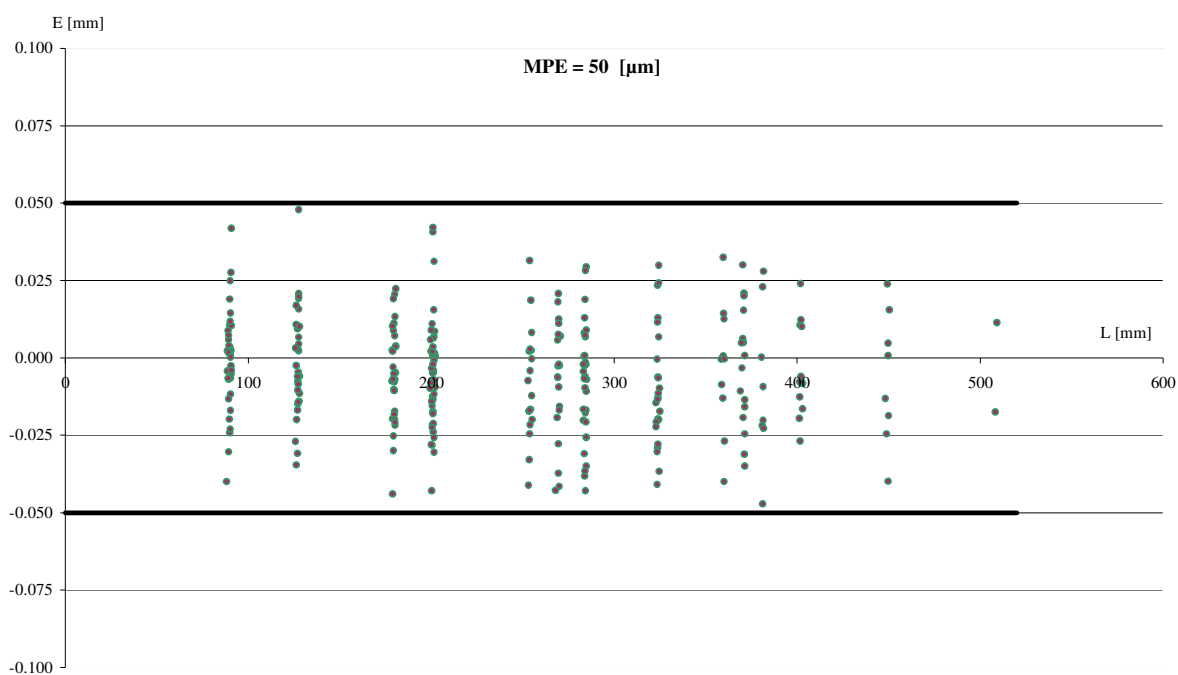
$$MPE = \pm 50 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Dla przypadku trójwymiarowego:

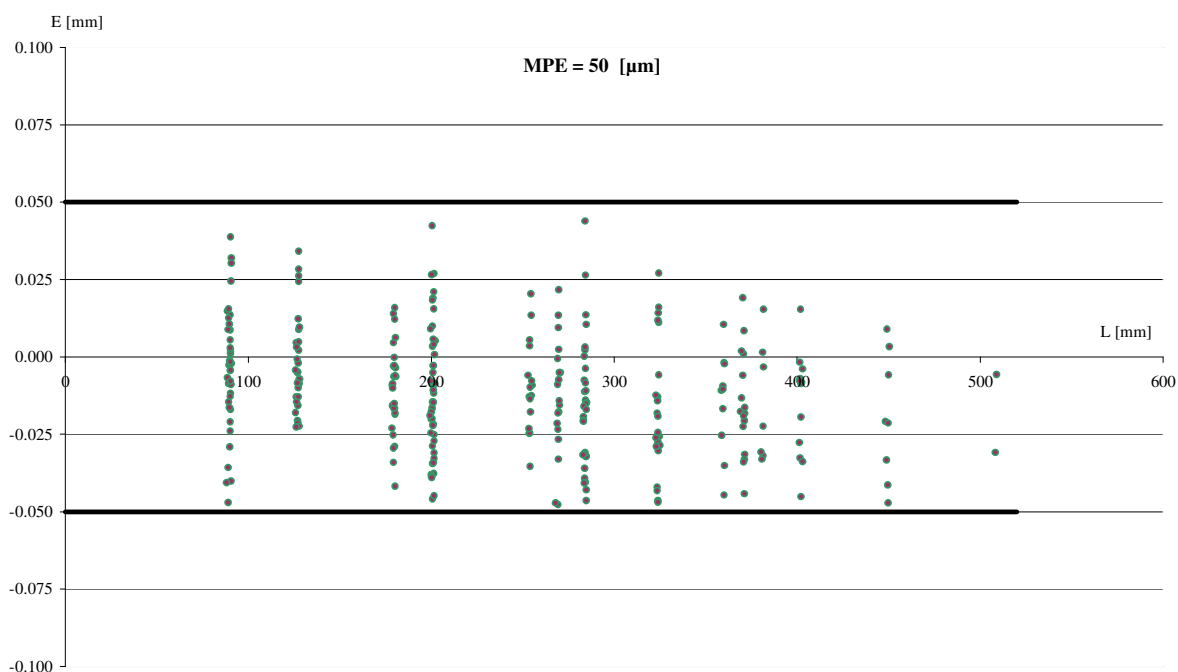
$$MPE = \pm 45 + 0.07 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$



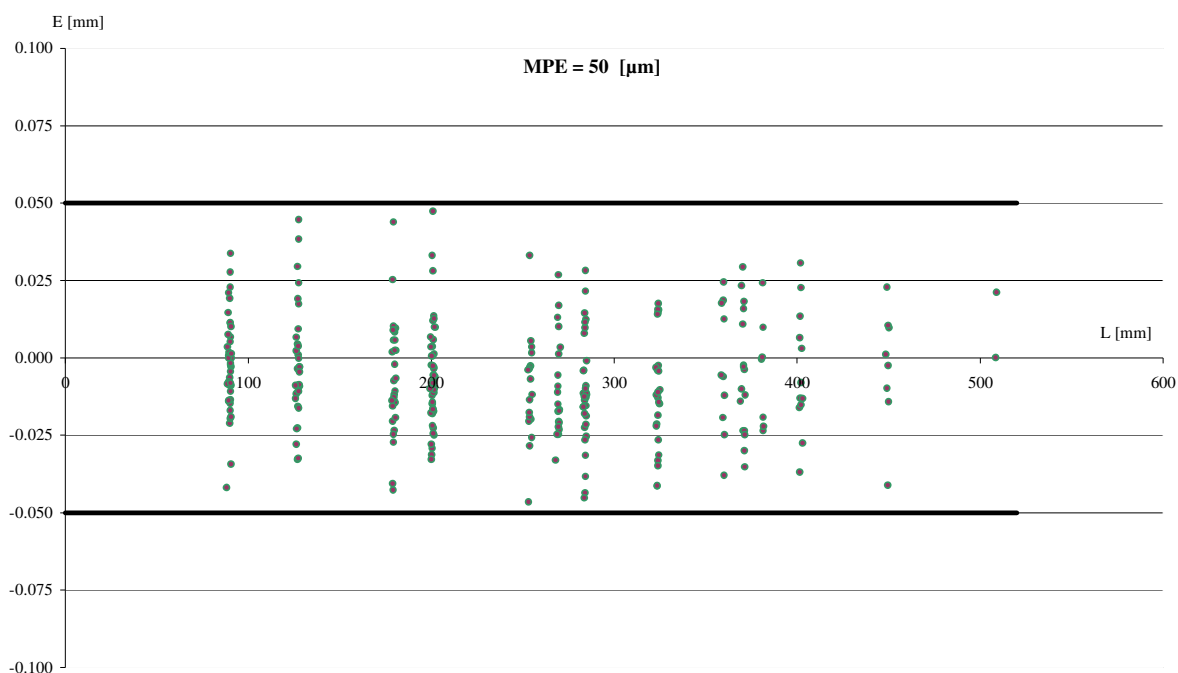
Wykres 12.9. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji –  
położenie XY 1



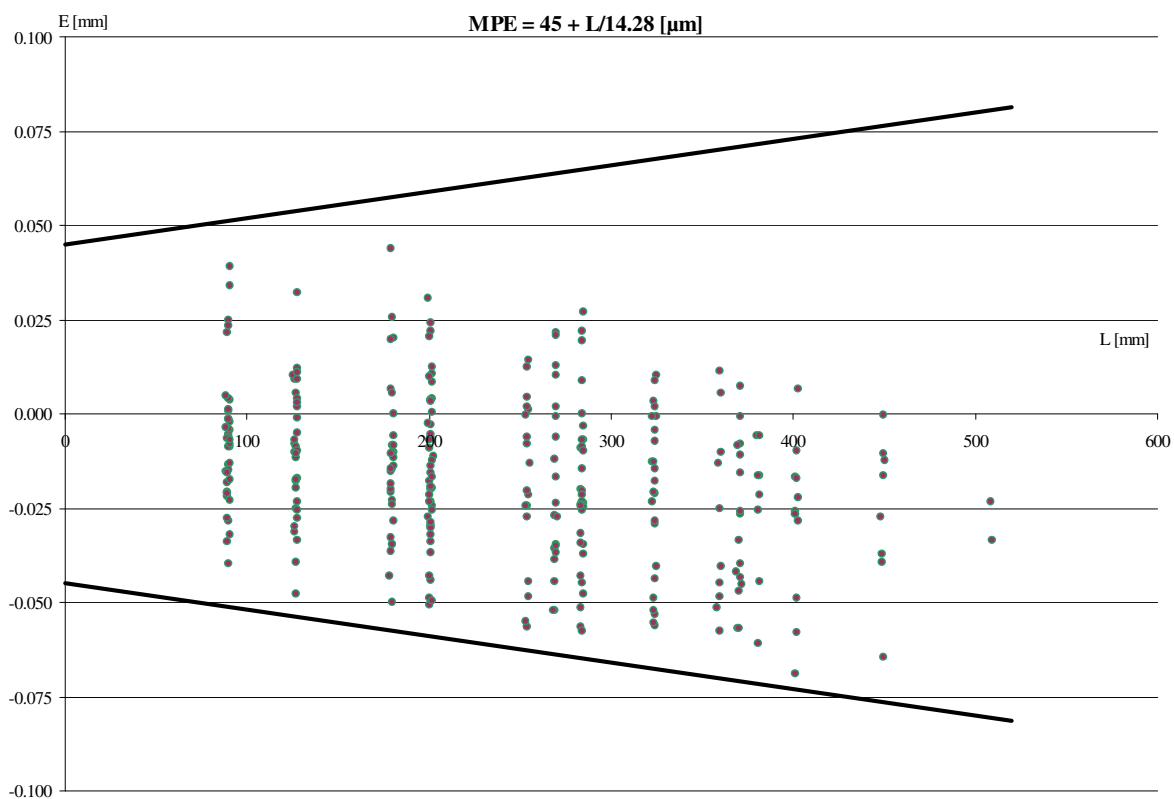
Wykres 12.10. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji –  
położenie XY 2



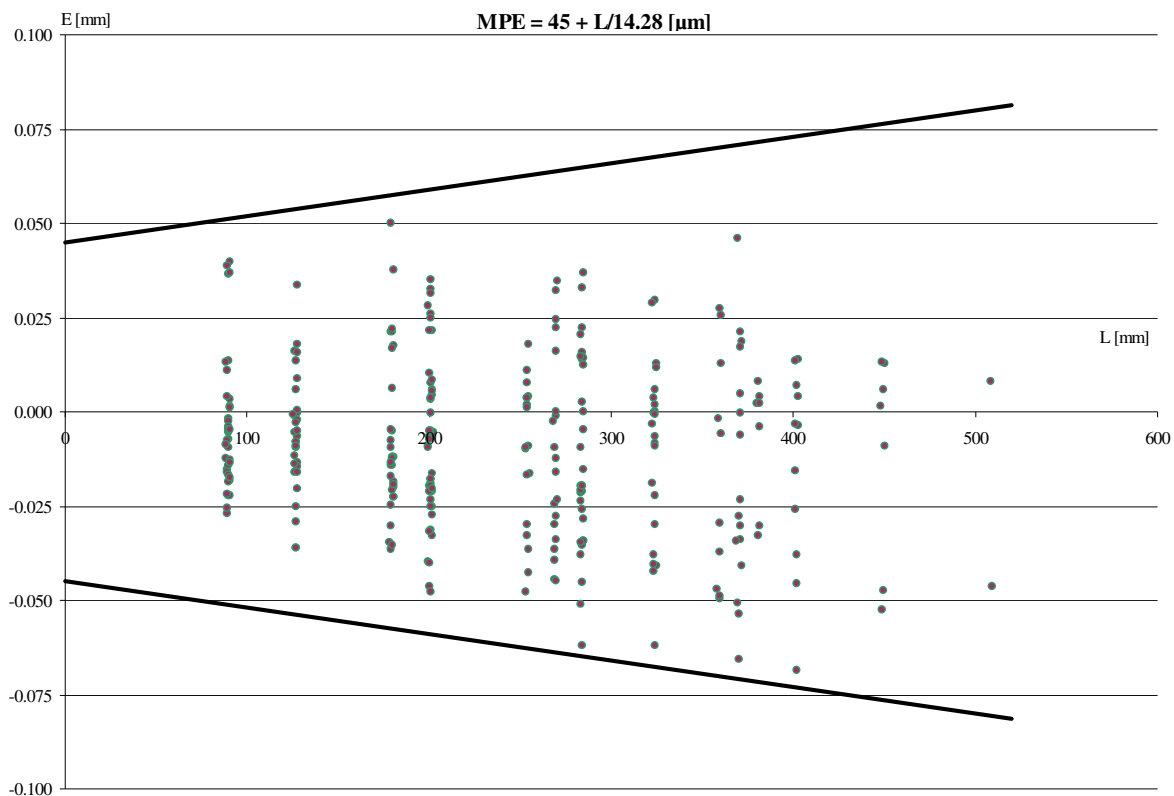
Wykres 12.11. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji –  
położenie XY 3



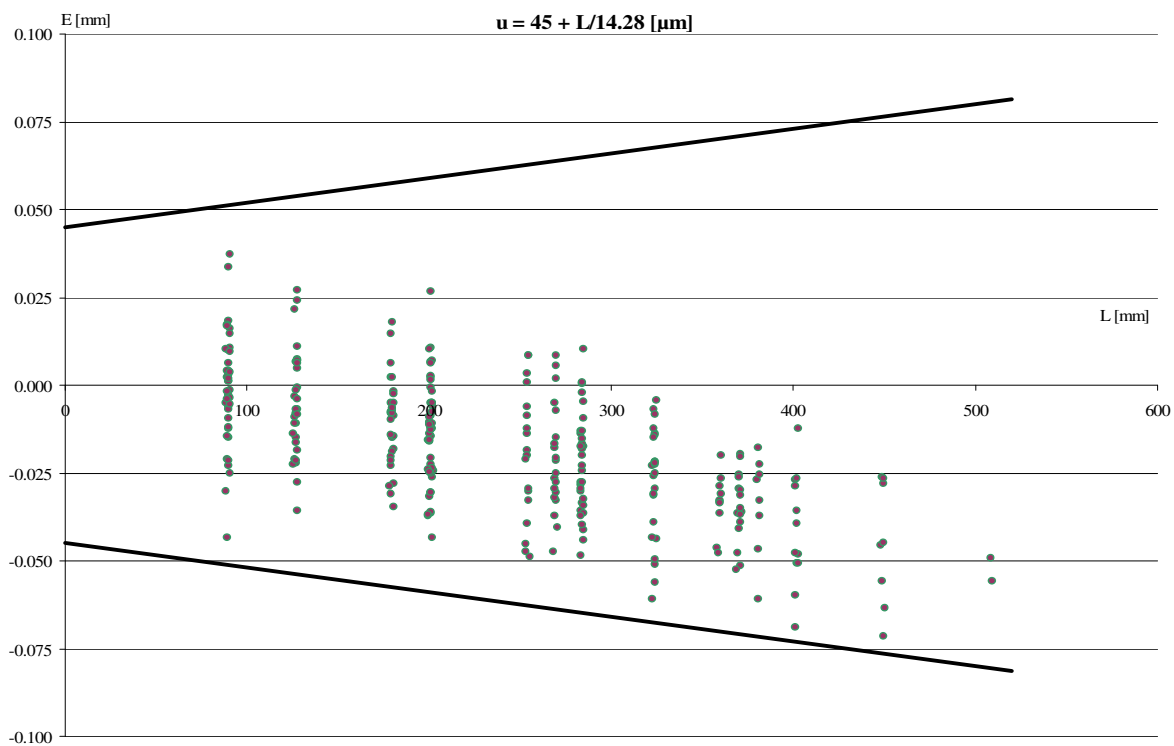
Wykres 12.12. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji –  
położenie XY 4



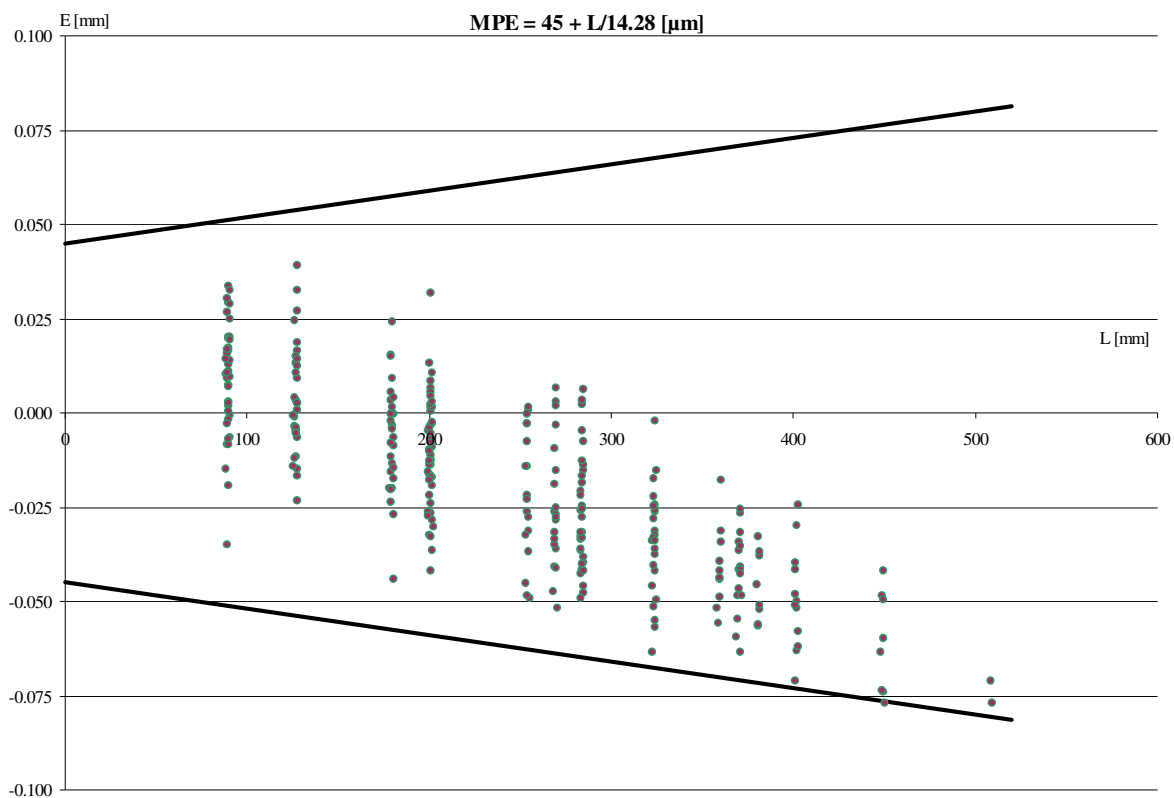
Wykres 12.13. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji –  
położenie XYZ 1



Wykres 12.14. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji -  
położenie XYZ 2



Wykres 12.15. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji -  
położenie XYZ 3



Wykres 12.16. Obszar błędów granicznych dla pomiaru wzorca płytowego po korekcji –  
położenie XYZ 4

## 12.2. Niepewność systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca płytowego

### 12.2.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru $u(\delta_{rep})$ (przy pomiarze długości)

Niepewność  $u(\delta_{rep})$  była wyznaczona ze wzorów (11.5), (11.6), dla trzykrotnego pomiaru wzorca płytowego w ośmiu ustawieniach zaprezentowanych na rysunku 12.1.

Stąd otrzymujemy:

$$u(\delta_{rep}) = 3.90 [\mu m]$$

Wartość ta jest maksymalną wartością uzyskaną dla wszystkich odległości.

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(\delta_{rep})$  została wyznaczona dla 24 powtórzeń w 8 niezależnych próbach, dlatego też:

$$v_i = 24 - 8 = 16.$$

### 12.2.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych $u(\delta_{ukl})$

#### *Niepewność maszyny współrzędnościowej $u(WMP)$*

Układ współrzędnych został wyznaczony przy zastosowaniu maszyny współrzędnościowej PMM 12106 wchodzącej w skład laboratoryjnego systemu hybrydowego. Aby ustalić równanie niepewności dla tej maszyny wykorzystano w pomiarach sprawdzających płytę otworową Feinmess typ 415/415/83 nr seryjny 199911014.



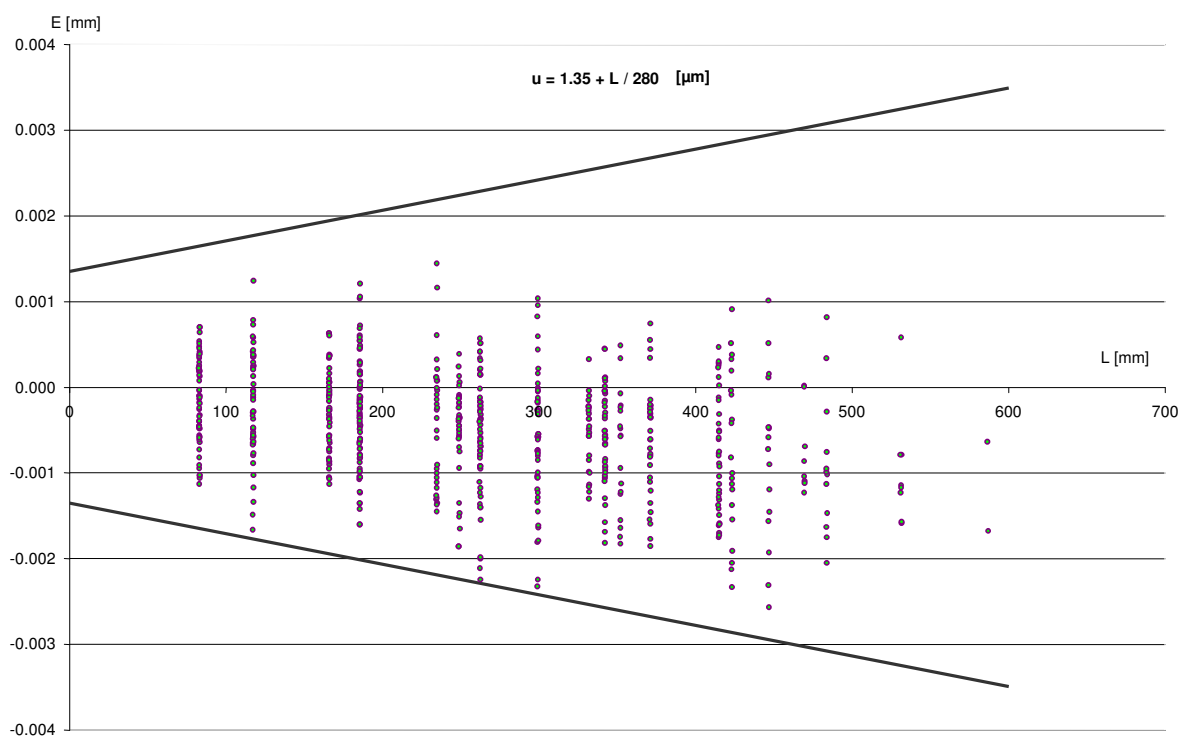
Rys.12.3. Fotografia wzorca Feinmess

Otrzymano następujące równanie niepewności maszyny:

$$u = 1.35 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

gdzie:

$L$  - mierzona długość podawana w [mm].



Wykres 12.17. Diagram niepewności PMM 121060

Równanie to należy zmodyfikować o niepewność kalibracji wzorca  $u(K_w)$ , niepewność pomiaru wzorca  $u(E_L)$ , niepewność związana z pomiarem stykowym  $u(E_g)$  oraz niepewność temperaturową  $u(T_w)$ .

#### Niepewność kalibracji wzorca Feinmess $u(K_w)$

Wzorzec został wykalibrowany przez Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), nr kalibracji 4122 DKD-K-05201 00-01. Podana niepewność rozszerzona wzorca dla pomiaru długości wynosi  $U = 0.3 + 0.6 \cdot 10^{-6} \cdot L [\mu m]$  i wyznaczono ją dla współczynnika  $k = 2$ . Stąd niepewność standardową kalibracji wzorca określa wzór :

$$u(K_w) = 0.15 + 0.3 \cdot 10^{-6} \cdot L [\mu m]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(K_w)$  została określona metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$  czyli  $1/v_i \rightarrow 0$ .



### Niepewność pomiaru długości wzorca $u(E_L)$

Pomiar wzorca powtórzono pięć razy. Niepewność  $u(E_L)$  wyznaczamy korzystając ze wzoru na odchylenie standardowe eksperymentalne średniej (5.2). Do dalszej analizy wykorzystano maksymalną wartość niepewności uzyskaną dla wyznaczonych 630 odległości.

$$u(E_L)_{max} = 0.04 \text{ } [\mu\text{m}]$$

### Wypadkowa liczba stopni swobody

Dla  $u(E_L)_{max}$  wypadkowa liczba swobody wynosi:  $\nu_i = 5 - 1 = 4$ , ponieważ niepewność ta została otrzymana z pięciu powtórzonych obserwacji.

### Niepewność związana z pomiarem stykowym $u(E_g)$

Do wyznaczenia tej niepewności użyto kuli kalibracyjnej o średnicy nominalnej 25.0005 [mm]. Kulę zmierzono w 25 punktach równomiernie rozmieszczonych na obszarze połowy kuli badawczej pięć razy. Obliczony średni błąd głowicy pomiarowej  $E_g$  wynosi 0.62 [ $\mu\text{m}$ ].



Rys.12.4. Pomiar kuli wzorcowej

Błąd kształtu wzorca kulistego  $F$  podany w certyfikacie kalibracyjnym (nr świadectwa M13-41620-21-1123/2000 wydany przez Główny Urząd Miar, Zakład Długości i Kąta) wynosi ok. 1 [ $\mu\text{m}$ ]. Niepewność rozszerzona wyznaczenia wartości błędu kształtu wynosi 0.1 [ $\mu\text{m}$ ] przy  $k = 2$ . Niepewność standardowa wynosi więc  $u(F) = 0.05 \text{ } [\mu\text{m}]$ . Stąd niepewność systemu stykowego kształtuje się na poziomie:

$$u(E_g) = 0.62 + \sqrt{\left(\frac{1}{2}\right)^2 + 0.05^2} = 1.12 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wynik ten uzyskano dla końcówki  $d = 5$  [mm] i długości trzpienia  $L = 120$  [mm].

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Wartość  $E_g$  jest bezpośrednio zmierzoną wielkością, dlatego też liczba stopni swobody  $E_g$  dąży do nieskończoności. Niepewność  $u(F)$  oraz błąd kształtu  $F$  zostały określone na podstawie danych ze świadectwa kalibracyjnego i zakłada się, że podane wartości są dokładne, dlatego też  $\nu_i \rightarrow \infty$ . Korzystając ze wzoru (5.6) wyznaczamy:

$$\nu_{eff}(E_g) = \frac{1.12^4}{\frac{0.62^4}{\infty} + \frac{1^4}{\infty} + \frac{0.05^4}{\infty}} = \infty$$

#### Niepewność temperaturowa dla pomiaru wzorca $u(T_w)$

Po uwzględnieniu danych z tabeli 12.1. i wykorzystaniu wzoru (11.12), niepewność wynikająca z wpływu zmian termicznych dla pomiaru wzorca ma postać:

$$u(T_w) = 0.00015 \cdot L [\mu m]$$

Tabela 12.1. Budżet niepewności temperaturowej dla wzorca Feinmess

Symbol wielkości $X_i$	Estymata wielkości $x_i$	Rozkład prawdopodobieństwa	Niepewność standardowa $u(x_i)$
$\Delta T_w$	0.5 [°C]	antymodalny V	0.35 [°C]
$\alpha_w$	$(0.10 \pm 0.5) \cdot 10^{-6}$ [1/°C]	prostokątny	$0.29 \cdot 10^{-6}$ [1/°C]
$L$	83 - 587 [mm]	-	0 - 0.085 [ $\mu m$ ]
$u(T_w)$	-	-	0.00015 · L [ $\mu m$ ]

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(\delta_{temp})$  została określona bazując na danych wyznaczonych metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $\nu_i \rightarrow \infty$  czyli:

$$\nu_{eff} = \frac{0.00015 \cdot L^4}{\infty} = 0$$

Składając osobno współczynniki zależne i niezależne wymienionych wyżej niepewności otrzymujemy równanie niepewności WMP PMM:

$$u(WMP) = 1.76 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

### Wypadkowa liczba stopni swobody dla niepewności WMP

Przyjmując  $L = 0$  [mm] liczba stopni swobody dla tej niepewności wynosi:

$$v_{eff}u(WMP) = \frac{1.76^4}{\frac{0.04^4}{4}} = 14992384$$

Dla maksymalnej możliwej długości do zmierzenia przez skaner wynoszącej ok.  $L = 780$  [mm] otrzymujemy:

$$v_{eff}u(WMP) = \frac{4.57^4}{\frac{0.04^4}{4}} = 681529762$$

### *Niepewność związana ze zmienną strategią budowy układu $u(str)$*

W celu wyznaczenia tej niepewności dokonano pomiaru położenia danej cechy przy wyznaczeniu pięciokrotnie układu tą samą strategią przy różnym rozmieszczeniu punktów pomiarowych. Zastosowano cztery różne strategie. Wyniki są umieszczone w tabeli 12.2.

Tabela 12.2. Pozycja kuli przy zastosowaniu różnych strategii budowy układu współrz. w [mm]

	Strategia 1		Strategia 2		Strategia 3		Strategia 4	
	x	y	x	y	x	y	x	y
pomiar 1	39.5563	27.5107	39.5478	27.5075	39.55024	27.5135	39.5534	27.5075
pomiar 2	39.5541	27.5113	39.5506	27.5066	39.54936	27.5129	39.553	27.5064
pomiar 3	39.5557	27.5100	39.5488	27.5057	39.5506	27.5113	39.551	27.5071
pomiar 4	39.5554	27.5123	39.5491	27.5061	39.5512	27.5099	39.5524	27.5055
pomiar 5	39.5552	27.5103	39.5482	27.5070	39.5549	27.5120	39.5519	27.5074
<b>Odchylenie standardowe[mm]</b>	<b>0.00081</b>	<b>0.00091</b>	<b>0.0011</b>	<b>0.00071</b>	<b>0.0021</b>	<b>0.0014</b>	<b>0.00094</b>	<b>0.00084</b>

Korzystając ze wzoru (11.16) wyznaczamy:

$$u_x(str) = 0.61 \text{ } [\mu\text{m}]$$

$$u_y(str) = 0.45 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Ostatecznie jako  $u(str)$  przyjmujemy wartość większą spośród nich.

### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(\delta_{ukl})$  została wyznaczona dla 20 powtórzeń w 4 niezależnych próbach, dlatego też:

$$v_i = 20 - 4 = 16$$

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru 11.7 otrzymujemy następnie niepewność wyznaczenia układu współrzędnych  $u(\delta_{ukl})$  w postaci:

$$u(\delta_{ukl}) = 1.86 + 0.0036 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody dla niepewności budowy układu współrzędnych wynosi:

Dla  $L = 0$  [mm]:

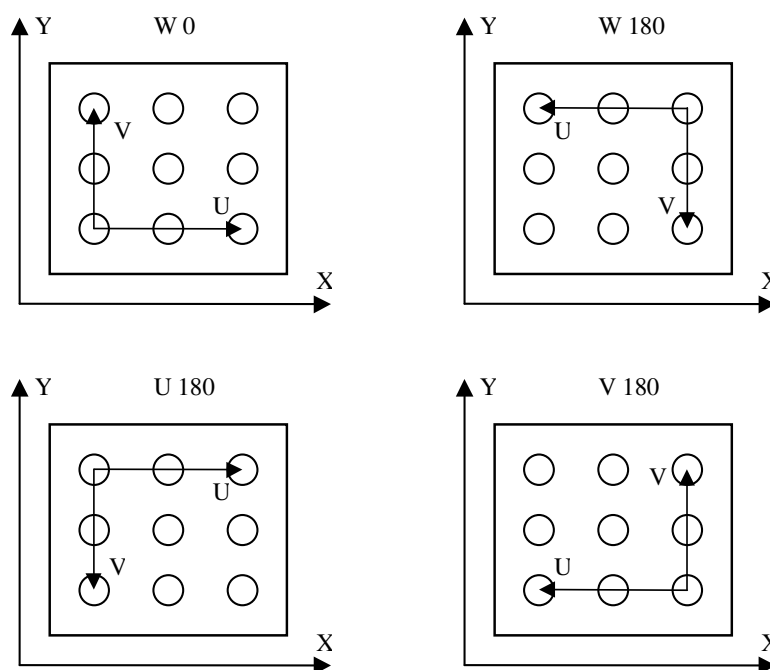
$$v_{eff}u(\delta_{ukl}) = \frac{1.86^4}{\frac{1.76^4}{14992384} + \frac{0.61^4}{16}} = 1382.99$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

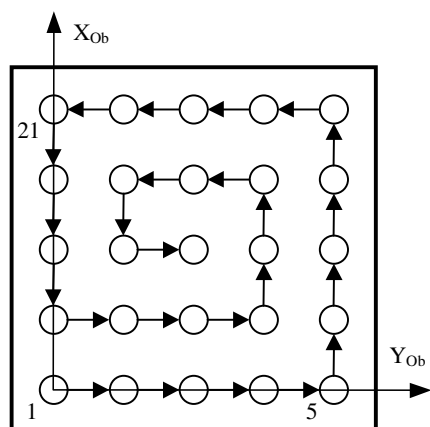
$$v_{eff}u(\delta_{ukl}) = \frac{4.67^4}{\frac{4.57^4}{681529762} + \frac{0.61^4}{16}} = 54958.65$$

### 12.2.3. Niepewność wzorcowania wzorca płytowego $u(\delta_{wp})$

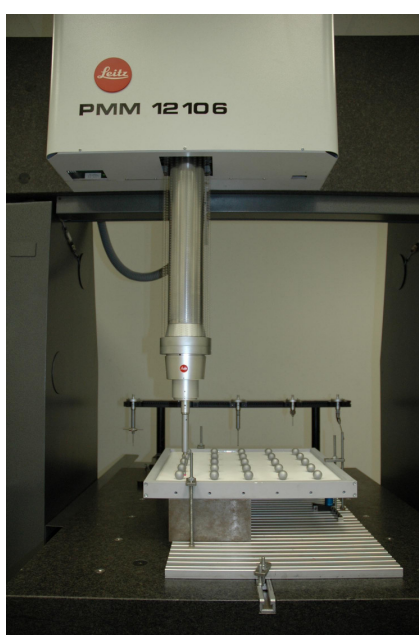
W procesie kalibracji wzorca płytowego wykorzystano referencyjną maszynę pomiarową PMM 12106. W celu wyeliminowania błędów systematycznych maszyny, mających swe źródło w deformacjach układu kinematycznego zastosowano w procesie kalibracji metodę *swing round* czyli pomiar płyty w czterech położeniach „metodą ślimaka” w cyklu pięciokrotnym (patrz poniższe rysunki). Upřednio wzorzec był stabilizowany termicznie przez 48 godzin.



Rys.12.5. Kolejne ustawienia wzorca w cyklu kalibracyjnym metoda *swing round*. X, Y – osie układu współrzędnych maszyny, U, V – osie układu wzorca [59]



Rys.12.6. Kolejność pomiaru elementów wzorca [59]



Rys.12.7. Kalibracja wzorca

Przedmiotem wzorcowania były współrzędne środków kul wzorca w układzie współrzędnych wyznaczonym z elementów granicznych. Wyniki uzyskane w formie pliku tekstowego, z kalibracji dla jednego położenia wzorca prezentuje poniższy rysunek.

WSP_KUL.TXT - Notatnik				
Plik	Edycja	Format	Widok	Pomoc
x	y	z	d	
-0.00000	-0.00000	-0.00000	25.00044	
90.46784	0.57376	0.15542	24.99945	
180.30928	0.47061	0.03564	25.00020	
269.54893	0.73971	-0.01811	25.00057	
360.30159	-0.00000	-0.00000	25.00040	
0.13080	90.19366	-0.18761	24.99985	
90.16764	90.76512	-0.01407	25.00014	
180.41379	90.24751	-0.23703	25.00080	
270.23412	90.22627	-0.13375	25.00000	
360.30558	90.28331	-0.41378	25.00118	
0.10538	180.67575	-0.24413	25.00078	
90.29490	181.05291	-0.29064	25.00008	
180.43216	180.56184	-0.47444	25.00128	
269.77218	180.53366	-0.53556	25.00171	
360.36840	180.49348	-0.72116	25.00237	
0.43267	269.67236	-0.28007	25.00083	
90.53373	269.57670	-0.38801	25.00063	
181.07677	269.77601	-0.57617	25.00163	
269.74773	269.84099	-0.74639	25.00221	
359.96944	270.61337	-0.77992	25.00237	
1.31049	360.00085	-0.00000	25.00132	
90.42613	360.13792	-0.36994	25.00222	
181.11446	359.09234	-0.33941	25.00147	
269.37131	360.22763	-0.74763	25.00226	
360.16992	359.83548	-1.03246	25.00398	

Rys.12.8. Raport z pomiaru kul maszyna PMM

### Niepewność pomiaru wzorca płytowego $u(P_{wp})$

Na podstawie wyników pomiarów kalibracyjnych z każdego położenia i cyklu oraz przy użyciu wzorów (11.19), (11.20) określono niepewności  $u_{rep}$  i  $u_{geo}$  przeprowadzonych pomiarów:

$$u_{rep} = 0.13 [\mu m]$$

$$u_{geo} = 0.29 [\mu m]$$

i ostatecznie wyznaczono niepewność  $u(P_{wp})$  w postaci:

$$u(P_{wp}) = \sqrt{0.13^2 + 0.29^2} = 0.32 [\mu m]$$

Wartość ta jest maksymalną wartością uzyskaną spośród wszystkich odległości.

### Wypadkowa liczba stopni swobody

Dla  $v_i(u_{rep}) = 5 - 1 = 4$ , a dla  $v_i(u_{geo}) = 4 - 1 = 3$  stąd korzystając ze wzoru Welch-Satterthwaite'a obliczamy:

$$v_{eff}(P_{wo}) = \frac{0.32^4}{\frac{0.13^4}{4} + \frac{0.29^4}{3}} = 4.32$$

### Niepewność maszyny referencyjnej $u(PMM)$

Niepewność ta została wyznaczona w punkcie 12.2.2. i wynosi:

$$u(PMM) = u(WMP) = 1.76 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody dla niepewności PMM

Dla  $L = 0$  [mm]:

$$v_{eff}u(PMM) = \frac{1.76^4}{\frac{0.04^4}{4}} = 14992384$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

$$v_{eff}u(PMM) = \frac{4.57^4}{\frac{0.04^4}{4}} = 681529762$$

#### ***Niepewność powłoki antyrefleksyjnej $u(P_{aref})$***

Elementy wzorca podczas badań był pokryty powłoką antyrefleksyjną, aby zmniejszyć wpływ spowodowany refleksyjnością obiektu. Według danych producenta błąd pomiaru wynikający z nierównomierności pokrycia (zwiększona odchyłka kształtu) wynosi  $u(P_{aref}) = 2$  [ $\mu m$ ].

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(P_{aref})$  została określona metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$  czyli  $1/v_i \rightarrow 0$ .

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru 11.17 otrzymujemy ostateczną niepewność kalibracji wzorców w postaci:

$$u(\delta_w) = 2.68 + 0.0036 \cdot L \text{ } [\mu m]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody niepewności wzorców wynosi więc:

Dla  $L = 0$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{2.68^4}{\frac{0.32^4}{4.32} + \frac{1.76^4}{14992384}} = 21247.53$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{5.49^4}{\frac{0.32^4}{4.32} + \frac{4.57^4}{681529762.52}} = 374161.17$$

#### 12.2.4. Niepewność wpływu temperatury $u(\delta_{temp})$

Dla pomiaru porównawczego wzorców niepewność ta jest wyznaczona według wariantu nr 2 (patrz punkt 11.2.4), gdyż użyto tych samych termometrów do określenia temperatury podczas wzorcowania i pomiaru.

W tym celu wyznaczono niepewności:

##### *Niepewność różnicy temperatur wzorca płytowego podczas kalibracji i pomiaru $u(\Delta T_w)$*

Kalibracja wzorców jak i pomiar odbywały się w pomieszczeniu klimatyzowanym, gdzie cykliczne wahania temperatury wynoszą  $20 \pm 1$  [°C]. Jednakże podczas pomiaru optycznego wzorce były dodatkowe nagrzewane przez projektor.

Różnica temperatur wzorca płytowego podczas kalibracji i pomiaru nie przekroczyła 0.7 [°C]. Stąd korzystając ze wzoru (11.38), niepewność standardowa  $u(\Delta T_w)$  kształtuje się na poziomie: 0.40 [°C].

##### *Niepewność użytego termometru $u(\Delta T_{ter})$*

Pomiar temperatury wzorców odbywał się przy użyciu czujników Ntc typ N o rozdzielczości 0.01 [°C] znajdujących się na wyposażeniu systemu pomiarowego Almemo 5590-1 V5 firmy Ahlborn Mess und Regelungstechnik GmbH. Czujniki te były wzorcowane przy pomocy rtęciowego termometru odniesienia o niepewności 0.01 [°C] podanej w świadectwie nr 1401E90B wydanym przez Eichamt für Glasmeßgeräte Wertheim – DKD. W zakresie pomiarowym od 0 [°C] do + 70.00 [°C] posiadają niepewność (wg. danych producenta)  $\pm 0.1$  [°C] dla rozkładu równomiernego. Stąd:  $u(\Delta T_{ter}) = 0.058$  [°C]. Wzór ten poszerzony o niepewność rtęciowego termometru przybiera ostatecznie postać:

$$u(\Delta T_{ter}) = 0.059 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

##### *Niepewność współczynnika rozszerzalności cieplnej wzorca płytowego $u(\alpha_w)$*

Odchyłki graniczne współczynnika rozszerzalności cieplnej wynoszą dla szkła  $\alpha_{ow} = 0.5 \cdot 10^{-6}$  [1/°C], gdzie  $\alpha_w = 0 \cdot 10^{-6}$  [1/°C]. Stąd podstawiając do wzoru (11.39):

$$u(\alpha_w) = 0.29 \cdot 10^{-6} \text{ [1/}^\circ\text{C]}$$

Poniższa tabela przedstawia budżet niepewności dla wpływu temperatury na wzorzec płytowy podczas wzorcowania i pomiaru.



Tabela 12.3. Budżet niepewności dla poprawki temperaturowej przy pomiarze wzorca

Symbol wielkości $X_i$	Estymata wielkości $x_i$	Rozkład prawdopodobieństwa	Niepewność standardowa $u(x_i)$
$\Delta T_w$	0.7 [°C]	prostokątny	0.40 [°C]
$\alpha_w$	$(0 \pm 0.5) \cdot 10^{-6} [1/^\circ C]$	prostokątny	$0.29 \cdot 10^{-6} [1/^\circ C]$
$\Delta T_{Ter}$	-	prostokątny	0.059 [°C]
$L$	90 - 510 [mm]	-	0 - 0.085 [ $\mu m$ ]
$\delta_{temp}$	-	-	<b>0.00017 · L [<math>\mu m</math>]</b>

Uwzględniając powyższe dane i korzystając ze wzoru (11.37) wyliczono niepewność wpływu temperatury:

$$u(\delta_{temp}) = 0.00017 \cdot L [\mu m]$$

L[mm]	90	125	180	200	255	270	285	325	360	370	380	400	450	510
$u(\delta_{temp}) [\mu m]$	0.015	0.021	0.030	0.033	0.042	0.045	0.047	0.054	0.060	0.062	0.063	0.067	0.075	0.085

#### Wypadkowa liczba stopni swobody dla poprawki temperaturowej

Niepewność  $u(\delta_{temp})$  została wyliczona metoda typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $\nu_i \rightarrow \infty$ . Stąd:

$$\nu_{ieff(temp)} = \frac{0.00017 \cdot L^4}{\infty} = 0$$

### 12.2.5. Niepewność kalibracji systemu optycznego $u(\delta_{kal})$

#### *Niepewność wzorcowania wzorca płytowego $u(\delta_w)$*

Niepewność wzorca płytowego wynosząca  $u(\delta_{wp}) = 2.68 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$  została już uwzględniona w punkcie 12.2.3. dlatego tej wartości nie bierzemy pod uwagę w dalszych obliczeniach.

#### *Niepewność temperaturowa dla procesu kalibracji $u(T_{kal})$*

Podczas wzorcowania wzorca płytowego i kalibracji systemu optycznego, do pomiaru temperatury wzorca zastosowano te same termometry, dlatego niepewność ta będzie wyznaczona według wariantu 2 punktu 11.2.5. Przy uwzględnieniu wejściowych z poniższej tabeli będzie mieć ona postać:

$$u(T_{kal}) = 0.0012 \cdot L [\mu m]$$

Tabela 12.4. Budżet niepewności temperaturowej dla procesu kalibracji

Symbol wielkości $X_i$	Estymata wielkości $x_i$	Rozkład prawdopodobieństwa	Niepewność standardowa $u(x_i)$
$\Delta T_w$	2 [°C]	prostokątny	1.15 [°C]
$\alpha_w$	$(0 \pm 0.5) \cdot 10^{-6}$ [1/°C]	prostokątny	$0.29 \cdot 10^{-6}$ [1/°C]
$\Delta T_{Ter}$	-	prostokątny	0.059 [°C]
$L$	90-510 [mm]	-	0.11 – 0.62 [μm]
$u(T_{kal})$	-	-	$0.0012 \cdot L$ [μm]

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(T_{kal})$  została określona bazując na danych wyznaczonych metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $\nu_i \rightarrow \infty$  czyli:

$$\nu_{eff} = \frac{0.0012 \cdot L^4}{\infty} = 0.$$

#### **Niepewność stołu przesuwnego WMP $u(P_x)$**

Jak już wspomniano niepewność stołu przesuwnego traktujemy jako niepewność pozycji w osi  $X$ . W celu wyznaczenia tej niepewności dokonano pomiaru wzorca długości Koba-Step nr seryjny 200306S183 o długości nominalnej 1020 [mm] zamieszczonego na rysunku 12.9.

Wzorzec ten został wykalibrowany przez PTB (nr świadectwa 10329 DKD - K - 05201 - 03 - 09).

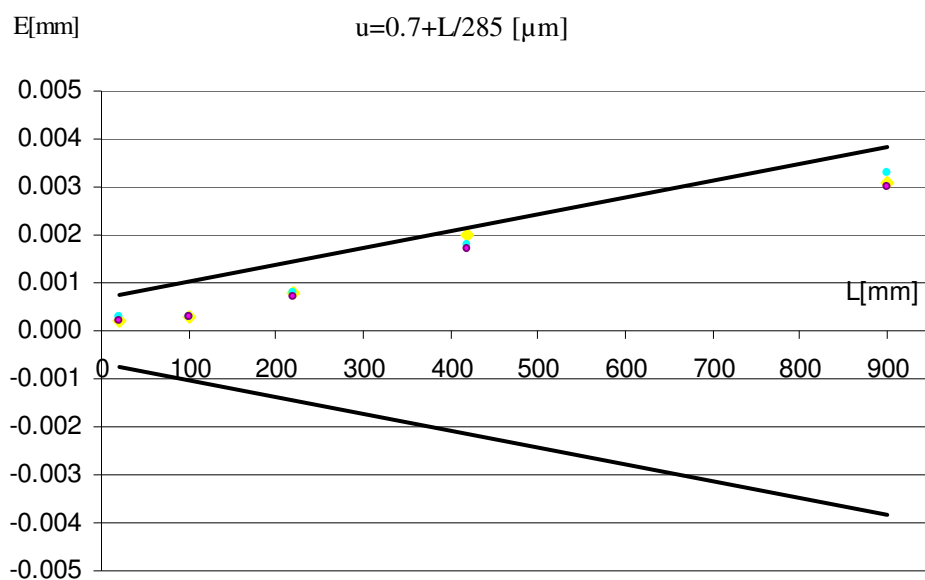


Rys.12.9. Wzorzec Koba – Step

Dokonano pomiaru wzorca w trzech seriach po pięć odległości. Tabela 12.5 oraz wykres 12.8 prezentują otrzymane wyniki.

Tabela 12.5. Rezultaty pomiarów wzorca Koba- Step

Odległość	Dane pomiarowe	Dane nominalne	Odchyłka	Tolerancja	Tolerancja
Pomiar 1	20.0009	20.0007	0.0002	0.0008	-0.0008
Pomiar 2	99.9374	99.9371	0.0003	0.0010	-0.0010
Pomiar 3	219.9242	219.9234	0.0008	0.0015	-0.0015
Pomiar 4	419.9250	419.9230	0.0020	0.0022	-0.0022
Pomiar 5	899.9101	899.9070	0.0031	0.0038	-0.0038
Pomiar 1	20.0010	20.0007	0.0003	0.0008	-0.0008
Pomiar 2	99.9374	99.9371	0.0003	0.0010	-0.0010
Pomiar 3	219.9242	219.9234	0.0008	0.0015	-0.0015
Pomiar 4	419.9248	419.9230	0.0018	0.0022	-0.0022
Pomiar 5	899.9103	899.9070	0.0033	0.0038	-0.0038
Pomiar 1	20.0009	20.0007	0.0002	0.0008	-0.0008
Pomiar 2	99.9374	99.9371	0.0003	0.0010	-0.0010
Pomiar 3	219.9241	219.9234	0.0007	0.0015	-0.0015
Pomiar 4	419.9247	419.9230	0.0017	0.0022	-0.0022
Pomiar 5	899.9100	899.9070	0.0030	0.0038	-0.0038



Wykres 12.18. Diagram niepewności PMM 121060 w osi X

Na podstawie wyników wyznaczono wzór na niepewność stołu przesuwnego  $u(P_x)$  który wynosi:

$$u(P_x) = 0.7 + 0.0035 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Równanie to należy zmodyfikować o *niepewność kalibracji Koby*  $u(K_w)$ , *niepewność pomiaru wzorca*  $u(E_L)$ , *niepewność związana z pomiarem stykowym*  $u(E_g)$  oraz *niepewność temperaturową*  $u(T_w)$ .

#### Niepewność kalibracji wzorca Koba $u(K_w)$

Świadectwo wzorcowania podaje niepewność rozszerzoną wzorca na poziomie

$U = 0.1 + 0.5 \cdot 10^{-6} \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$  przy  $k = 2$ , niepewność standardowa wynosi więc:

$$u(K_w) = 0.05 + 0.25 \cdot 10^{-6} \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(K_w)$  została wyliczona metoda typu B z danego *a priori* rozkładu prawdopodobieństwa i zakłada się, że wartość  $u(K_w)$  jest dokładna, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$ .

#### Niepewność pomiaru wzorca Koba – Step $u(E_L)$

Niepewność  $u(E_L)$  wyznaczamy korzystając z zależności (5.2). Jako niepewność pomiaru wzorca autor podaje maksymalną wartość niepewności uzyskaną dla wyznaczonych pięciu odległości. Stąd:

$$u(E_L)_{max} = 0.088 \text{ } [\mu\text{m}]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(E_L)$  została wyznaczona przy trzech powtórzeniach, dlatego też:  $v_i = 3 - 1 = 2$ .

#### Niepewność związana z pomiarem stykowym $u(E_g)$

Niepewność systemu stykowego została wyliczona w punkcie (12.2.2) i wynosi:

$$u(E_g) = 1.12 \text{ } [\mu\text{m}]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

$$v_{eff}(E_g) = \frac{1.12^4}{\frac{0.62^4}{\infty} + \frac{1^4}{\infty} + \frac{0.05^4}{\infty}} = \infty$$

### Niepewność temperaturowa dla pomiaru wzorca Koba - Step $u(T_w)$

Dane wejściowe do obliczenia tej niepewności prezentuje poniższa tabela.

Tabela 12.6. Budżet niepewności temperaturowej dla wzorca Koba - Step

Symbol wielkości $X_i$	Estymata wielkości $x_i$	Rozkład prawdopodobieństwa	Niepewność standardowa $u(x_i)$
$\Delta T_w$	0.5 [°C]	antymodalny V	0.35 [°C]
$\alpha_w$	$(11.5 \pm 1.5) \cdot 10^{-6} [1/^\circ C]$	prostokątny	$0.87 \cdot 10^{-6} [1/^\circ C]$
$L$	20-900 [mm]	-	0.081 - 2.08 [ $\mu m$ ]
$u(T_w)$	-	-	$0.0041 \cdot L [\mu m]$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(\delta_{temp})$  została określona metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$ , stąd:

$$v_{eff} = \frac{0.0041 \cdot L^4}{\infty} = 0$$

Ostatecznie otrzymujemy równanie na niepewność stołu przesuwne w postaci:

$$u(P_x) = 1.32 + 0.0054 \cdot L [\mu m]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody dla niepewności stołu

Dla  $L=0$  [mm]:

$$v_{eff}(P_x) = \frac{1.32^4}{\frac{0.088^4}{2}} = 101250$$

Dla  $L=780$  [mm]:

$$v_{eff}(P_x) = \frac{5.52^4}{\frac{0.088^4}{2}} = 30963897.27$$

Uwzględniając  $u(T_{kal})$  niepewność poprawki na kalibrację systemu optycznego  $u(\delta_{kal})$  przybiera postać:

$$u(\delta_{kal}) = 1.32 + 0.0055 \cdot L [\mu m]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody dla poprawki na kalibrację systemu optycznego wynosi

Dla  $L=0$  [m]:

$$v_{eff}(\delta_{kal}) = \frac{1.32^4}{\frac{1.32^4}{101250}} = 101250$$

Dla  $L=780$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_{kal}) = \frac{5.63^4}{\frac{5.52^4}{30963897.27}} = 3350679484$$

Poniższa tabela prezentuje poszczególne wartości wpływów dla niepewności systemu hybrydowego.

Tabela 12.7. Budżet niepewności systemu hybrydowego dla pomiaru wzorca płytowego

Składowa niepewności	$c_i \left( \frac{\partial l_{sh}}{\partial x_i} \right)$	Udział w złożonej niepewności standardowej
$u(\delta_{rep})$	1	3.9 [ $\mu m$ ]
$u(\delta_{ukl})$	1	1.86 + 0.0036 · L [ $\mu m$ ]
$u(\delta_w)$	-1	2.68 + 0.0036 · L [ $\mu m$ ]
$u(\delta_{temp})$	1	0.00017 · L [ $\mu m$ ]
$u(\delta_{kal})$	1	1.32 + 0.0055 · L [ $\mu m$ ]
<b><math>u(E)</math></b>		<b>5.25 + 0.0075 · L [<math>\mu m</math>]</b>

Ostatecznie **niepewność złożona** błędu wskazania systemu hybrydowego, wyznaczona przy użyciu wzorca płytowego wynosi:

$$u(E) = 5.25 + 0.0075 \cdot L [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody wynosi

Dla  $L=0$  [mm]:

$$v_{eff}(E) = \frac{5.25^4}{\frac{3.9^4}{16} + \frac{1.86^4}{1382.99} + \frac{2.68^4}{121247.53} + \frac{1.32^4}{101250}} = 52.50$$

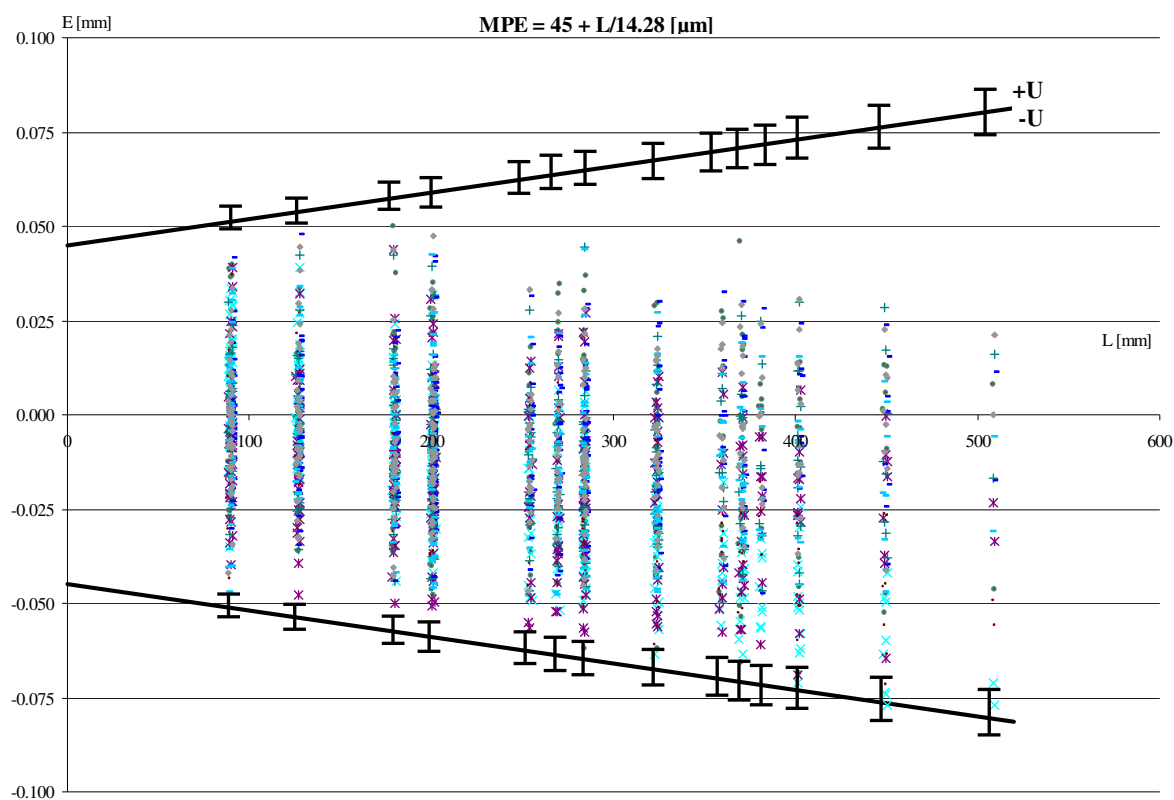
Dla  $L=780$  [mm]:

$$v_{eff}(E) = \frac{11.10^4}{\frac{3.9^4}{16} + \frac{4.67^4}{54958.65} + \frac{5.49^4}{37416.17} + \frac{5.63^4}{3350679484}} = 1049.11$$

Wartości te obcinamy do najbliższej mniejszej liczby całkowitej przyjmując  $v_{eff} = 52$  oraz  $v_{eff} = 1049$  następnie korzystając z tablicy kwantyli rozkładu  $t$  – *Studenta* otrzymujemy odpowiednio współczynnik rozszerzenia  $k = 2.007$  oraz  $k = 1.96$ . Stąd wybieramy wartość większą i wyznaczamy **niepewność rozszerzoną**:

$$U(E) = 10.54 + 0.015 \cdot L [\mu\text{m}]$$

Na poniższym diagramie zaznaczamy za normą [N6] punkty reprezentujące wartości błędu wskazania E (uzyskane ze wszystkich ustawień wzorca płytowego), linie przedstawiające MPE oraz umieszczone na tych liniach znaczniki obrazujące niepewność błędu wskazania U(E).



Wykres 12.19. Niepewność błędu wskazania wyznaczona przy użyciu wzorca płytowego

### 12.2.3. Wyznaczenie MPE przy użyciu wzorca hantle

Wzorzec o odległości nominalnej środków kul wynoszącej  $L = 197.593$  [mm] został zmierzony skorygowanym już pod względem dokładności skanerem w 51 ustawieniach. Wzorzec był mierzony wzdłuż osi  $X$  i  $Y$  na różnych głębokościach i wysokościach oraz po skosach, tak aby możliwie gęsto wypełnić przestrzeń roboczą skanera. Ustawienia wzorca oraz graficzna reprezentacja wyników zostały zaprezentowane na wykresach 12.19, 12.20, 12.21.



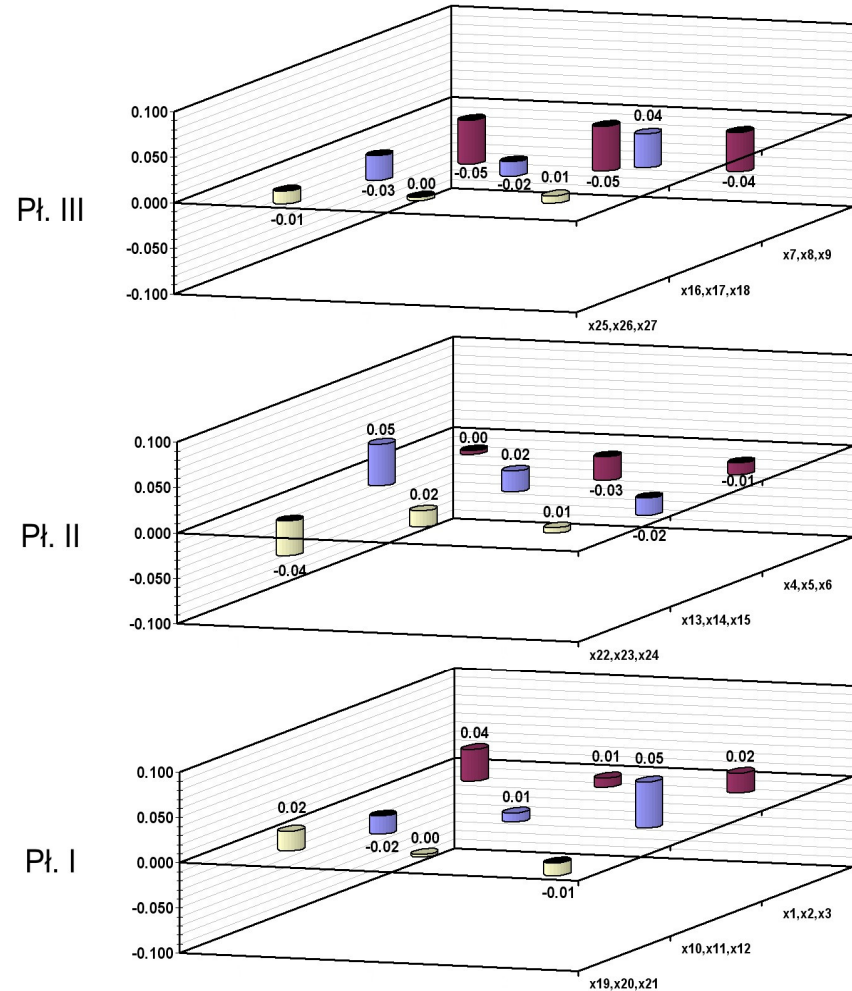
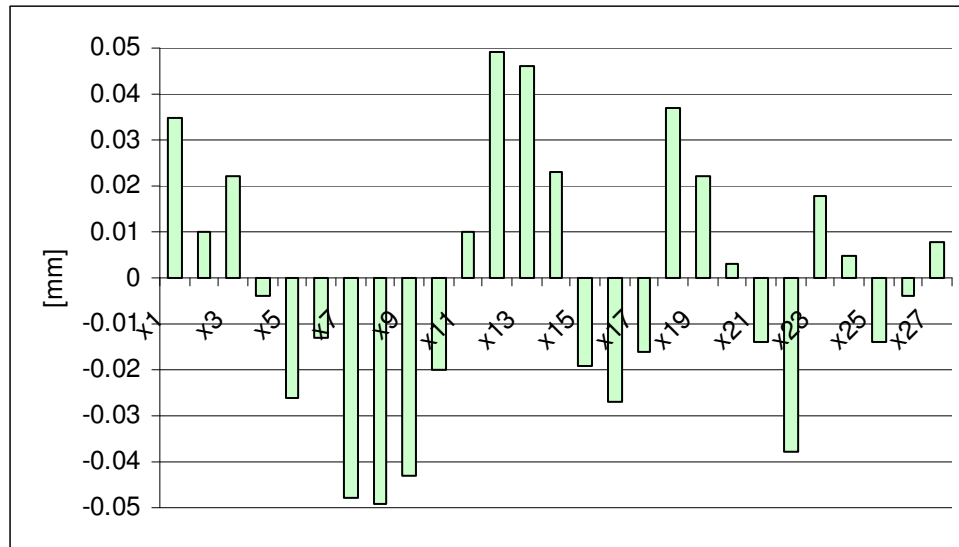
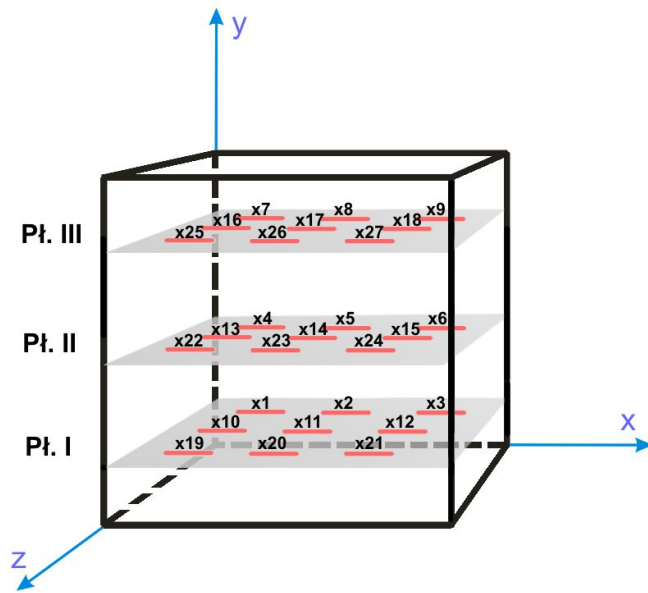
Rys.12.10. Fotografia wzorca hantle

Poniższa tabela ukazuje uzyskane odchyłki od wartości nominalnej dla różnych pozycji.

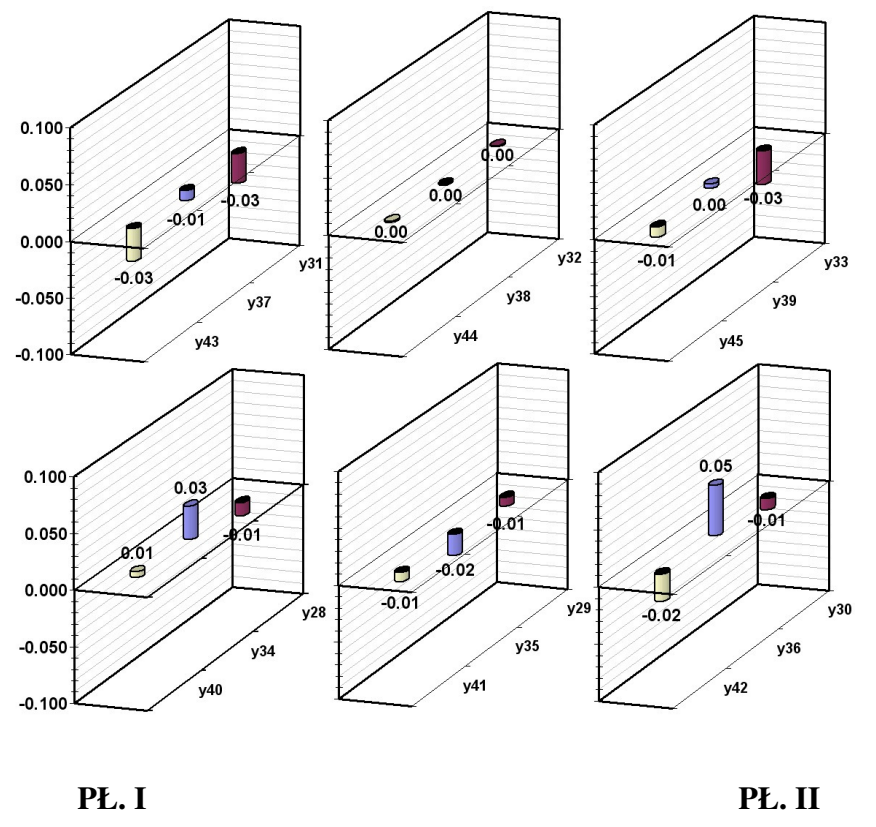
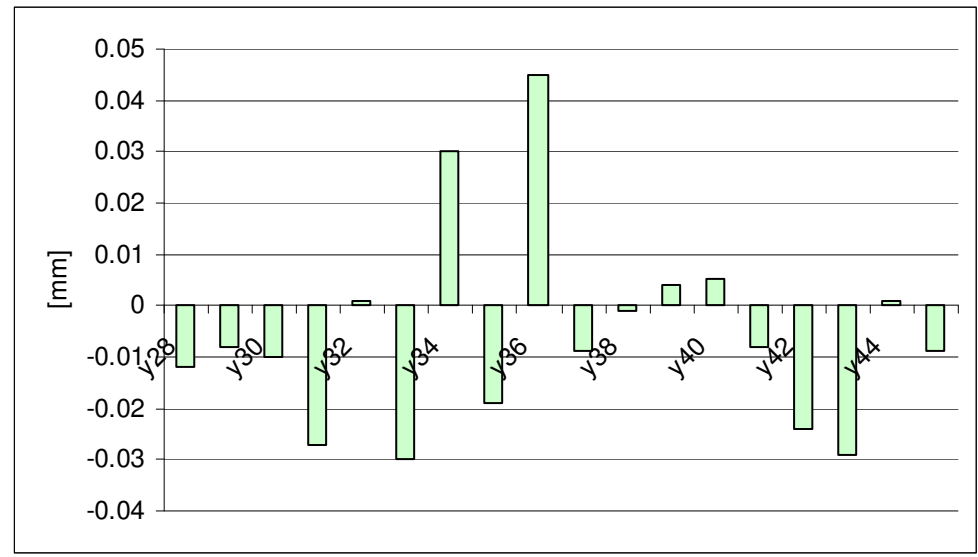
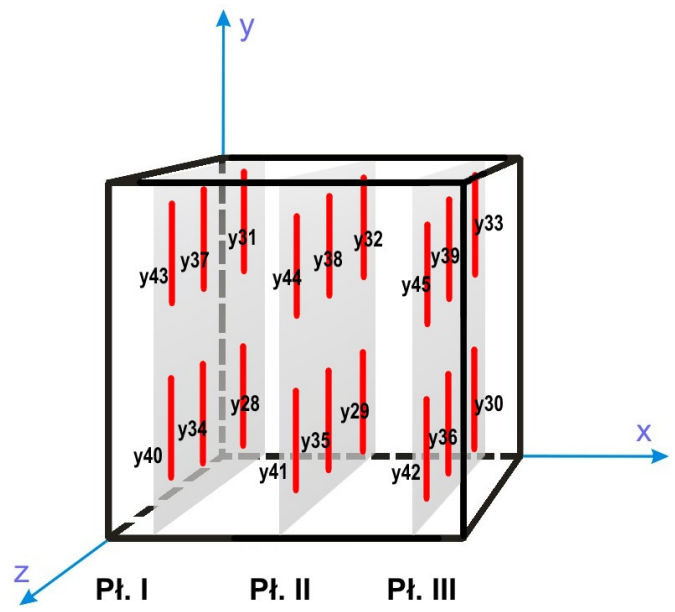
Tabela 12.8. Rezultat pomiaru wzorca

Pozycje hantli w osi X	Odchyłka długości [mm]	Pozycje hantli w osi Y	Odchyłka długości [mm]
x1	0.035	y28	-0.012
x2	0.010	y29	-0.008
x3	0.022	y30	-0.010
x4	-0.004	y31	-0.027
x5	-0.026	y32	0.001
x6	-0.013	y33	-0.030
x7	-0.048	y34	0.030
x8	-0.049	y35	-0.019
x9	-0.043	y36	0.045
x10	-0.020	y37	-0.009
x11	0.010	y38	-0.001
x12	0.051	y39	0.004
x13	0.046	y40	0.005
x14	0.023	y41	-0.008
x15	-0.019	y42	-0.024
x16	-0.027	y43	-0.029
x17	-0.016	y44	0.001
x18	0.037	y45	-0.009
x19	0.022	s46	0.037
x20	0.003		
x21	-0.014		
x22	-0.038	Pozycje hantli w przestrzeni XYZ	
x23	0.018	s47	-0.042
x24	0.006	s48	-0.023
x25	-0.014	s49	0.018
x26	-0.004	s50	0.043
x27	0.008	s51	-0.045

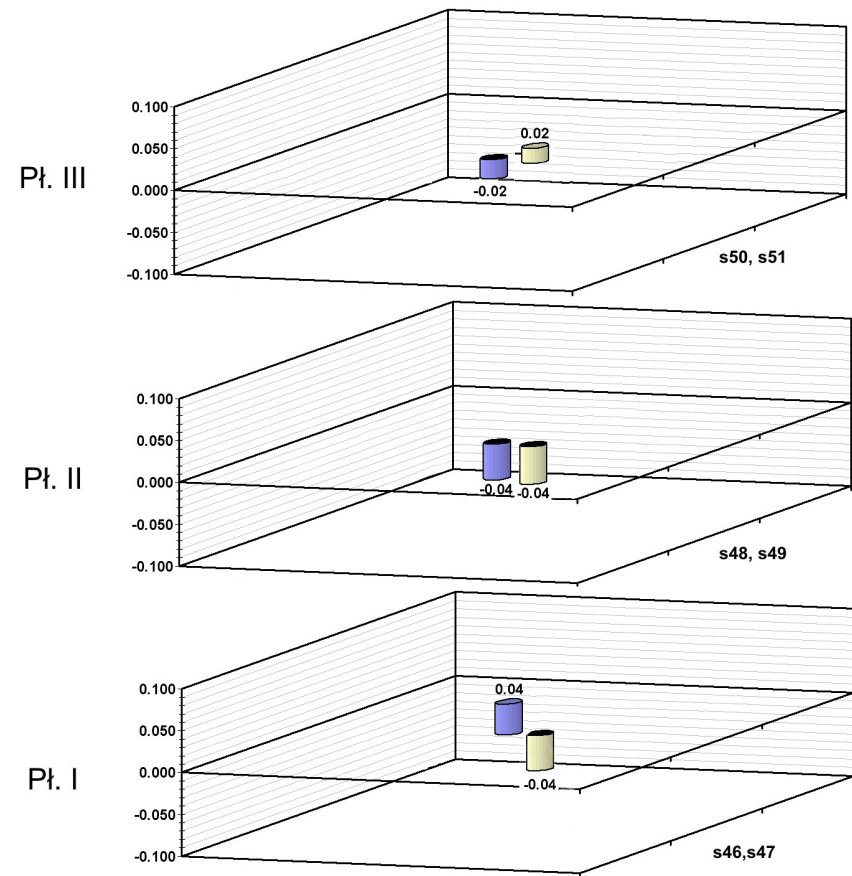
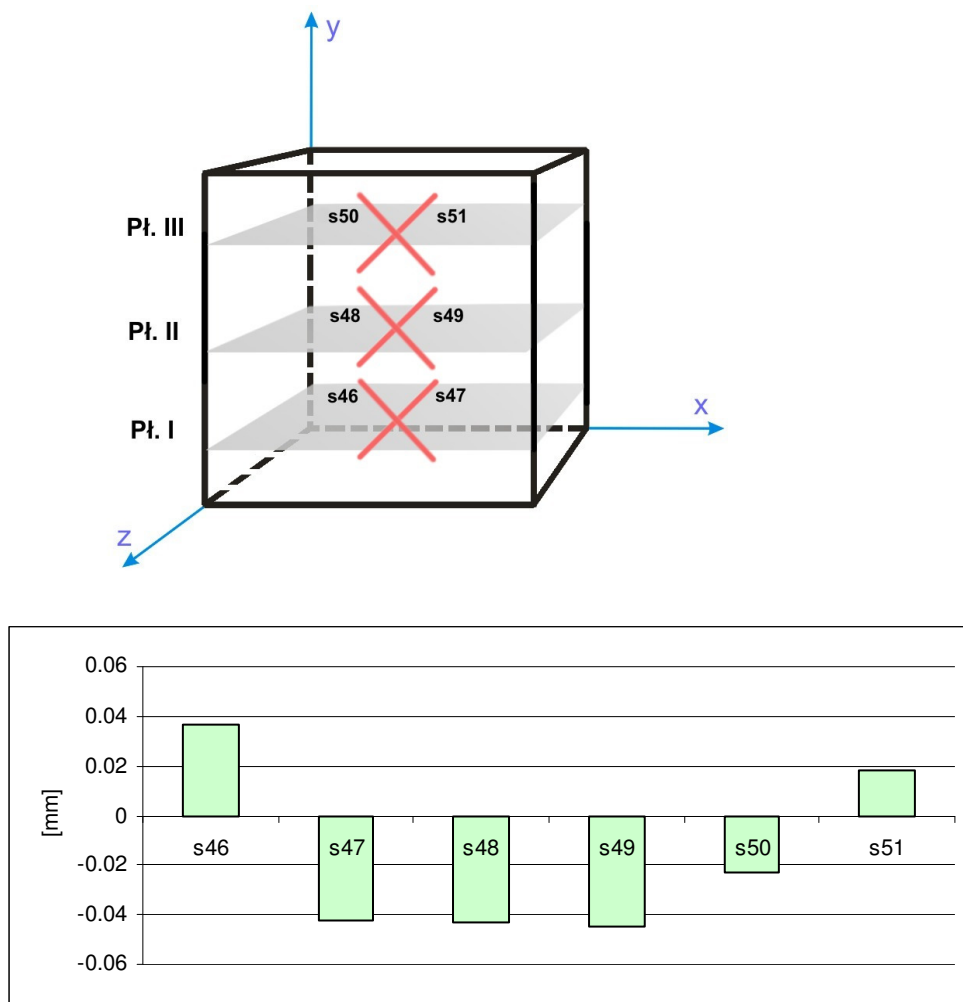




Wykres 12.20. Ustawienia wzorca wzdłuż osi X wraz z wizualizacją odchylek



Wykres 12.21. Ustawienia wzorca wzdłuż osi Y wraz z wizualizacją odchylek



Wykres 12.22. Ustawienia wzorca w przestrzeni XYZ wraz z wizualizacją odchylek

Analizując otrzymane wyniki można stwierdzić, że maksymalna wartość błędu nie przekracza 50 [ $\mu\text{m}$ ]. Jest to wynik zgodny z MPE wyznaczonym przez wzorec płytkowy dla tej odległości.

## 12.4. Niepewność systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca typu hantle

### 12.4.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru $u(\delta_{rep})$ (przy pomiarze długości)

Hantle w każdym z 51 ustawień były mierzone trzykrotnie. Stąd korzystając ze wzoru (11.5) oraz (11.6) wyznaczamy niepewność  $u(\delta_{rep})$ :

$$u(\delta_{rep}) = 2.1 [\mu\text{m}]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(\delta_{rep})$  została wyznaczona dla 153 powtórzeń w 51 niezależnych próbach, dlatego też:

$$v_i = 153 - 51 = 102.$$

### 12.4.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych $u(\delta_{ukl})$

Niepewność ta wyliczona w punkcie 12.2.2. wynosi:

$$u(\delta_{ukl}) = 1.86 + 0.0036 \cdot L [\mu\text{m}]$$

Dla  $L = 197.593$  [mm] niepewność wyznaczenia układu wynosi:

$$u(\delta_{ukl}) = 2.57 [\mu\text{m}]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody wynosi

Dla  $L = 197.593$  [mm]:

$$v_{eff} u(\delta_{ukl}) = \frac{2.57^4}{\frac{2.47^4}{58157782.52} + \frac{0.61^4}{16}} = 5040.82$$

### 12.4.3. Niepewność wzorcowania wzorca typu hantle $u(\delta_w)$

#### *Niepewność pomiaru wzorca $u(P_w)$*

Hantle zmierzono pięciokrotnie w czterech ustawieniach w płaszczyźnie XY. Poniższa tabela prezentuje wyniki.

Tabela 12.9. Rezultat pomiaru odległości środków kul hantli w [mm]

	Orientacja 1	Orientacja 2	Orientacja 3	Orientacja 4
cykl 1	197.5303	197.5287	197.5278	197.5297
cykl 2	197.5301	197.5286	197.5278	197.5297
cykl 3	197.5308	197.5288	197.5277	197.5296
cykl 4	197.5301	197.5286	197.5278	197.5296
cykl 5	197.5303	197.5284	197.5278	197.5296
<b>Wartość średnia</b>	<b>197.5303</b>	<b>197.5286</b>	<b>197.5278</b>	<b>197.5296</b>
<b>Odchylenie standardowe [mm]</b>	<b>0.00027</b>	<b>0.00014</b>	<b>0.00004</b>	<b>0.00005</b>

Otrzymano niepewności:

$$u_{rep} = 0.07 [\mu m]$$

$$u_{geo} = 0.56 [\mu m]$$

Stąd stosując wzór (11.18) wyliczamy:

$$u(P_w) = 0.56 [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

Dla  $v_i(u_{rep}) = 5 - 1 = 4$ , a dla  $v_i(u_{geo}) = 4 - 1 = 3$  stąd korzystając ze wzoru Welch-Satterthwaite'a obliczamy:

$$v_{eff}(P_w) = \frac{0.56^4}{\frac{0.07^4}{4} + \frac{0.56^4}{3}} = 3$$

**Niepewność maszyny referencyjnej  $u(PMM)$**

Niepewności  $u(PMM)$  wynosi:

$$u(PMM) = 1.76 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

Dla  $L = 197.593$  [mm]:

$$u(PMM) = 2.47 [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

Przyjmując  $L = 197.593$  [mm] liczba stopni swobody dla tej niepewności wynosi:

$$v_{eff}u(PMM) = \frac{2.47^4}{\frac{0.04^4}{4}} = 58157782.52$$

**Niepewność powłoki antyrefleksyjnej  $u(P_{aref})$**

Niepewność ta została wyznaczona w punkcie 12.2.3 i wynosi:

$$u(P_{aref}) = 2 [\mu m]$$

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

$v_i \rightarrow \infty$  czyli  $1/v_i \rightarrow 0$ .

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru 11.17 otrzymujemy ostateczną niepewność wzorca typu hantle w postaci:

$$u(\delta_w) = 2.72 + 0.0036 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Dla  $L = 197.593$  [mm]:

$$u(\delta_w) = 3.43 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody niepewności wzorców wynosi więc:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{3.43^4}{\frac{0.56^4}{3} + \frac{2.47^4}{58157782.52}} = 4222.18$$

#### **12.4.4. Niepewność wpływu temperatury $u(\delta_{temp})$**

Pomiar temperatury hantli podczas wzorcowania i pomiaru odbył się przy użyciu czujników Ntc. Różnica temperatur nie wyszła poza 1.5 [°C]. Odchyłki graniczne współczynnika rozszerzalności cieplnej wynoszą dla stalowego przedmiotu  $\alpha_{\text{st}} = 1.5 \cdot 10^{-6}$  [1/°C]. Podstawiając poszczególne wartości wpływów do zależności (11.37), otrzymujemy ostatecznie:

$$u(\delta_{temp}) = 0.01 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

*Tabela 12.10. Budżet niepewności dla poprawki temperaturowej przy pomiarze hantli*

<b>Symbol wielkości <math>X_i</math></b>	<b>Estymata wielkości <math>x_i</math></b>	<b>Rozkład prawdopodobieństwa</b>	<b>Niepewność standardowa <math>u(x_i)</math></b>
$\Delta T_w$	1.5 [°C]	prostokątny	0.87 [°C]
$\alpha_w$ (dla stali)	$(11.5 \pm 1.5) \cdot 10^{-6}$ [1/°C]	prostokątny	$0.87 \cdot 10^{-6}$ [1/°C]
$\Delta T_{Ter}$	-	prostokątny	0.059 [°C]
$\delta_{temp}$	-	-	<b>0.01 · L [μm]</b>
$L$	197.593 [mm]	-	<b>1.97 [μm]</b>

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(T_{kal})$  została określona bazując na danych wyznaczonych metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$  czyli:

$$v_{effT} = \frac{1.97^4}{\infty} = 0.$$

#### 12.4.5. Niepewność kalibracji systemu optycznego $u(\delta_{kal})$

##### *Niepewność wzorcowania wzorca płytowego $u(\delta_w)$*

Niepewność wzorca płytowego została wyliczona w punkcie 12.2.3 i wynosi:

$$u(\delta_{wp}) = 2.68 + 0.0036 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody wynosi

Dla  $L = 197.593$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{3.39^4}{\frac{0.32^4}{4.32} + \frac{2.47^4}{58157782.52}} = 54396.15$$

##### *Niepewność temperaturowa dla procesu kalibracji $u(T_{kal})$*

$$u(T_{kal}) = 0.0012 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(T_{kal})$  została określona bazując na danych wyznaczonych metodą typu B, dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$  czyli  $v_{effT} = \frac{0.24^4}{\infty} = 0$ .

##### *Niepewność stołu przesuwnego WMP $u(P_x)$*

Równanie niepewności stołu przesuwnego wynosi:

$$u(P_x) = 1.32 + 0.0054 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni wynosi

Dla  $L = 197.593$  [mm]:

$$v_{eff}(P_x) = \frac{2.39^4}{\frac{0.088^4}{2}} = 1088155.37$$

Składając powyższe niepewności, niepewność poprawki na kalibrację systemu optycznego  $u(\delta_{kal})$  przybiera postać:

$$u(\delta_{kal}) = 3.64 + 0.0055 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Dla  $L = 197.593$  [mm]:

$$u(\delta_{kal}) = 4.73 \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody dla poprawki na kalibrację sytemu optycznego

$$v_{eff}(\delta_{kal}) = \frac{4.73^4}{\frac{3.39^4}{54396.15} + \frac{2.39^4}{1088155.37}} = 203649.42$$

Poniższa tabela prezentuje poszczególne wartości wpływów dla niepewności systemu hybrydowego.

*Tabela.12.11. Budżet niepewności systemu hybrydowego dla pomiaru wzorca typu hantle*

<b>Składowa niepewności</b>	$c_i \left( \frac{\partial l_{sh}}{\partial x_i} \right)$	<b>Udział w złożonej niepewności standardowej</b>
$u(\delta_{rep})$	1	2.1 [ $\mu m$ ]
$u(\delta_{ukl})$	1	2.57 [ $\mu m$ ]
$u(\delta_w)$	-1	3.43 [ $\mu m$ ]
$u(\delta_{temp})$	1	1.97 [ $\mu m$ ]
$u(\delta_{kal})$	1	4.73 [ $\mu m$ ]
<b><math>u(E)</math></b>		<b>7.00 [<math>\mu m</math>]</b>

Ostatecznie **niepewność złożona** błędu wskazania systemu hybrydowego, wyznaczona przy użyciu hantli wynosić będzie:

$$u(E) = 7.00 [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

$$v_{eff}(E) = \frac{7^4}{\frac{2.1^4}{102} + \frac{2.57^4}{5040.82} + \frac{3.43^4}{4222.18} + \frac{4.73^4}{203649.42}} = 10177.73$$

Wartość tę obcinamy do najbliższej mniejszej liczby całkowitej przyjmując  $v_{eff} = 10177$  następnie korzystając z tablicy kwantyli rozkładu  $t - Studenta$  otrzymujemy współczynnik rozszerzenia  $k = 1.96$ . Stąd **niepewność rozszerzona** błędu wskazania systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca typu hantle wynosi:

$$U(E) = 13.72 [\mu m]$$

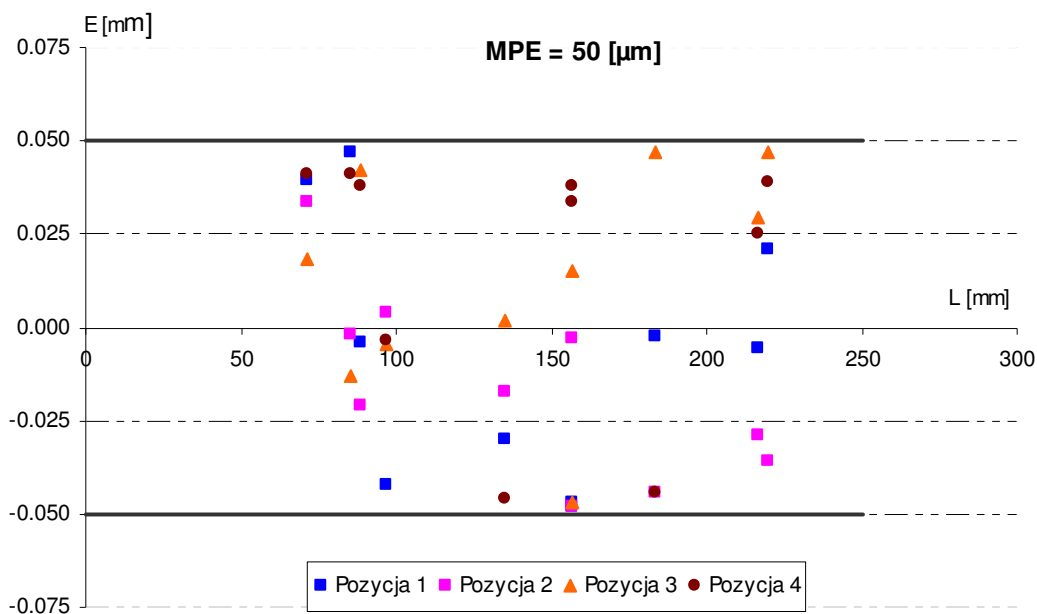


## 12.5. Wyznaczenie MPE przy użyciu wzorca słupkowego.

Wzorzec słupkowy pozwala na wyznaczenie MPE dla niepewności trójwymiarowej. Został on zmierzony trzykrotnie w czterech orientacjach (obrót co 90°). Uzyskane odchyłki od wartości wzorcowej w każdej pozycji oraz wyznaczony dla nich obszar dopuszczalnych błędów granicznych przedstawia wykres 12.23.



Rys.12.11. Wzorzec słupkowy – widok ogólny



Wykres 12.23. Obszar błędów granicznych wyznaczony przy użyciu wzorca słupkowego

Otrzymano następujące równanie błędów granicznych:

$$MPE = \pm 50 [\mu m]$$

## 12.6. Niepewność systemu hybrydowego wyznaczona przy użyciu wzorca słupkowego

### 12.6.1. Niepewność związana z powtarzaniem pomiaru $u(\delta_{rep})$ (przy pomiarze długości)

Niepewność  $u(\delta_{rep})$  wynosi:

$$u(\delta_{rep}) = 2.81 [\mu m]$$

Wartość ta jest maksymalną wartością uzyskaną dla wszystkich spośród dziesięciu wyznaczonych odległości.

Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(\delta_{rep})$  została wyznaczona dla 12 powtórzeń w 4 niezależnych próbach, dlatego też:

$$v_i = 12 - 4 = 8$$

### 12.6.2. Niepewność wyznaczenia układu współrzędnych $u(\delta_{ukl})$

Niepewność ta wynosi:

$$u(\delta_{ukl}) = 1.86 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody wynosi

Dla  $L = 0$  [mm]:

$$v_{eff} u(\delta_{ukl}) = \frac{1.86^4}{\frac{1.76^4}{14992384} + \frac{0.61^4}{16}} = 1382.99$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

$$v_{eff} u(\delta_{ukl}) = \frac{4.67^4}{\frac{4.57^4}{681529762} + \frac{0.61^4}{16}} = 54958.65$$

### 12.6.3. Niepewność wzorcowania wzorca słupkowego $u(\delta_w)$

*Niepewność pomiaru wzorca słupkowego  $u(P_w)$*

Worzec słupkowy wzorcowano w czterech ustawieniach w płaszczyźnie XY w cyklu pięciokrotnym.

Otrzymano niepewności:

$$u_{rep} = 0.09 [\mu m]$$

$$u_{geo} = 0.26 [\mu m]$$

i ostatecznie:

$$u(P_w) = 0.28 [\mu m]$$

Wartość ta jest maksymalną wartością uzyskaną dla wszystkich odległości.

Wypadkowa liczba stopni swobody

Dla  $v_i(u_{rep}) = 5 - 1 = 4$ , a dla  $v_i(u_{geo}) = 4 - 1 = 3$  stąd korzystając ze wzoru Welch-Satterthwaite'a obliczamy:

$$v_{eff}(P_{wo}) = \frac{0.28^4}{\frac{0.09^4}{4} + \frac{0.26^4}{3}} = 3.99$$

***Niepewność maszyny referencyjnej  $u(PMM)$***

Niepewności  $u(PMM)$  wynosi:

$$u(PMM) = 1.76 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody dla niepewności PMM wynosi

Dla  $L = 0$  [mm]:

$$v_{eff}u(PMM) = \frac{1.76^4}{0.04^4} = 14992384$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

$$v_{eff}u(PMM) = \frac{4.57^4}{0.04^4} = 681529762$$

***Niepewność powłoki antyrefleksyjnej  $u(P_{aref})$***

Niepewność ta wynosi:

$$u(P_{aref}) = 2 [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

$v_i \rightarrow \infty$  czyli  $1/v_i \rightarrow 0$ .

Podstawiając odpowiednie wartości do wzoru  $u(\delta_w)$  otrzymujemy ostateczną niepewność wzorców w postaci:

$$u(\delta_w) = 2.69 + 0.0036 \cdot L [\mu m]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody niepewności wzorca wynosi więc:

Dla  $L = 0$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{2.69^4}{\frac{0.28^4}{3.99} + \frac{1.76^4}{14992384}} = 33975.78$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{5.50^4}{\frac{0.28^4}{3.99} + \frac{4.57^4}{681529762.52}} = 504504.52$$

#### 12.6.4. Niepewność wpływu temperatury $u(\delta_{temp})$

Pomiar temperatury wzorca słupkowego podczas wzorcowania i pomiaru odbył się przy użyciu czujników Ntc. Różnica temperatur wzorca nie przekroczyła  $1.2$  [ $^{\circ}\text{C}$ ]. Podstawa wzorca oraz słupki do mocowania kul są wykonane z żeliwa szarego. Odchyłki graniczne współczynnika rozszerzalności cieplnej wynoszą dla żeliwa szarego  $a_{\alpha_w} = 2.2 \cdot 10^{-6}$  [ $1/^{\circ}\text{C}$ ].

Tabela 12.12. Budżet niepewności dla poprawki temperaturowej dla wzorca słupkowego

Symbol wielkości $X_i$	Estymata wielkości $x_i$	Rozkład prawdopodobieństwa	Niepewność standardowa $u(x_i)$
$\Delta T_w$	$1.2$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]	prostokątny	$0.69$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$\alpha_w$	$(11 \pm 2.2) \cdot 10^{-6}$ [ $1/^{\circ}\text{C}$ ]	prostokątny	$1.3 \cdot 10^{-6}$ [ $1/^{\circ}\text{C}$ ]
$L$	$71 - 220$ [mm]	-	$0.56 - 1.74$ [ $\mu\text{m}$ ]
$\delta_{temp}$	-	-	<b><math>0.008 \cdot L</math></b> [ $\mu\text{m}$ ]

Podstawiając poszczególne wartości powyższej tabeli do zależności (11.37), otrzymujemy ostatecznie:

$$u(\delta_{temp}) = 0.008 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

<b>L[mm]</b>	71	85	89	96	135	156	183	216	220
<b>u(<math>\delta_{temp}</math>) [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	0.56	0.67	0.70	0.76	1.07	1.23	1.45	1.71	1.74

#### Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(T_{kal})$  została określona bazując na danych wyznaczonych metodą typu  $B$ , dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$  czyli:

$$v_{effT} = \frac{0.008 \cdot L^4}{\infty} = 0.$$

### 12.6.5. Niepewność kalibracji systemu optycznego $u(\delta_{kal})$

#### *Niepewność wzorcowania wzorca płytowego $u(\delta_w)$*

Niepewność wzorca płytowego została wyliczona w punkcie 12.2.3 i wynosi:

$$u(\delta_{wp}) = 2.68 + 0.0036 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody niepewności wzorców wynosi więc:

Dla  $L = 0$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{2.68^4}{\frac{0.32^4}{4.32} + \frac{1.76^4}{14992384}} = 21247.53$$

Dla  $L = 780$  [mm]:

$$v_{eff}(\delta_w) = \frac{5.49^4}{\frac{0.32^4}{4.32} + \frac{4.57^4}{681529762.52}} = 374161.17$$

#### *Niepewność temperaturowa dla procesu kalibracji $u(T_{kal})$*

$$u(T_{kal}) = 0.0012 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

Niepewność  $u(T_{kal})$  została określona bazując na danych wyznaczonych metodą typu  $B$ , dlatego też liczba stopni swobody dąży do nieskończoności  $v_i \rightarrow \infty$  czyli  $v_{effT} = \frac{0.0012 \cdot L^4}{\infty} = 0$ .

#### *Niepewność stołu przesuwnego WMP $u(P_x)$*

Niepewność stołu przesuwnego wynosi:

$$u(P_x) = 1.32 + 0.0054 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody dla niepewności stołu

Dla  $L=0$  [mm]:

$$v_{eff}(P_x) = \frac{1.32^4}{\frac{0.088^4}{2}} = 101250$$

Dla  $L=780$  [mm]:

$$v_{eff}(P_x) = \frac{5.52^4}{\frac{0.088^4}{2}} = 30963897.27$$

Uwzględniając powyższe niepewności, niepewność poprawki na kalibrację systemu optycznego  $u(\delta_{kal})$  przybiera postać:

$$u(\delta_{kal}) = 3.64 + 0.0055 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody dla poprawki na kalibrację sytemu optycznego

Dla L=0 [mm]:

$$v_{eff}(\delta_{kal}) = \frac{3.64^4}{\frac{2.68^4}{21247.53} + \frac{1.32^4}{10250}} = 71423.99$$

Dla L=780 [mm]

$$v_{eff}(\delta_{kal}) = \frac{7.93^4}{\frac{5.49^4}{374161.17} + \frac{5.52^4}{333506794.84}} = 1608908.56$$

Poniższa tabela prezentuje poszczególne wartości wpływów dla niepewności systemu hybrydowego.

*Tabela.12.13. Budżet niepewności systemu hybrydowego dla pomiaru wzorca słupkowego*

<b>Składowa niepewności</b>	$c_i \left( \frac{\partial l_{sh}}{\partial x_i} \right)$	<b>Udział w złożonej niepewności standardowej</b>
$u(\delta_{rep})$	1	2.81 [μm]
$u(\delta_{ukl})$	1	1.86 + 0.0036 · L [μm]
$u(\delta_w)$	-1	2.69 + 0.0036 · L [μm]
$u(\delta_{temp})$	1	0.008 · L [μm]
$u(\delta_{kal})$	1	3.64 + 0.0055 · L [μm]
<b><math>u(E)</math></b>		<b>5.64 + 0.011 · L [μm]</b>

Ostatecznie **niepewność złożona** błędu wskazania systemu hybrydowego, wyznaczona przy użyciu wzorca słupkowego wynosi:

$$u(E) = 5.64 + 0.011 \cdot L \text{ } [\mu\text{m}]$$

Wypadkowa liczba stopni swobody

Dla L=0 [mm]:

$$v_{eff}(E) = \frac{5.64^4}{\frac{2.81^4}{8} + \frac{1.86^4}{1382.99} + \frac{2.69^4}{33975.78} + \frac{3.64^4}{71423.99}} = 129.62$$

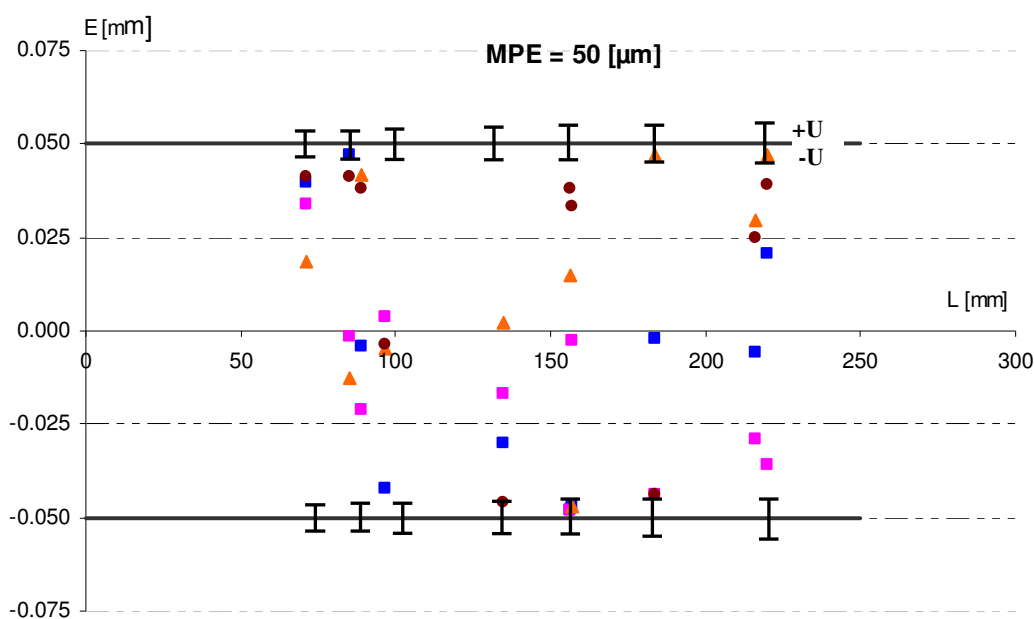
Dla  $L=780$  [mm]:

$$v_{eff}(E) = \frac{14.19^4}{\frac{2.81^4}{16} + \frac{4.67^4}{54958.65} + \frac{5.50^4}{504504.52} + \frac{7.93^4}{1608908.56}} = 5193.67$$

Wartości te obcinamy do najbliższej mniejszej liczby całkowitej przyjmując  $v_{eff} = 129$  oraz  $v_{eff} = 5193$  następnie korzystając z tablicy kwantyli rozkładu  $t - Studenta$  otrzymujemy odpowiednio współczynnik rozszerzenia  $k = 1.98$  oraz  $k = 1.96$ . Stąd wybieramy wartość większą i wyznaczamy **niepewność rozszerzoną** błędu wskazania systemu hybrydowego uzyskaną przy użyciu wzorca słupkowego:

$$U(E) = 11.17 + 0.022 \cdot L [\mu m]$$

Na poniższym wykresie w postaci punktów zostały naniesione wartości błędu wskazania  $E$  uzyskane ze wszystkich ustawień wzorca słupkowego, linie reprezentujące MPE oraz umieszczone na tych liniach znaczniki przedstawiające niepewność błędu wskazania  $U(E)$ .



Wykres12.24. Niepewność błędu wskazania wyznaczona przy użyciu wzorca słupkowego

### 12.6.6. Podsumowanie

Zastosowanie wzorców o różnych wymiarach i geometrii pozwoliło zweryfikować zbudowany model niepewności i porównać uzyskane rezultaty w zakresie wyznaczonego maksymalnego błędu wskazania i równania niepewności.

Porównując równania błędów granicznych systemu dla przypadku trójwymiarowego wyznaczone przy użyciu wzorca płytowego ( $MPE = \pm 45 + 0.07 \cdot L [\mu m]$ ) i wzorca słupkowego ( $MPE = \pm 50 [\mu m]$ ) otrzymujemy zbliżone rezultaty, z tym że równanie błędów granicznych systemu wyznaczone przy użyciu wzorca słupkowego nie jest zależne od długości. Należy jednak zauważyć (patrz wykresy 12.13–12.16), że w zakresie od 0 do 220 [mm] czyli dla maksymalnej długości możliwej do zbadania przez wzorzec słupkowy, równanie dla przypadku trójwymiarowego wyznaczone przez wzorzec płytowy również nie jest zależne od mierzonej długości.

Maksymalna wartość błędu granicznego wyznaczona przy użyciu wzorca typu hantle dla jego odległości wzorcowej  $L = 197.593$  nie przekracza 50 [ $\mu m$ ]. Jest to wynik zgodny z MPE wyznaczonym przez wzorzec płytowy i słupkowy dla tej odległości.

Wartość maksymalnego błędu granicznego, wyznaczona przy użyciu różnych wzorców, nie przekroczyła wartości 0.05 [mm] dla pomiaru z jednego kierunku obejmującego 200 [mm] karoserii, co jest zgodne z wymogami przemysłowymi. Dlatego też można uznać, że zbudowany system hybrydowy można stosować do pomiarów przemysłowych (w tym karoserii samochodowej).

Niepewność złożona i rozszerzona błędu wskazania systemu hybrydowego, wyznaczona przy użyciu wzorca płytowego wynosi odpowiednio:

$$u(E) = 5.25 + 0.0075 \cdot L [\mu m], \quad U(E) = 10.54 + 0.015 \cdot L [\mu m]$$

Są to wartości bardzo zbliżone do wartości uzyskanych przy użyciu wzorca słupkowego:

$$u(E) = 5.64 + 0.011 \cdot L [\mu m] \quad U(E) = 11.17 + 0.022 \cdot L [\mu m]$$

Niepewność złożona i rozszerzona błędu wskazania systemu hybrydowego, wyznaczona przy użyciu wzorca typu hantle wynosi odpowiednio:

$$u(E) = 7.00 [\mu m], \quad U(E) = 13.72 [\mu m]$$

Podstawiając wartość  $L = 197.593$  [mm] (długość wzorcowa hantli) do równania niepewności złożonej i rozszerzonej wyznaczonej przy użyciu wzorca płytowego otrzymujemy bardzo zbliżone wyniki:

$$u(E) = 6.73 [\mu m], \quad U(E) = 13.50 [\mu m]$$

Dla pomiarów różnych wzorców uzyskano bardzo podobne równania niepewności co świadczy o poprawność przyjętego modelu wzorcowania systemu hybrydowego.



## 13. Wnioski

Przeprowadzone rozważania teoretyczne oraz wyniki zrealizowanych w ramach tej pracy badań pozwalają na sformułowanie wniosków, które zostały podzielone na poznawcze i utylitarne.

### Poznawcze

1. Aktualny stan rozwoju współrzędnościowej techniki pomiarowej nie pozwala na takie skrócenie czasu pomiaru stykowego (przy zachowaniu jego dokładności), aby możliwa była 100 % kompleksowa kontrola wymiarowa obiektów wielkogabarytowych (np. karoserii samochodu).
2. Metody optyczne ze względu na: pomiar bezkontaktowy, krótki czas pozyskiwania danych, mobilność jak również niższy koszt są coraz częściej stosowane, jednakże ograniczeniem jest ich dokładność i brak uznanych metod wzorcowania pozwalających na ocenę niepewności przeprowadzanych pomiarów.
3. Spośród przeanalizowanych systemów optycznych metoda projekcji światła strukturalnego najlepiej rokuje na spełnienie wymogów współczesnego przemysłu to jest: szybkiego, kompleksowego i dokładnego pomiaru dużych obiektów.
4. Różnorodność struktur systemów optycznych oraz metod pozyskiwania danych powoduje, że brak jest standardowych procedur kalibracji tych systemów, pozwalających na porównanie ich dokładności z systemami współrzędnościowymi.
5. Charakterystyczny dla systemów optycznych problem z wyznaczeniem krawędzi, utrudnia prawidłowe wyznaczenie układu współrzędnych związanego z obiektem. Błędy pomiaru są znacznie mniejsze gdy do budowy układu lokalnego zastosuje się metodą stykową. Istnieje więc możliwość podwyższenia dokładności sytemu optycznego poprzez transpozycję układu pomiędzy systemami.
6. Możliwa jest integracja układów współrzędnościowej maszyny pomiarowej i skanera optycznego w system hybrydowy poprzez budowę układu współrzędnych związanego z przedmiotem w oparciu o pomiary stykowe, a następnie realizację pomiaru z wykorzystaniem sytemu optycznego. Konieczne jest jednak opracowanie metodyki wzorcowania takiego sytemu hybrydowego.

7. Transformacja wyników pomiarów optycznych do klasycznego oprogramowania stosowanego do pomiarów wielkości geometrycznych pozwala na opracowywanie wyników przy użyciu zestawu algorytmów certyfikowanego oprogramowania metrologicznego.
8. Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz stwierdzono, że dla oceny dokładności skanera, w warunkach najbardziej zbliżonych do warunków jego stosowania, konieczny jest wzorzec przestrzenny, składający się z elementów powtarzalnych o stałej i dużej krzywiznie.
9. Pomiary weryfikacyjne potwierdziły prawidłowość przyjętego modelu wzorcowania systemu hybrydowego i metoda ta może mieć zastosowanie do wzorcowania innych systemów optycznych stosowanych w optycznych pomiarach współrzędnościowych. Z uwagi na zastosowane wzorce możliwe jest też porównywanie dokładności z pomiarami stykowymi.
10. Zastosowanie systemu przestawiania wzorca umożliwia wzorcowanie, a potem sprawdzenie dokładności systemu hybrydowego w całym jego zakresie pomiarowym.
11. Przeprowadzone badania nad dokładnością systemu dla wzorców umieszczanych w różnych położeniach potwierdziły skuteczność doboru współczynnika korekcji dla systemu optycznego.
12. Błędy pomiaru narastają wraz ze zwiększeniem kąta skręcenia wzorca względem układu optycznego, dlatego też przy budowie systemu przemysłowego należy opracować układ wielu skanerów optycznych pokrywających cały badany obiekt.

## **Utylitarne**

1. Dla przemysłu samochodowego wymagana jest dokładność pomiaru, której miarą jest obszar niepewności  $\pm 0.05$  [mm] dla pomiarów do 200 [mm] badanej karoserii, dla pomiaru do 1 [m] wymaga się niepewności  $\pm 0.5$  [mm]. Wynika z tego, że zbudowany system hybrydowy można stosować do zadań pomiaru karoserii, gdyż jego maksymalny błąd graniczny nie przekroczył wartości 0.05 [mm] dla pomiaru z jednego kierunku obejmującego 200 [mm] karoserii.
2. Jednym z głównych czynników niepewności systemu jest jego powtarzalność, można ją zwiększyć poprzez projekcję większej ilości obrazów rastrowych, aczkolwiek wydłuża to

czas pomiaru i proces przetwarzania danych. Dlatego należy dążyć np. do skrócenia czasu ekspozycji poprzez konieczną modyfikację systemu optycznego.

3. Błędy wskazania systemu są mniejsze dla kąta skręcenia mierzonego wzorca do  $30^\circ$  w stosunku do skanera (patrz załącznik D) dlatego też należy mierzyć obiekt w pozycji w przybliżeniu prostopadłej do osi optycznej kamery.
4. Zastosowanie mechanizmu korekcji optycznej daje możliwość podniesienia dokładności pomiaru systemem hybrydowym. Współczynniki korekcji dokładności systemu należy dobrać doświadczalnie.
5. Stosowanie powłoki antyrefleksyjnej na obiekcie mierzonym znacznie zmniejsza odchyłki średnicy kuli.
6. Możliwe jest przejście punktów pomiarowych uzyskanych przez system skanera optycznego przez oprogramowanie metrologiczne (np. PC - DMIS) stosowane w typowych pomiarach współrzędnościowych.
7. Istnieją trudności przy wczytywaniu do programu PC – DMIS większej ilości punktów pomiarowych (ponad 100 tys.) w czasie rzeczywistym. Konieczna jest więc modyfikacja akwizycji danych dla oprogramowania metrologicznego stosowanego do systemu hybrydowego.

## 14. Podsumowanie i kierunki dalszych badań

Nieustanny postęp w technikach wytwarzania szczególnie w przemyśle samochodowym, pociąga za sobą konieczność doskonalenia ich kontroli wymiarowej. Współczesna metrologia wymaga więc systemów charakteryzujących się przede wszystkim szybkością identyfikacji punktów pomiarowych przy zachowaniu wysokiej dokładności. Opracowany system hybrydowy łączący dokładność maszyny współrzędnościowej w zakresie budowy układu współrzędnych z szybkością akwizycji danych systemu optycznego, dobrze rokuje na spełnienie tych wymogów.

Pomimo wielu prac związanych z systemami optycznymi, zagadnienia związane z ich wzorcowaniem stanowią w dalszym ciągu otwarty problem. Ma to związek przede wszystkim z dużą różnorodnością struktur systemów optycznych oraz stosowanych metod pozyskiwania danych. Dlatego tak ważnym jest opracowanie uniwersalnego zestawu wzorców, niezależnego od konstrukcji systemu oraz metody kalibracji danego systemu, a potem sprawdzanie dokładności.

W ramach pracy został zaprojektowany i zbudowany wzorzec 3D z elementami o stałej krzywiznie umożliwiający sprawdzanie dowolnego systemu optycznego. Opracowany został też matematyczny model niepewności systemu, gdzie uwzględniony został wpływ kalibracji, strategii pomiaru, wzorca oraz temperatury na wynik pomiaru. Model został zweryfikowany w oparciu o pomiary przy użyciu różnych wzorców. Wyznaczono równanie błędów granicznych systemu oraz niepewność wzorcowania.

Elementami nowości w pracy są:

- połączenie w jeden system dwóch technik pomiarowych: stykowej - Współrzędnościowej Maszyny Pomiarowej i bezstykowej - projekcji światła strukturalnego. System ten w stosunku do klasycznego rozwiązania (tylko WMP) pozwala na kilkudziesięciokrotne skrócenie czasu pomiaru, ponieważ najbardziej czasochłonny pomiar dotykowy jest realizowany tylko dla miejsc niedostępnych lub trudnych dla systemu optycznego,
- opracowanie zgodnej z ideą współrzędnościowej techniki pomiarowej koncepcji oceny dokładności systemu hybrydowego (stykowo – optycznego):
  - opracowanie metodyki oceny dokładności systemu w oparciu o procedurę kontrolnego pomiaru długości (stosowaną dotychczas do sprawdzania WMP) zapewniając tym samym spójność pomiaru,

- ustalenie dokładności systemu na podstawie pomiaru zestawu uniwersalnych elementów wzorcowych, których charakterystyki metrologiczne uzyskano w oparciu o pomiary stykowe, pozwalając tym samym na bezpośrednie porównanie dokładności systemów optycznych i stykowych, co ma szczególne znaczenie dla orzekania zgodności lub niezgodności ze specyfikacją wyrobu,
  - zbudowanie budżetu niepewności mogącego mieć zastosowanie do oceny dokładności innych systemów optycznych.
- zastosowanie do kalibracji systemu optycznego wzorca przestrzennego umożliwiając tym samym kalibrację systemu optycznego w warunkach pomiaru rzeczywistego i odniesienie jego dokładności do pomiarów stykowych,
  - integracja pomiarów optycznych z klasycznym oprogramowaniem do pomiarów wielkości geometrycznych, a tym samym opracowywanie wyników pomiarów optycznych przy użyciu silnika numerycznego certyfikowanego oprogramowania metrologicznego.

Uzyskane wyniki potwierdziły poprawność koncepcji hybrydowej i są podstawą do kontynuacji dalszych prac w kierunku badań wdrożeniowych:

- ❖ opracowania metod i algorytmów do analizy „chmur punktów” pomiarowych uzyskanych z systemu optycznego w celu ich automatycznego grupowania i wydzielenia elementów geometrycznych,
- ❖ badań nad skróceniem czasu ekspozycji celem eliminacji wpływu drgań i przesunięć,
- ❖ automatyzacji transmisji danych z programu Mesh 3D do PC – DMIS,
- ❖ przeprowadzenia analizy niepewności pod kątem oceny wpływu refleksyjności, koloru i chropowatości obiektu,
- ❖ wyznaczenia niepewności przy pomiarze z wielu kierunków,
- ❖ opracowania układu wielu skanerów optycznych pokrywających cały badany obiekt,
- ❖ przeprowadzenia końcowych testów systemu na dużych obiektach (np. karoserii samochodowej),
- ❖ opracowania w pełni funkcjonalnego systemu, który mógłby być zintegrowany w takt linii produkcyjnej.

## Literatura

- [1] Barber D., Mills J.: "Laser scanning and photogrammetry, 21st century metrology", CIPA Symposium, Potsdam, Germany, 2001.
- [2] Battle J., Mouaddib E., Salvi J.: "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem", *Pat. Recog.*, 31(7), 1998, pp 963–982.
- [3] Bell S.: "A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement", Measurement Good Practice Guide No. 11 (Issue 2), National Physical Laboratory, March, 2001.
- [4] Beraldin, J.A.: „Integration of Laser Scanning and Close-Range Photogrammetry - The Last Decade and Beyond“, XXth Congress, International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Istanbul, Turkey, July, 2004, pp. 972-983.
- [5] Beraldin J-A., Godin G., El-Hakim J.S.F., Blais F., Rioux M.: "Museum Applications 3D Imaging Applications", Ottawa, Ontario, Canada, Tutorial 1: Virtual Heritage, VSMM 2002.
- [6] Besl P.J.: "Active, Optical Range Imaging Sensors, Machine Vision and Applications", Springer-Verlag New York, 1988, pp. 127-152.
- [7] Beyer H.A., Kersten T., Streilein A.: "Metric accuracy performance of solid-state camera systems", in *Proc. Videometrics*, SPIE-1820, 1992, pp.103-110.
- [8] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML: „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“, International Organization for Standardization, Geneva. ISBN 92-67 – 10188 - 9, First Edition 1993, corrected and reprinted 1995.
- [9] Blais F.: "A Review of 20 Years of Ranges Sensor Development", *Videometrics VII, Proceedings of SPIE - IS&T Electronic Imaging*, SPIE Volume 5013, NRC 44965, 2003, pp. 62-76.
- [10] Bridges B., White D.A.: "Laser Trackers - A New Breed of CMM", *Quality Digest Article*, February, 1998.
- [11] Burch J.M., Forno C.: "High resolution Moiré photography", *Optical Engineering*, 21(4) August, 1982, pp 602-614.
- [12] Chang N. L.: "Interactive 3-D Media with Structured Light Scanning", HP Labs Technical Report HPL-2003-112, May, 2003.
- [13] Chen C., Hung Y., Chiang C., Wu J.: „Range data acquisition using color structured lighting and stereo vision“, *Image and Vision Computing*, 15(6), 1997, pp 445–456.
- [14] Chen S.Y., Li Y.F.: "Self Recalibration of a Structured Light Vision System from a Single View", *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics & Automation* Washington, May 2002.
- [15] Clarke T.A., Ellis T.J., Robson S.: "High accuracy 3-D measurement using multiple camera views", *IEE Colloquium Digest No. 1994/054*.
- [16] Clarke T.A., Robson S., Chen J. A.: "Comparison of three techniques for the 3-D measurement of turbine blades", *ISMTII*, Wuhan, China, SPIE Vol 2101, 1993, pp. 1-12.
- [17] Creath K., Wyant J.C.: "Moiré and Fringe Projection Techniques", *Optical Shop Testing*, Second Edition, Edited by Daniel Malacara, ISBN 0-471-52232-5 © John Wiley & Sons, 1992.
- [18] Curless B., Levoy M.: "Better Optical Triangulation through Spacetime Analysis“, *IEEE Int'l Conference on Computer Vision '95*, June, 1995, pp. 987-994.

- [19] Degrieck J., W. Van Paepegem, Boone P.: "Application of digital phase-shift shadow Moiré to micro deformation measurements of curved surfaces", *Optics and Lasers in Engineering* Volume 36, Issue 1, July 2001, pp 29-40.
- [20] EA-4/02, Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration, European co-operation for Accreditation, 1999.
- [21] Fraser C.S., Shortis M.R., "Vision metrology in industrial inspection: a practical evaluation", *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXX (5), 1994, pp.87-91.
- [22] Gibson P.N., Matsopoulos G., Barnardes R., Steiner R., Schmitz B., Eckhardt R., Walter D., EVIGeM Medicine Group State-Of-The-Art Report, Project Number: G7RT-CT-2002-05086, July, 2002.
- [23] Giesko T.: „Aparatura badawcza i testowa do pomiaru kształtu i parametrów powierzchni wyrobów z wykorzystaniem metody profilometrii laserowej”, PW-004/ITE/02/2004.
- [24] Główny Urząd Miar: „Międzynarodowy Słownik Podstawowych i Ogólnych Terminów Metrologii”, 1996.
- [25] Gonnet J. P., Isheil Al., Fontaine J. F.: "Parameters analysis influencing 3D measurement without contact by laser scanner to establish a local correction procedure", 10th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing, Erlangen, Germany, March, 2007.
- [26] Guan C., Hassebrook L., Lau D.: "Composite structured light pattern for three-dimensional video", *Optics Express*, Vol. 11, Issue 5, pp. 406-417.
- [27] Gustafson P.C.: "An accuracy/repeatability test for a video photogrammetric measurement", in *Proc. Industrial Vision Metrology*, SPIE-1526, 1991, pp.36-41.
- [28] Gühring J.: "Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components", *Photonics West, Videometrics VII*, Vol. 4309, SPIE, San Jose, USA, 2001.
- [29] Gühring J., Brenner C., Böhm J., Fritsch D.: "Data processing and calibration of a cross-pattern stripe projector", in: 'ISPRS Congress 2000', IAPRS 33(5), Amsterdam, Netherlands, 2000.
- [30] Hakim El., Beraldin S.F., Blais J.A.: "A Comparative Evaluation of the Performance of Passive and Active 3-D Vision Systems", *Proc.: St. Petersburg Conference on Digital Photogrammetry*, St. Petersburg, Russia, NRC 39160, June, 1995.
- [31] Harding K.: "3D Machine Vision as a Shop Floor Metrology Tool", <http://www.machinevisiononline.org>.
- [32] Häusler G., Ritter D.: „Parallel three-dimensional sensing by color-coded triangulation”, *Applied Optics*, 32(35), 1993, pp.7164–7169.
- [33] Horn E. Kiryati N.: "Toward optimal structured light patterns", In *Intl. Conf. Recent Advances in 3D Digital Imaging and Modeling*, 1997, pp. 28–35.
- [34] Jakubiec W., Malinowski J.: „Metrologia Wielkości Geometrycznych”, WNT, Warszawa, 1999.
- [35] Karbowski K.: "Metody rekonstrukcji obiektów w inżynierii odwrotnej", *Posiedzenie sekcji podstaw technologii KBM PAN*, Nowy Sącz, 2003, s.77-84.
- [36] Karl K.: "Fotogrammetria", editor: Levrotto & Bella, Volume n.1, 1998.
- [37] Kmita A.: "Opracowanie i budowa wzorca do kalibracji pomiarowych systemów optycznych", *Praca Dyplomowa*, 2006.
- [38] Kujawińska M., Sitnik R., Węgiel M., Załuski W.: „Optical 3D shape measurement systems and data conversion into CAD/CAM/CAE environments”, *Zeszyty Naukowe, Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Budowa i Eksploatacja Maszyn*, nr 3, 2002.

- [39] Kupiec M.: „Optyczne metody pomiarów geometrii obiektów 3D wykorzystywane w przemyśle”, 7<sup>th</sup> International Conference , Automation in Production Planning and Manufacturing, Zilina, 2006.
- [40] Kupiec M.: „ Szybkie pomiary współrzędnościowe metodą optyczno – stykową”, Proceedings- Automation and CA systems in technology planing and in manufacturing, 6<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference for V4 PhD Students, Herlany, maj, 2005, s 149-154.
- [41] Linsennarth A.: “Fotogrametria naziemna i specjalna”, PWN, Warszawa, 1974.
- [42] Maas H.G., Kersten T.P.: "Experiences with a high resolution still video camera in digital photogrammetric applications on a shipyard", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXX (5), 1994, pp.250-255.
- [43] Marshall S.J., Whiteford D.N., Rixon R.C.: “Assessing the performance of 3d whole body imaging systems”, Paryż, Francja, 2001.
- [44] Peipe J., Schneider C.T., Sinnreich K.: "Performance of a PC based digital photogrammetric station", International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXX (5), 1994, pp.304-309.
- [45] Petrov M. et al. : “Optical 3D Digitizers: Bringing Life to the Virtual World”, IEEE CG&A, May/June 1998, pp. 28-37.
- [46] Pirga M., Kozłowska A., Kujawińska M.: „Generalization of the scalinc problem for the automatic moiré and fringe projection shape measurement systems”, Physical Research, Jüptner W., Osten (eds) W., Academic Verlag, 1993, pp.188-193.
- [47] Proesmans M., L. Van Gool, Defoort F.: “Reading between the lines - a method for extracting dynamic 3D with texture”, In ICCV’98, 1998, pp. 1081–1086.
- [48] Pulli K., et al. : ”Acquisition and visualization of colored 3D objects”, In ICPR, 1998, pp. 11-15.
- [49] Ratajczyk E.: “Współrzędnościowa technika pomiarowa”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1994.
- [50] Rocchini C., Cignoni P., Montani C., Pingi P., Scopigno R.: “A low cost optical 3D scanner based on structured light”, In Proc. of Annual Conf. of the European Assoc. for Computer Graphics EUROGRAPHICS, 2001.
- [51] Salvi J., Pagès J., Batlle J.: “Pattern codification strategies in structured light systems”, Pattern Recognition 37 (4), April 2004, pp. 827-849.
- [52] Sato K., Inokuchi S.: “Three-dimensional surface measurement by space encoding range imaging”, Robotic Systems, 1985, pp. 27–39.
- [53] Scharstein D., Szeliski R.: “High-Accuracy Stereo Depth Maps Using Structured Light”, In Proceedings of CVPR', 2003, pp.195-202.
- [54] Schubert E.: “Fast 3D object recognition using multiple color coded illumination”, In Proc. IEEE Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing, 1997, pp. 3057–3060.
- [55] Schwenke H., Neuschaefer-Rube U., Kunzmann H., Pfeifer T.: “Optical methods for dimensional metrology in production engineering”, CIRP Annals: 51, 2002, pp. 685 – 699.
- [56] Sitek Z. : „Fotogrametria ogólna i inżynierska”, PPWK, Warszawa, 1990.
- [57] Sitnik R.: „Zautomatyzowany system do pomiaru, analizy i eksportu obiektów trójwymiarowych do systemów inżynierskich i multimedialnych”, Rozprawa Doktorska, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2002.



- [58] Sitnik R., Sładek J., Kupiec M., Błaszczuk P., Kujawińska M.: „New concept of fast hybrid contact and no-contact measurement for automotive industry”, Conference Photonics Europe 2006, Strasbourg, France, April, 2006.
- [59] Sładek J.: „Modelowanie i ocena dokładności maszyn oraz pomiarów współrzędnościowych”, Zeszyty naukowe Politechniki Krakowskiej, seria Mechanika nr 87, Kraków, 2001.
- [60] Sładek J.: „Współrzędnościowa technika pomiarowa w nadzorowaniu jakości wyrobów”, Zarządzanie Jakością, tom IV praca zbiorowa pod redakcją Tabor A., Zając A., Rączka M., Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, 2000.
- [61] Sładek J., Krawczyk M.: „Identyfikacja błędów wielkogabarytowych WMP z uwzględnieniem laserowych systemów nadążnych”, IX Krajowa Konferencja Techniczna, Metrologia w technikach wytwarzania maszyn, t.2, Kraków, 2003.
- [62] Sładek J., Ostrowska K., Kupiec M., Kmita A.: “The method for measuring accuracy of optical multicoordinate devices”, Science Report, Project PL 0007 – Modern Metrology in Quality Management Systems, CEEPUS, Kielce, 2006, pp.227-235.
- [63] Sładek J., Sitnik R., Kupiec M.: „Koncepcja metody hybrydowej w pomiarach współrzędnościowych – Ocena dokładności skanera optycznego”, Zeszyty Naukowe nr.1 Politechniki Poznańskiej, Budowa Maszyn i Zarządzanie Produkcją, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2004, s.345-352.
- [64] Sładek J., Sitnik R., Kupiec M.: “New concept of Opto-Mechanical Measurement Machine”, Proceedings Measurement 2005, 5th International Conference, Smolenice, Slovakia, May, 2005, pp. 541-545.
- [65] Sładek J., Sitnik R., Kupiec M., Błaszczuk P.: “The new hybrid method for fast and precision measurement”, XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development, Rio de Janeiro, Brazil, September, 2006.
- [66] Srinivasan V., Liu H., Halioua M.: "Automated phase-measuring profilometry of 3-D diffuse objects", Appl. Opt. 23.18, 1984, pp. 3105-3108.
- [67] Surrel J., Surrel Y.: "La technique de projection de franges pour la saisie des formes d'objets biologiques vivants", J. Opt. 29, 1998, pp. 6-13.
- [68] Takasaki H.: "Moiré topography", Applied Optics 12, 1467, 1970.
- [69] Takeda M., Mutoh K.: "Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3-D object shapes", Appl. Opt. 22.24, 1983, pp. 3977-3982.
- [70] Toyooka S., Iwaasa Y.: "Automatic profilometry of 3-D diffuse objects by spatial phase detection", Appl. Opt. 25.10, 1986, pp. 1630-1633.
- [71] Trapet E., Wäldele F.: “Substitution method to make traceable measurements with CMMs.”, Working paper ISO/TC3/WG10, 1996.
- [72] Tzung-Sz Sh., MENQ Chi.: “Digital projector calibration for 3-D active vision systems”, Journal of manufacturing science and engineering, ISSN 1087-1357, vol. 124, n1, 2002, pp. 126- 134.
- [73] Vuylsteke P., Oosterlinck A., “Range image acquisition with a single binary-encoded light pattern”, IEEE Trans. Pat.Anal. Mach. Int., 1990, pp 148–164.
- [74] Want J.C.: “Speckle Pattern Produced by Illuminating a Rough Surface with Laser Radiation”, Optics 505, Chapter 18 .pp 2 – 15.

- [75] Weber H.: „Uncertainty assessment using calibrated workpieces”, ISO/WD 15530, IV Międzynarodowa Konferencja Naukowa, Współrzędnościowa Technika Pomiarowa, Bielsko Biała, 2000, s.249-254.
- [76] Weckenmann A., Weickmann J.: “Optical inspection of formed sheet metal parts applying fringe projection systems and virtual fixation”, Metrology and measurement systems, volume XIII, number 4– ISSN: 0860-8229, 2006, pp.321-334.
- [77] Węgiel M.: „Optyczny pomiar kształtu z wykorzystaniem metody projekcji rastra”, Podstawy Inżynierii Fotonicznej – Laboratorium.
- [78] Xiaolan Li, Fang Meng, Jie Feng, Hongbin Zha: “Digitizing Geological Fossils by Integration of Geometrical Models and Color Images” , Computer Science, Vol. 19, No. 11, 2002, pp.14-17.
- [79] Materiały informacyjne firmy Brown &Sharpe – PC-DMIS 3.5, Reference Manual.
- [80] Materiały informacyjne firmy Cognitens , <http://www.cognitens.com>
- [81] Materiały informacyjne firmy DEA, <http://www.dea.it>
- [82] Materiały informacyjne firmy GOM, <http://www.gom.com>
- [83] Materiały informacyjne firmy Imapct Studios, [http://www.impactstudios.com/laser\\_scan\\_site/htm](http://www.impactstudios.com/laser_scan_site/htm)
- [84] Materiały informacyjne firmy Konica Minolta , <http://www.konicaminolta.pl>
- [85] Materiały informacyjne firmy Leica, <http://www.leica-geosystems.com>
- [86] Materiały informacyjne firmy Leitz Messtechnik GmbH, <http://www.leitz-metrology.de>
- [87] Materiały informacyjne firmy Metris, <http://www.metris.com>
- [88] Materiały informacyjne firmy Riegl, [www.riegl.com](http://www.riegl.com)
- [89] Materiały informacyjne firmy Smarttech, [www.smarttech.pl](http://www.smarttech.pl)

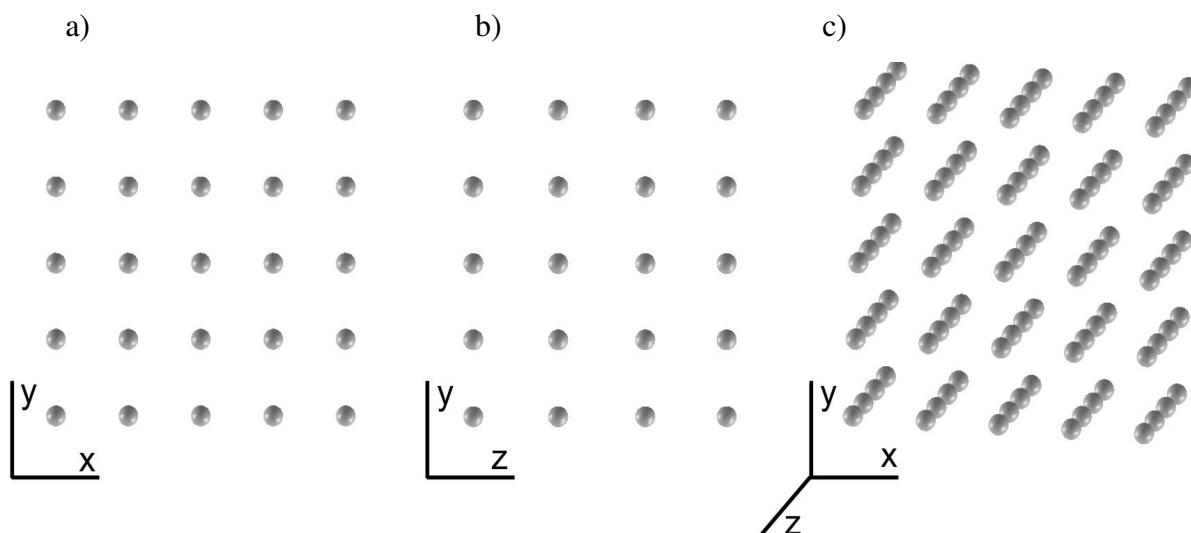
### **Normy i zalecenia**

- [N1] Norma ISO 10360-1: “Acceptance and reverification test for coordinate measuring machines, CMMs – vocabulary”, 2000.
- [N2] Norma ISO 10360-2: “Coordinate metrology, Performance assessment of coordinate measuring machines”, 2000.
- [N3] Norma ISO 10360-7: “Non-contacting probing system, CMMs using optical probe-systems”, 2000.
- [N4] Norma ISO 14253-2: “GPS, Guide to the estimation of uncertainty in GPS measurement in calibration of measuring equipment and in product verification”, 1999.
- [N5] Norma ISO/CD 15530, “GPS - CMM Techniques for determining the uncertainty of measurement – Experimental uncertainty assessment using calibrated object”, 2000.
- [N6] Norma ISO/TS 23165: ”Geometrical product specifications (GPS) - Guidelines for the evaluation of coordinate measuring machine (CMM) test uncertainty”, 2006.
- [N7] Zalecenia VDI/VDE 2617: „Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten“, 1997.
- [N8] Zalecenia VDI/VDE 2617 – 6: „Koordinatenmessgeräte mit optischer Antastung“, 2001.
- [N9] Zalecenia VDI/VDE 2634-2, “Optical 3D-Measuring systems, Optical system based on area scanning”, 2002.
- [N10] Zalecenia CMMA, “Accuracy specification for coordinate measuring machines”, Londyn, 1989.

## Załącznik A

### Wyznaczenie równania MPE, dla przestrzeni YZ skanera

Poniżej przedstawiono innowacyjny sposób wyznaczenia MPE dla przestrzeni YZ skanera. Przestrzeń roboczą optycznego systemu pomiarowego wypełniono czterema równoległymi pozycjami wzorca, jak na rysunku A.1. Odległość pomiędzy sąsiednimi pozycjami wynosiła 95 [mm].



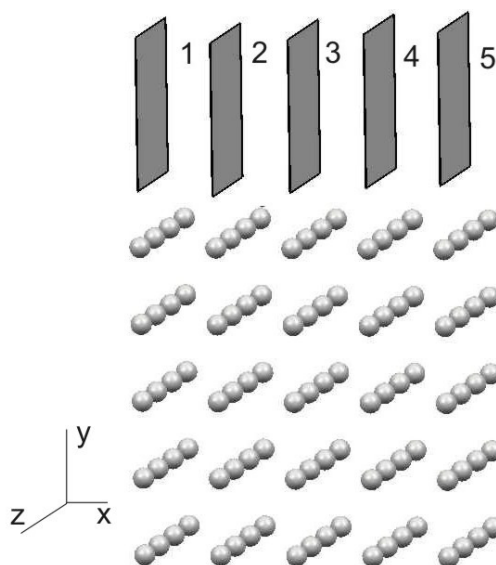
Rys. A.1. Wzorzec 3D: a) widok z przodu, b) widok z boku, c) rzut izometryczny

Etapy pomiaru można opisać w krokach:

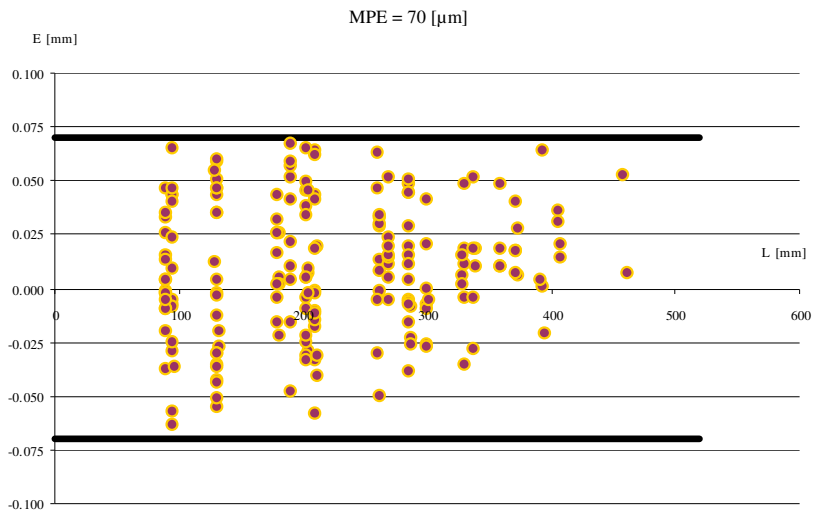
- zamocowanie wzorca do stołu maszyny w najdalszej pozycji przestrzeni roboczej skanera (pozycja bazowa),
- trzykrotny pomiar skanerem wzorca w pozycji pierwszej,
- pomiar kul maszyną współrzędnościową w układzie związanym z przedmiotem - otrzymanie danych nominalnych z pozycji pierwszej,
- zamocowanie wzorca do pozycji oddalonej od startowej o 95 [mm].
- trzykrotny pomiar skanerem wzorca w pozycji drugiej,
- pomiar kul maszyną współrzędnościową w układzie pozycji bazowej - otrzymanie danych nominalnych z pozycji drugiej,
- zamocowanie wzorca do pozycji oddalonej od poprzedniej o 95 [mm],
- trzykrotny pomiar skanerem wzorca w pozycji trzeciej,

- i) pomiar kul maszyną współrzędnościową w układzie pozycji bazowej - otrzymanie danych nominalnych z pozycji trzeciej,
- j) zamocowanie wzorca do pozycji oddalonej od poprzedniej o 95 [mm],
- k) trzykrotny pomiar skanerem wzorca w pozycji czwartej,
- l) pomiar kul maszyną współrzędnościową w układzie pozycji bazowej - otrzymanie danych nominalnych z pozycji czwartej,
- m) przeliczenie danych pomiarowych skanera do układu wyznaczonego przez WMP.

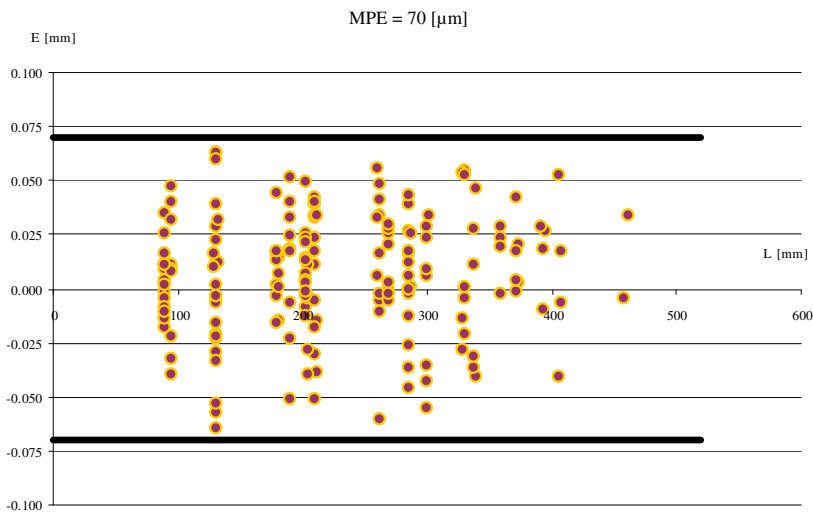
Dzięki tak uzyskanym danym wzorcowym i pomiarowym możliwe było dowolne analizowanie całej przestrzeni roboczej optycznego systemu pomiarowego. Skupiono się na analizie płaszczyzny ZY, która nie była jeszcze przedmiotem badań. Dla otrzymanych pięciu przekrojów, składających się z 20 kul każdy (patrz rysunek poniżej), wyliczono kombinację 190 odległości oraz stworzono wykresy i oszacowano równania błędów granicznych dla poszczególnych przekrojów.



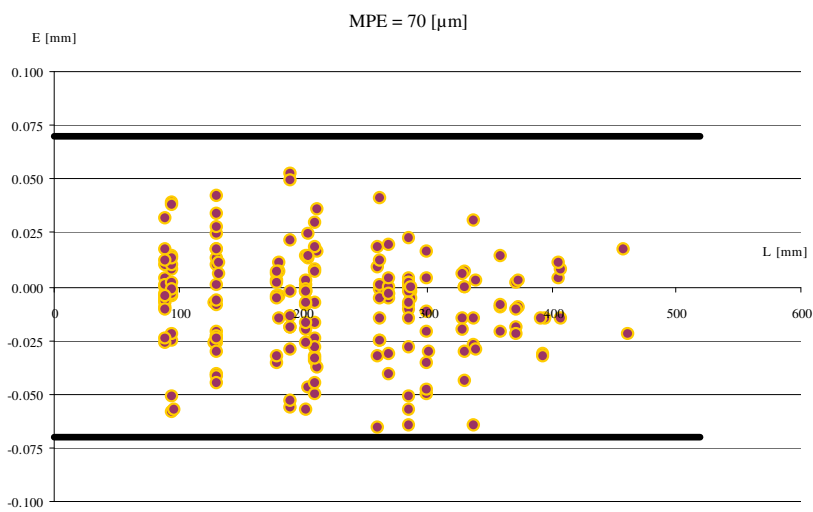
Rys.A.2. Płaszczyzny wykorzystane do analizy



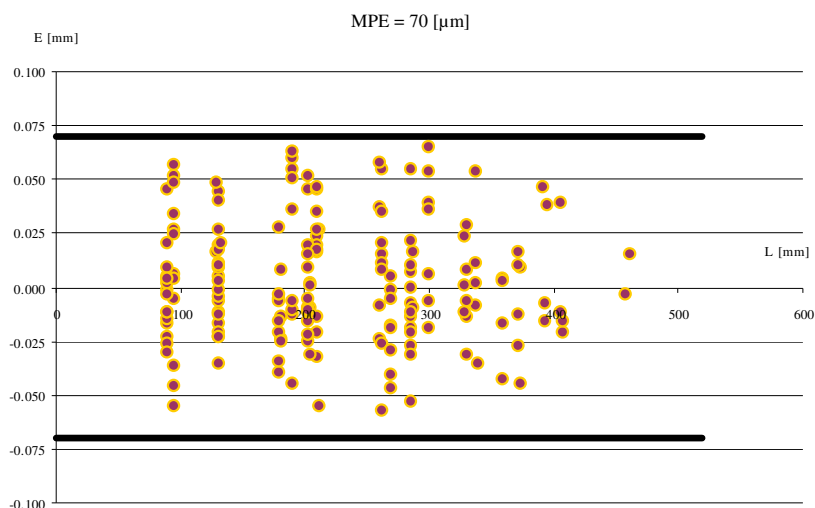
*Wykres A.1. MPE dla przekroju nr.1*



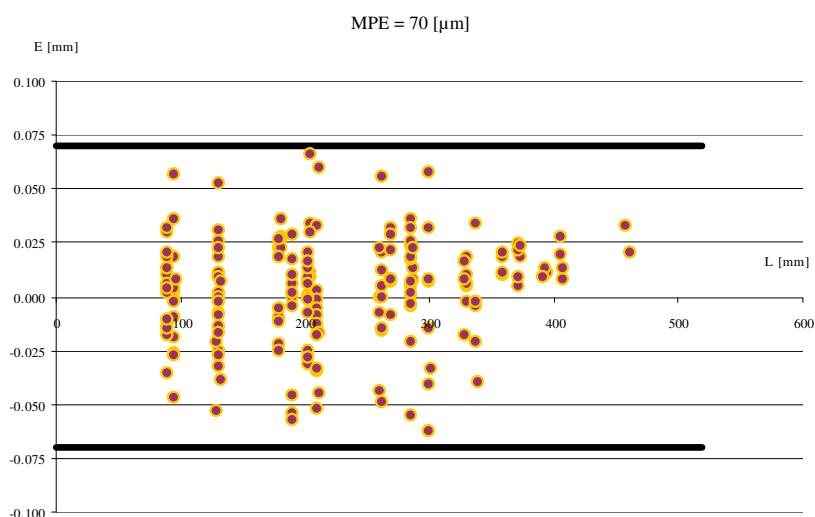
*Wykres A.2. MPE dla przekroju nr.2*



*Wykres A.3. MPE dla przekroju nr.3*



Wykres A.4. MPE dla przekroju nr.4



Wykres A.5. MPE dla przekroju nr.5

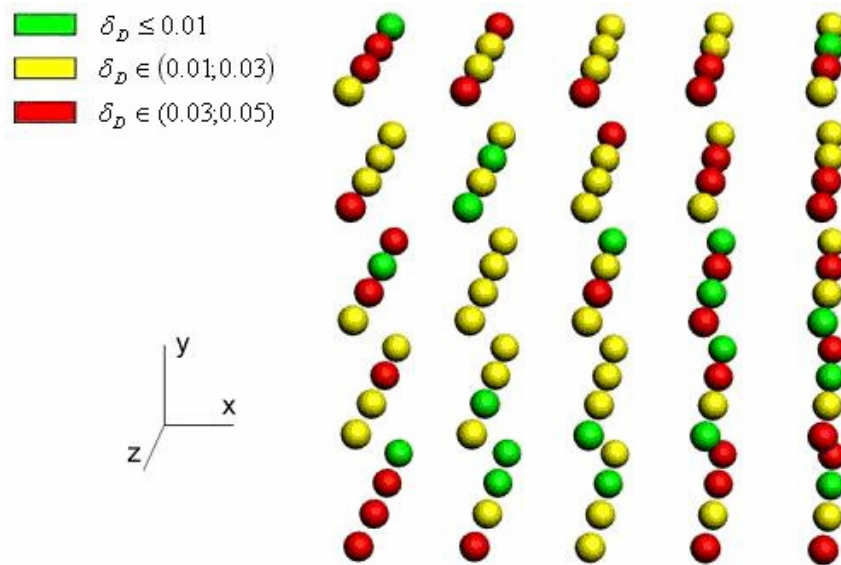
Z powyższych wykresów wywnioskować można iż maksymalny błąd graniczny MPE wynosi dla pomiaru w płaszczyźnie  $ZY \pm 0.07$  [mm] i jest funkcją stałą niezależną od odległości. Błąd ten jest większy niż błędy graniczne wyznaczone w rozdziale 12. Jest to z pewnością podyktowane specyfiką procedury kalibracyjnej systemu czyli wyznaczenia wartości  $Z$  w wyniku interpolacji wartości pomiędzy przesunięciami wzorca wzdłuż osi  $Z$  skanera.

## Wyznaczenie błędu związanego ze średnicami

Na podstawie danych pomiarowych i nominalnych średnic obliczono błąd wskazań systemu optycznego dla pomiaru średnic. Parametr opisujący ten błąd to:

$$\delta_D = D_{nom} - D_{pom} \quad (A.1)$$

Na poniższym rysunku zgodnie z legendą oznaczony został błąd  $\delta_D$ .



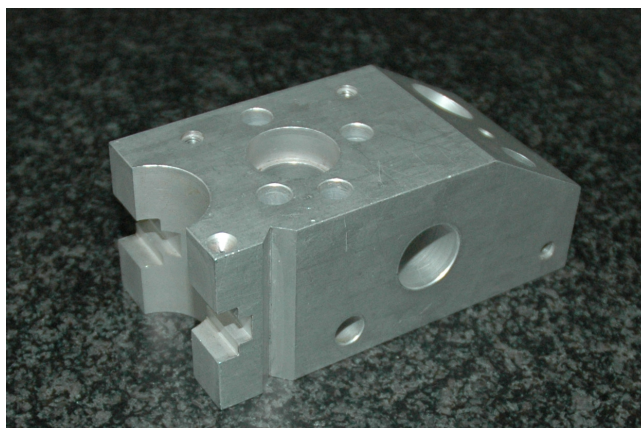
Rys. A.3. Błąd pomiaru średnic – rzut izometryczny

Analizując rysunek można stwierdzić chaotyczne zachowanie systemu pomiarowego. Nie da się wydzielić obszaru podwyższonego ryzyka w przestrzeni pomiarowej, gdyż błędy występują losowo.

## Załącznik B

### Wyznaczenie wypadkowej powtarzalności i odtwarzalności dla pomiaru z wielu kierunków

Aby oszacować wypadkową powtarzalności i odtwarzalności pomiarów z wielu kierunków należy zastosować wzorzec 3D, którego geometrię systemem hybrydowym da się określić jedynie poprzez pomiar z wielu kierunków.



Rys.B.1 Kostka wzorcowa – widok ogólny

Wzorzec, który prezentuje powyższy rysunek został pomierzony z różnych stron, w wyniku czego otrzymano oddzielne skany („chmury punktów”). Skany zostały złożone w programie 3D – Mesh przy pomocy narzędzia „dokładne dopasowanie” bazującego tylko na obliczeniach numerycznych. Przed rozpoczęciem pracy algorytmu wymagane było wstępne dopasowanie skanów czy to manualnie nakładając jeden na drugi czy też poprzez wskazanie trzech odpowiadających sobie punktów na każdym skanie.

Po wstępnym dopasowaniu uruchomiono proces „dopasowania dokładnego”. Należało tu ustawić wartość trzech parametrów:

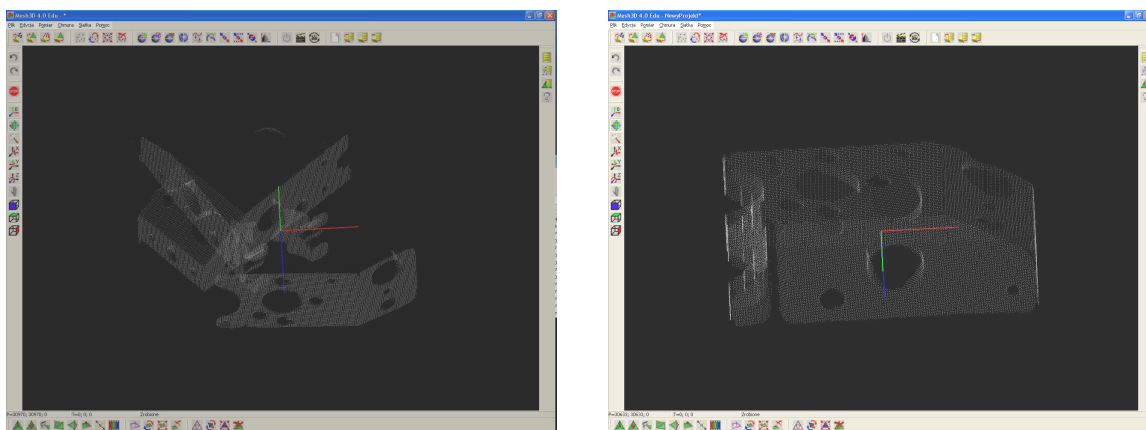
- liczba punktów biorących udział w obliczeniach – jest to losowa wybrana ilość punktów, od tej wielkości zależy szybkość obliczeń, ale i precyzja ich wykonywania,
- obszar dopasowania - określa lokalny promień otoczenia w którym poszukiwane są punkty sąsiadujące z bieżącym punktem do obliczeń iteracyjnych,
- próg ilościowy - niezbędna ilość punktów w otoczeniu danego punktu dla których przeprowadzone są obliczenia do dopasowania chmur.

Funkcja „dopasowania dokładnego” wykorzystuje algorytm *iteracji najbliższych punktów* (ICP). Polega to na tym, że program przemieszcza jedną z chmur w zadanym przedziale. Dokonywane są przesunięcia wzdłuż, a także obroty wokół każdej z osi. Algorytm działa na



zasadzie iteracyjnej minimalizacji błędu średnio-kwadratowego dopasowania chmur, którego wartość przedstawia wyświetlany parametr RMS. Obliczenia prowadzone są na statystycznie wyznaczanej reprezentacji każdej z chmur [57].

W efekcie otrzymano ciągłą reprezentację wzorca (patrz rys. B.2). W programie PC – DMIS dokonano jego parametryzacji oraz zbudowano układ współrzędnych na rogu kostki na bazie pomiarów WMP. W dalszej kolejności wyznaczono odległości płaszczyzna – płaszczyzna oraz odchyłki od długości wzorcowych.



Rys.B.2. Przetwarzanie danych: a) poszczególne chmury punktów, b) połączone dane kierunkowe

Proces złożenia i dalszą analizę powtórzyło pięciu operatorów, każdy z nich stosował różne współczynniki złożenia, przy czym operator trzeci był najbardziej doświadczony. Analizie zostały poddane dwie odległości.

Poniższa tabela ukazuje błędy pomiaru skanera wyrażone w milimetrach, uzyskane przez każdego z operatorów dla dwóch sprawdzanych odległości.

Tabela B.1. Wyniki pomiaru wzorca przez różnych operatorów

Odległość nominalna	Operator 1	Operator 2	Operator 3	Operator 4	Operator 5	R=  Max-Min
119.966	-0.276	-0.305	-0.231	-0.560	-0.410	0.329
56.0252	0.272	0.548	0.217	0.304	0.351	0.2762
						$\Sigma R=0.605$

Wyniki są zróżnicowane co wskazuje na to, że właściwe używanie parametrów dopasowania, o których była mowa wcześniej, ma duży wpływ na wynik pomiaru.

Autor przy pomocy **uproszczonej metody Ford Type 2**, wyznaczył wypadkową powtarzalności i odtwarzalności pomiarów wykonywanych za pomocą systemu hybrydowego

przy pomiarze z wielu kierunków. Ukazany został w ten sposób wpływ operatora, a tym samym dobór odpowiednich współczynników złożenia na końcowy wynik pomiaru.

Na podstawie danych z tabeli B.1 wyliczony został rozstęp średni:

$$R_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n R}{L} = \frac{0.605}{2} = 0.303 \text{ [mm]}$$

gdzie:

$L$  – liczba mierzonych części

Współczynnik  $d_2$  dobrany dla  $n = 2$  (ilość odległości) oraz  $N = 5$  (ilość operatorów) wynosi:

$$d_2 = 2.40$$

$$d_1 = \frac{5.15}{d_2} = \frac{5.15}{2.40} = 2.14$$

Powtarzalność i odtwarzalność wypadkowa przyrządu pomiarowego<sup>4</sup> kształtuje się więc na poziomie:

$$R \& R = d_1 \cdot R_{sr} = 2.14 \cdot 0.303 = 0.65 \text{ [mm]}$$

Ponieważ wypadkowy błąd powtarzalności i odtwarzalności przyrządu jest do zaakceptowania w przypadku gdy otrzymamy z obliczeń względną wartość R&R % poniżej 20 %, dlatego też aby można było stosować system hybrydowy do pomiaru z różnych kierunków wymagana tolerancja dla takiego błędu nie może przekraczać  $T = 3.3$  [mm].

$$R \& R\% = \frac{R \& R \cdot 100}{T} = \frac{64.7}{3.3} = 19.62 \%$$

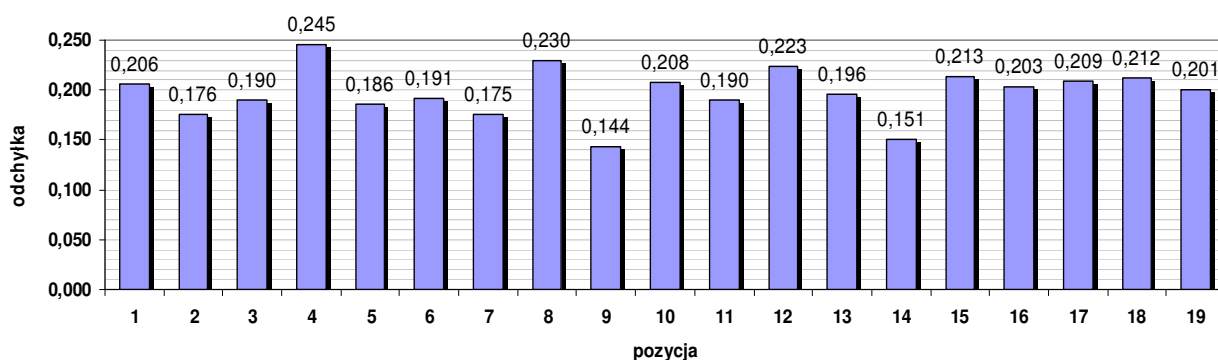
---

<sup>4</sup> Określenie „przyrząd” odnosi się tu także do skojarzonego z nim operatora oraz wszelkich warunków prowadzenia pomiarów

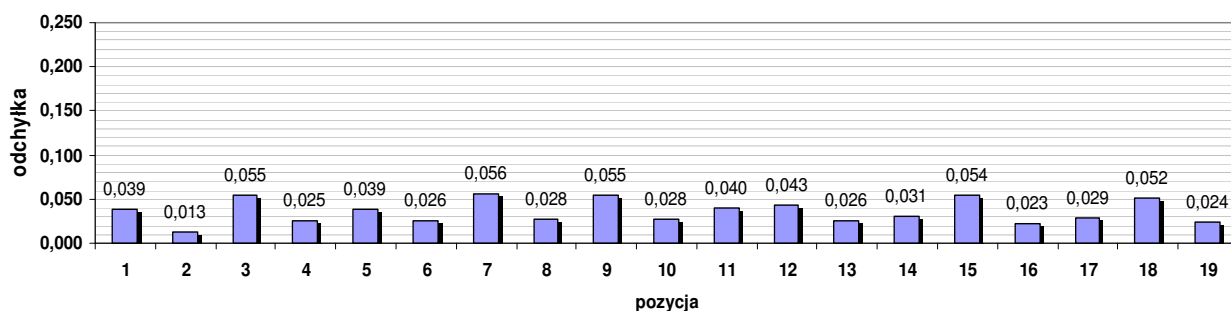
## Załącznik C

### Wpływ powłoki antyrefleksyjnej na wyniki pomiarów

Kulę o nominale 69.848 [mm] zmierzoną w 19 pozycjach w przestrzeni pomiarowej skanera. Kula była mierzona w każdej pozycji bez pokrycia powłoką matującą i z pokryciem. Wyznaczono odchyłki od wartości nominalnej średnicy. Poniższe wykresy ilustrują uzyskane wyniki.



Wykres C.1. Odchyłki średnicy kuli bez pokrycia



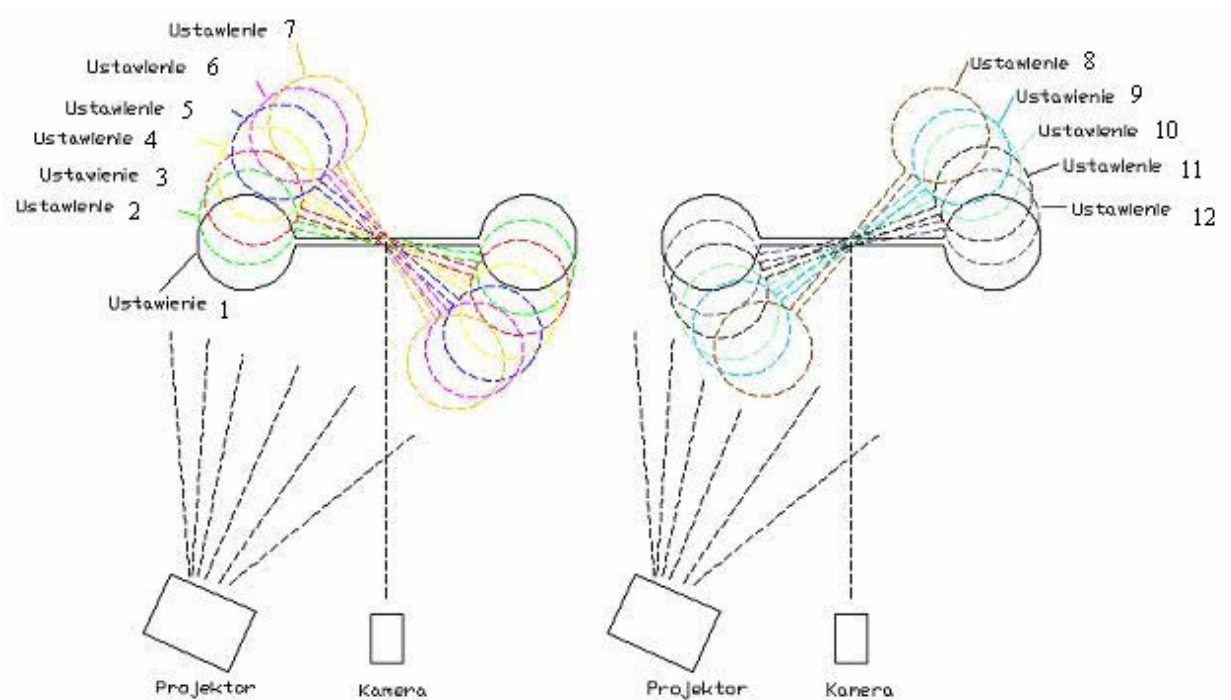
Wykres C.2. Odchyłki średnicy kuli pokrytej preparatem matującym

Jak widać zmatowienie badanej kuli przyniosło przewidywany rezultat w postaci znacznej (około czterokrotnej) poprawy otrzymywanych wyników.

## Załącznik D

### Analiza wpływu pozycjonowania wzorca na błędy wskazania

Wzorec typu hantle został zmierzony trzykrotnie w 12 ustawieniach pokazanych na rysunku D.1. Wyjściowym ustawieniem było ustawienie prostopadłe do osi optycznej kamery, następnie wzorec był obracany przy użyciu stolika obrotowego co  $10^\circ$  aż do takiego zakresu w którym nie można było zebrać obrazów z jednej z kul. Badana była odległość pomiędzy środkami obu kul.



Rys. D.1. Ustawienie hantli podczas pomiaru

Wykres D.1. ilustruje uzyskane odchyłki od wartości nominalnej  $L = 197.597$  [mm].



Wykres. D.1. Błędy wskazania uzyskane przy różnych ustawieniach wzorca

Analizując wykres można zauważyć mniejsze błędy wskazania dla kąta skręcenia hantli do  $30^\circ$  w stosunku do systemu pomiarowego. Wraz ze zwiększeniem kąta skręcenia wzorca błędy pomiaru narastają, co potwierdza rezultaty uzyskane przy pomiarze wzorca płytowego (patrz wykresy 12.9. – 12.16).

## Załącznik E

### Zalecenia odnośnie stosowania wzorca płytowego do sprawdzania systemów optycznych

Warunkiem wykorzystania wzorca płytowego do zadań kalibracji i sprawdzania systemów optycznych jest jego prawidłowe użytkowanie, dlatego też niezbędne było opracowanie procedury postępowania z takim wzorcem.

#### Etap I – rekalkibracja wzorca

W przypadku podejrzenia, że podczas transportu parametry wzorca uległy zmianie należy dokonać rekalkibracji wzorca czyli wyznaczenie jego wartości charakterystycznych. W tym celu:

- ✓ wzorzec należy stabilizować termicznie przez 48 godzin w pomieszczeniu gdzie dokonywana jest kalibracja wzorca,
- ✓ wzorzec należy kalibrować w oparciu o pomiary realizowane maszyną współrzędnościową o co najmniej rząd wielkości dokładniejszą od spodziewanej dokładności kalibrowanego systemu,
- ✓ wzorzec należy kalibrować przy użyciu dołączonych programów napisanych w oprogramowaniu metrologicznym (Quindos i PC- DMIS w zależności od tego z jakim oprogramowaniem współpracuje WMP),
- ✓ wzorzec należy zamontować na WMP w sposób pozwalający uniknąć naprężeń, a tym samym odkształceń wzorca,
- ✓ aby wyeliminować błędy systematyczne WMP zaleca się kalibrować wzorzec metodą *swing round* czyli pomiar w czterech położeniach zgodnie z rysunkiem 12.5 (patrz punkt 12.2.3),
- ✓ należy uśrednić wyniki i uzyskać wartości nominalne dla wzorca płytowego.

#### Etap II – sprawdzanie systemu optycznego

- ✓ stabilizacja termiczna wzorca przez 48 godzin w pomieszczeniu gdzie jest dokonywane sprowadzenie urządzenia,
- ✓ zamontowanie i ustawienie wzorca w pozycji umożliwiającej pomiar przez system optyczny,

- ✓ ustawienie parametrów systemu optycznego w sposób umożliwiający objęcie zakładanej objętości pomiarowej,
- ✓ co najmniej trzykrotny pomiar wzorca w co najmniej 7 położeniach wypełniających przestrzeń pomiarową systemu (zależnych od specyfikacji systemu),
- ✓ uśrednienie wyników i porównanie ich z wartościami nominalnymi - wyznaczenie błędu wskazania  $E$ ,
- ✓ sprawdzenie czy wartości błędu wskazania nie przekracza maksymalnego dopuszczalnego błędu granicznego MPE badanego urządzenia - warunek prawidłowego działania przyrządu,
- ✓ rozmontowanie i konserwacja wzorca.