

Paweł TUREK¹
Wojciech KWAŚNY¹
Jerzy JĘDRZEJEWSKI¹

ZAAWANSOWANE METODY IDENTYFIKACJI BŁĘDÓW OBRABIAREK

Przedstawiono ogólne uwarunkowania i potrzeby zwiększania dokładności obrabiarek. Opisano rodzaje błędów obrabiarek, ich przyczyny i sposoby zmniejszania oraz kompensacji. Szczegółowo omówiono obecnie najbardziej użyteczne metody identyfikacji błędów, zwłaszcza geometrycznych. Dokonano klasyfikacji oraz porównania metod i narzędzi pomiarowych z uwzględnieniem ich ogólności, czasochłonności, kosztu, dostępności na rynku i głównych ograniczeń.

1. WPROWADZENIE

Doskonalenie obrabiarek skrawających, wymuszone potrzebami rynku wyrobów, prowadzi do wzrostu szeroko pojętej ich wydajności i dokładności. Dokładność obrabiarek zwiększana jest na drodze wprowadzania innowacyjnych rozwiązań konstrukcyjnych i oprogramowania, korekcji błędów i ich kompensacji. Działania te wymagają dokładnej identyfikacji poszczególnych rodzajów błędów poprzez ich pomiary. Im bardziej złożone są obrabiarki, w wyniku ich wieloosiowego działania, wielozadaniowości i funkcji inteligentnych, tym pomiary poszczególnych składników błędów są trudniejsze i wymagają bardziej zaawansowanych metod pomiarowych. Niejednokrotnie uzasadnione jest integrowanie tych pomiarów z procesami kompensacji błędów w czasie rzeczywistym i z procesami aktywnego korygowania dokładności obrabiarek okresowo bądź w czasie rzeczywistym. Dokładne pomiary, zwłaszcza geometrii obrabiarek podlegającej w czasie eksploatacji degradacji, mają też podstawowe znaczenie dla usprawnienia procesów serwisowych. Wymaga to coraz częściej ciągłego diagnozowania dokładności obrabiarki. W artykule przedstawiono analizę właściwości użytkowych najbardziej zaawansowanych obecnie metod i urządzeń pomiarowych, dostępnych dla producentów i użytkowników obrabiarek, jak i rozwiązań będących jeszcze na etapie eksperymentalnej weryfikacji. Zwrócono uwagę na ich budowę, możliwości pomiarowe, zastosowane metody oraz ograniczenia wynikające z konstrukcji lub metody pomiarowej.

¹ Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Politechnika Wrocławska

2. PODZIAŁ I OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA BŁĘDÓW OBRABIAREK

Szeroko pojęta wydajność obrabiarek, zgodnie z wymaganiami rynku, rozwojem techniki oraz technologii wytwarzania, wymaga intensywnego zwiększania ich dokładności w warunkach eksploatacyjnych [27]. Aby sprostać stale rosnącym wymaganiom dokładności obrabiarek konieczne jest zapewnienie określonych ich właściwości statycznych, cieplnych i dynamicznych oraz dokładności i powtarzalności realizowanych procesów obróbkowych. Powinny być one wolne od zakłóceń zewnętrznych środowiska wytwarzania, a w tym zmian temperatury otoczenia. Konieczne jest też podejmowanie działań zmierzających do minimalizacji błędów [13], [48].

Ogólnie błąd obrabiarki można zdefiniować jako różnicę między faktycznym a zaprogramowanym położeniem narzędzia względem zespołu. Ta różnica jest skutkiem występowania w obrabiarce błędów własnych oraz błędów wymuszonych poprzez proces produkcyjny lub środowisko. Wśród bardzo wielu błędów, jakie może mieć obrabiarka i jakie mogą powstawać w maszynie w trakcie realizacji procesu produkcyjnego warto wymienić [37]:

- błędy geometryczne,
- błędy kinematyczne,
- błędy cieplne,
- błędy napędów i regulatorów,
- błędy wymuszone procesem obróbki,
- błędy układów pomiarowych,
- inne.

Są to zarówno błędy własne maszyny, błędy generowane przez system sterowania i błędy związane z procesem obróbki.

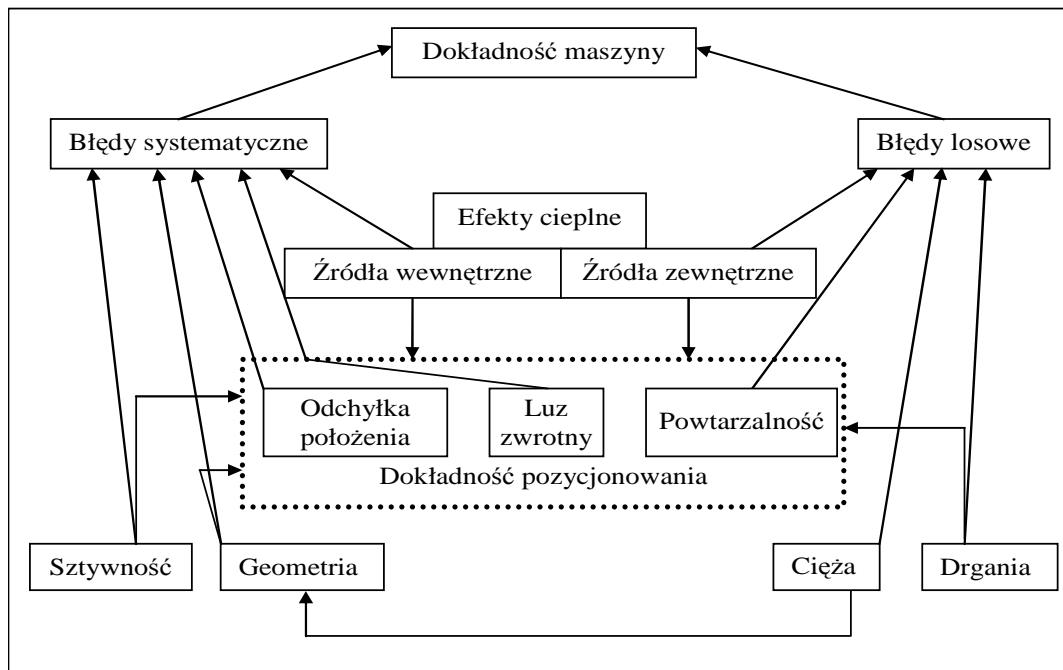
W odniesieniu do błędów maszyn współrzędnościowych i centrów obróbkowych, które realizują funkcje pomiarowe, istotne znaczenie ma dokładność ich identyfikacji, o której rozstrzyga dokładność zastosowanych przyrządów i układów pomiarowych, przyjęta strategia pomiarowa, a także środowisko wytwarzania [2].

Wszystkie błędy obrabiarki można podzielić na dwa rodzaje w zależności od tego, w jaki sposób wpływają one na dokładność maszyny. W tym podziale rozróżnia się błędy systematyczne i błędy losowe. Ten umowny podział zaproponowany w literaturze pokazany jest na rys. 1 [29].

Wszystkie błędy systematyczne, bez względu na ich rodzaj (geometryczne, kinematyczne, cieplne), można kompensować z dokładnością zależną głównie od dokładności ich identyfikacji i szybkości zmian. Trudno jest korygować błędy, które zmieniają się bardzo szybko. Poza błędami, które powstają w strukturze kinematyczno-geometrycznej obrabiarki, mogą jeszcze występować błędy w sterowaniu. Mogą one być związane z ograniczeniami dotyczącymi częstotliwości odświeżania wartości zadanych lub uzyskiwanych prędkości przyspieszania.

Dobór odpowiedniej struktury geometryczno-ruchowej, a także zastosowanie do budowy obrabiarki podzespołów o wysokiej jakości wykonania oraz zapewnienie odpowiedniego montażu tych podzespołów i całej maszyny, pozwala zminimalizować błędy geometryczno-kinematyczne [37]. Ogranicza się w ten sposób jedno z głównych źródeł

niedokładności współczesnych obrabiarek CNC [51]. Do geometrycznych błędów zalicza się błędy kształtu i wzajemnego położenia powierzchni. Kinematyczne błędy ruchu dotyczą względnych ruchów komponentów maszyny. Mają one też bardzo duże znaczenie w przypadku złożonego ruchu kilku osi sterowanych [31]. W przypadku prawidłowo zaprojektowanej i wykonanej maszyny błędy kinematyczne powinny cechować się dużą powtarzalnością [49], co umożliwia ich łatwą kompensację.



Rys. 1. Podział i źródła błędów wpływających na dokładność obrabiarki/maszyny pomiarowej [29]

Fig. 1. Components and sources of errors affecting the accuracy of the machine tool/measuring machine [29]

Zmienność temperatury zespołów obrabiarki związana z ich pracą lub oddziaływaniem środowiska to przyczyna, istotnych zwykle, cieplnych błędów obrabiarki. Ten rodzaj błędów może w wielu przypadkach być rozstrzygającym o dokładności przedmiotu obrabianego [31]. Zmiany temperatury generowane są przez różne źródła ciepła, do których zalicza się [30]:

- silniki,
- łożyska,
- przekładnie i sprzęgła,
- pompy i olej hydrauliczny,
- proces skrawania,
- urządzenia mechaniczne i mechatroniczne różnego typu.

Wpływ tych źródeł ciepła na dokładność obrabiarki zależy od położenia ich względem korpusów, elementów podpierających narzędzie i przedmiot obrabiany oraz od ich intensywności [23]. Ogólnie można przyjąć, że poszczególne udziały w błędzie cieplnym obrabiarki są wprost proporcjonalne do przyrostu temperatury i współczynnika

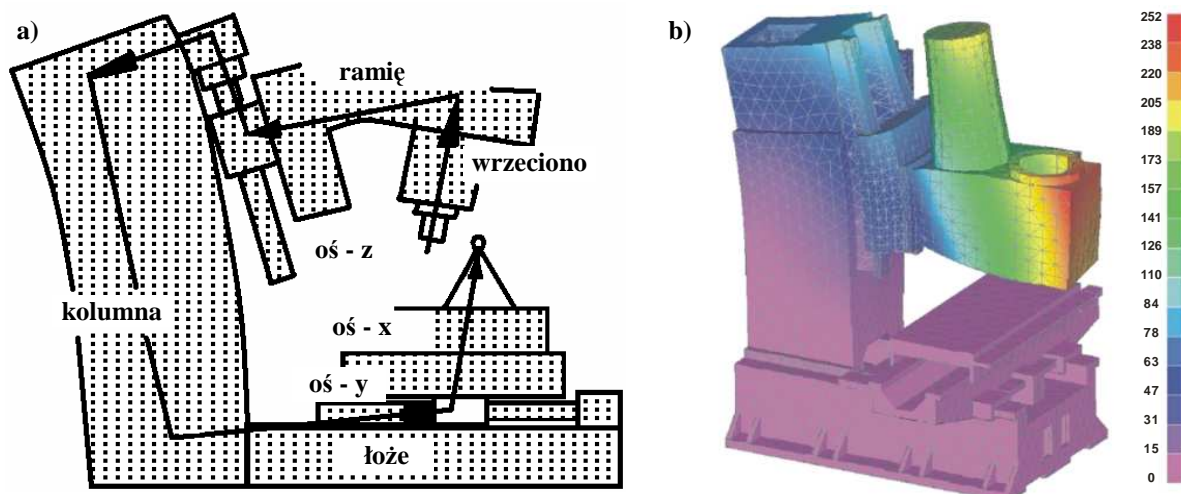
rozszerzalności cieplnej materiałów nagrzewanych elementów. Współczynnik ten wynosi dla stali około 0,01 mm/m na każdy °C, co oznacza, że przy zmianie temperatury o 10°C np. śruby pociągowej, powstanie zmiana wymiarowa śruby o 0,1 mm na każdy metr jej długości. Z tego względu powstały próby [18],[19] wprowadzenia do budowy obrabiarek specjalnych materiałów kompozytowych, które mają mniejszy współczynnik rozszerzalności liniowej. Takie działanie poprawia dokładność obrabiarki, ale równocześnie zwiększa koszt jej wytwarzania [30]. Korzystniejszym sposobem redukcji błędów cieplnych jest zastosowanie metod korekcji i kompensacji za pomocą układu sterowania. Przykładem mogą być metody, które bazują na matematycznym modelu błędów w funkcji temperatury mierzonej za pomocą odpowiedniej liczby sensorów rozmieszczonych w obrębie struktury obrabiarki [47].

Poza wspomnianymi źródłami ciepła występującymi w maszynie, na jej dokładność ma również wpływ zmiana temperatury na hali produkcyjnej i akumulacja ciepła w zamkniętych pokrywami przestrzeniach obrabiarki. Nawet w stanie stacjonarnym, gdy żaden napęd nie jest włączony, zmiana temperatury otoczenia o kilka stopni Celsjusza może powodować przemieszczanie się wrzeciona nawet o kilkadziesiąt mikrometrów [24]. Wszystko zależy oczywiście od stabilności cieplnej danej maszyny. Dlatego dąży się, aby nowoczesne obrabiarki miały jak największą stabilność, co osiąga się metodami konstrukcyjnymi np. zapewniając termosymetrię konstrukcji. Kompensacja błędów takiej obrabiarki jest o wiele łatwiejsza. Na podstawie analizy cieplnego zachowania się obrabiarki, w oparciu o model cieplny i symulację numeryczną, można stwierdzić, które elementy konstrukcji są odpowiedzialne za składniki błędów cieplnych i gdzie mają się znajdować czujniki temperatury, aby możliwa była skuteczna kompensacja.

Dużym problemem przy bazowaniu na numerycznej symulacji są zmiany intensywności generowania ciepła i jego przekazywania związane z realizacją procesu technologicznego. Obrabiarka podczas eksploatacji ciągle nagrzewa się lub stygnie w sposób bardzo złożony stosownie do złożoności procesów generowania, przekazywania i akumulacji ciepła w obrębie jej struktury. Nadaje to błędom cieplnym charakter szybkozmienny. Zmiany geometrii obrabiarki wynikające ze zróżnicowanej rozszerzalności cieplnej elementów obrabiarki pokazuje poglądowo rys. 2.

Błędy, które pojawiają się dopiero w trakcie pracy mogą być też związane z niedokładnością interpolatorów i działaniem napędów. Serwonapędy pracują zazwyczaj w pętli sprzężenia zwrotnego i nigdy nie reagują na uchyb natychmiast. Zawsze występuje pewne opóźnienie czasowe, które odpowiada częstotliwości odświeżania wartości zadanych w regulatorze. Właściwe dobranie tej częstotliwości, dostosowane do prędkości, z jaką mogą przemieszczać się zespoły maszyny, jest istotne dla dokładności kinematycznej napędów.

Błędy powstające na skutek drgań są następstwem procesu obróbki i jego oddziaływania na obrabiarkę. Ich wielkość jest uzależniona od zastosowanych parametrów samego procesu, właściwości obrabiarki, a także prawidłowego działania par kinematycznych np. łożysk czy napędów obrotowych. Eliminacja tych zakłóceń jest bardzo trudna. Konstruktorzy starają się więc ograniczyć je już w trakcie procesu projektowania obrabiarki, stosując coraz to nowsze i skuteczniejsze metody aktywnej redukcji drgań [26].



Rys. 2. Wpływ odkształceń cieplnych na geometrię obrabiarki [4]: a) charakter zmian geometrii, b) zmiany wygenerowane symulacyjnie (MES)

Fig. 2. Effect of thermal deformation on the geometry of the machine [4]: a) character of geometry changes, b) changes generated by simulation (FEM)

W wysokoobrotowych zespołach wrzecionowych pojawiają się dynamiczne osiowe ruchy wrzeciona przy zmianach prędkości tzw. shift, które osiągają duże wartości i wymagają ograniczenia oraz kompensacji. Podstawą do ich skutecznej kompensacji może być symulacja komputerowa zachowania się wysokoobrotowego zespołu wrzecionowego, pozwalająca na modelowanie tego zjawiska [12].

3. POŚREDNIE METODY WYZNACZANIA BŁĘDU PRZESTRZENNEGO

3.1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA METOD

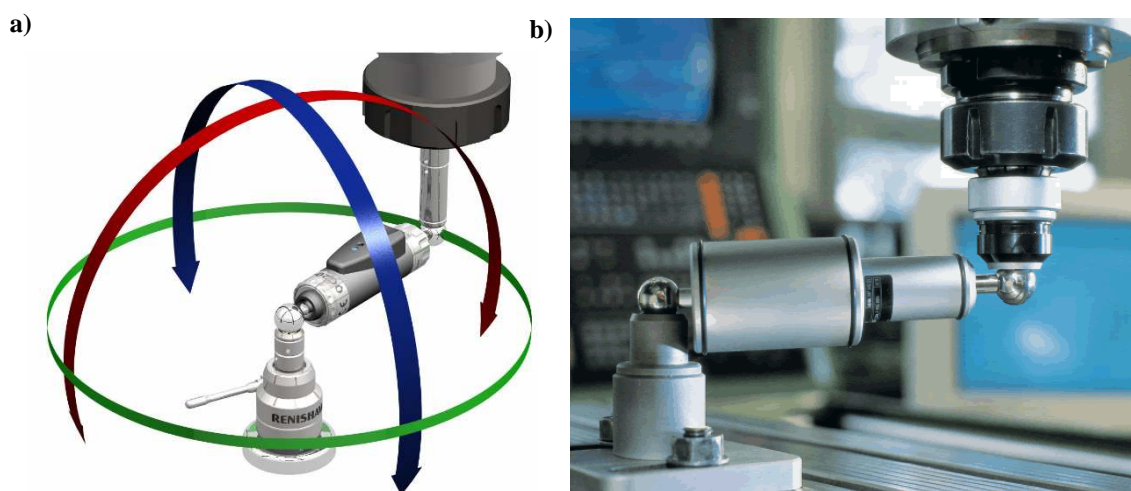
Asortyment handlowych specjalistycznych przyrządów pomiarowych, które pozwalają na pomiary obrabianego przedmiotu lub ocenę dokładności obrabiarki jest bardzo szeroki. Są to przede wszystkim stykowe i bezstykowe sondy pomiarowe, szeroko rozpowszechnione w przemyśle obrabiarkowym, do oceny dokładności wykonania obrabianego przedmiotu. Do szybkiej natomiast identyfikacji błędów obrabiarki i oceny jej dokładności najczęściej stosowane są kinematyczne pręty kulowe DBB (double ball bar) i siatki optyczne (cross grid).

3.2. KINEMATYCZNY PRĘT KULOWY DBB

Obecnie w przemyśle obrabiarkowym jednym z najbardziej rozpowszechnionych narzędzi do testowania dokładności kształtowej 3-osiowych obrabiarek CNC są systemy typu Ballbar np. QC10, QC20 i DBB 110. Stosowane są one do wykonywania

podstawowego testu, jakim jest badanie odchyłki okrągłości. Ten test wymaga od maszyny wykonania ruchu po okręgu w określonej płaszczyźnie i z zadanymi wartościami posuwu. Metoda ta od strony sprzętowej i programowej jest rozwijana głównie przez firmy Renishaw i Heidenhain. Za pomocą kinematycznego pręta kulowego DBB umieszczonego pomiędzy stołem a wrzecionem obrabiarki, sprawdzana jest dokładność ruchu po okręgu nazywana też dokładnością interpolacji kołowej. Ballbar QC20-W daje możliwość przeprowadzenia pomiaru błędu 3D, tzn. w trzech ortogonalnych płaszczyznach, bez zmiany położenia centralnego podparcia (rys. 3). W jednej płaszczyźnie, najczęściej XY, wykonywana jest pełna interpolacja kołowa (0° - 360°), a w pozostałych płaszczyznach, w tym przypadku XZ i YZ pomiary odbywają się na łuku częściowym, maksymalnie do 220° . Takie działanie przyrządu w jednym jego zamocowaniu pozwala przeprowadzić test we wszystkich trzech płaszczyznach, co znacznie przyspiesza sprawdzenie dokładności obrabiarki.

Test diagnostyczny pozwala zidentyfikować wiele błędów. Poza wspomnianą już odchyłką okrągłości pozwala również określić luz zwrotny, błąd nawrotu, drgania regularne i nieregularne, błąd nadążania, błąd skali, błąd prostopadłości osi itp. Na ekranie monitora otrzymuje się wykres odchyłki okrągłości [37], zgodnie z normą ISO 230-4:2005 i normą ASME B5.54-2008. Wyświetlana jest wartość odchyłki okrągłości jak również pokazywane są wartości poszczególnych błędów w przedziałach min-max. Wyświetlany jest również procentowy udział poszczególnych rodzajów błędów w interpolacji kołowej. Parametrem mówiącym o jakości obrabiarki jest oprócz odchyłki okrągłości dokładność pozycjonowania. Ten ostatni parametr skupia w sobie większość błędów i mówi, z jaką tolerancją można wytwarzać elementy.



Rys. 3. Pomiar błędów obrabiarki za pomocą przyrządów Ballbar: a) QC20-W [55], b) DBB 110 [53]
 Fig. 3. Measurement of machine tools errors Ballbar instruments: a) QC20-W [55], b) DBB 110 [53]

Dokładność obrabiarki jest oceniana na podstawie dokładności interpolacji kołowej i dokładności pozycjonowania. Program wykorzystywany do obsługi Ballbara posiada możliwość analizy przeprowadzonych pomiarów. Na podstawie konkretnego wykresu,

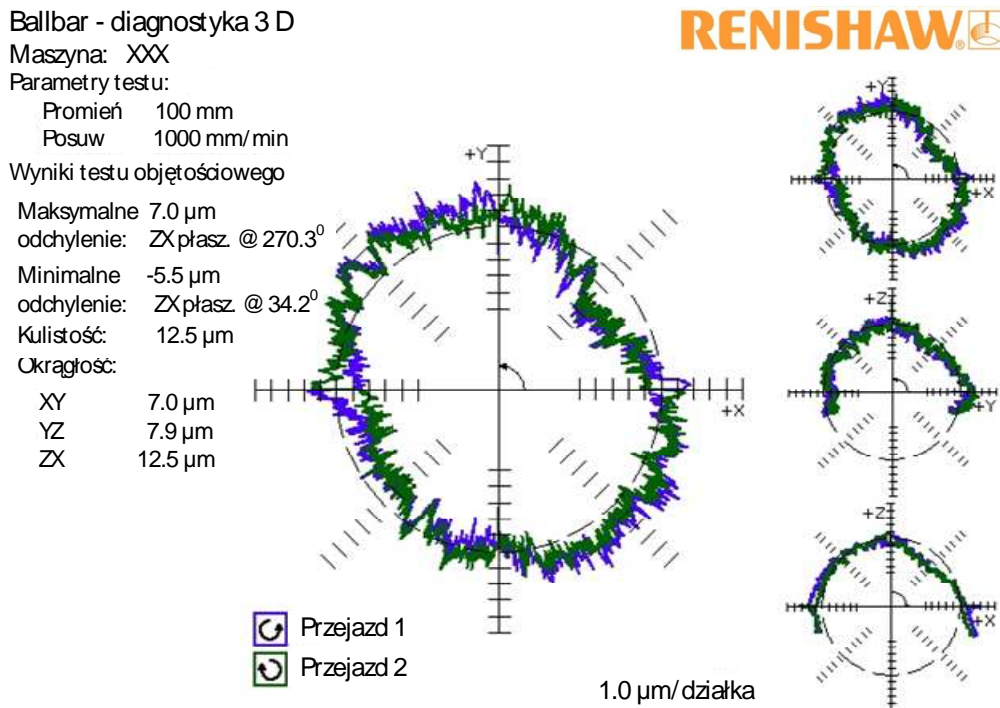
otrzymanego z testu i procentowego udziału poszczególnych błędów w interpolacji kołowej, można zlokalizować w obrabiarce te podzespoły, które w najbardziej negatywny sposób wpływają na jej dokładność. Przykładem jest błąd nawrotu (reversal spikes), który może wynikać z nadmiernego luzu między śrubą toczną a nakrętką, luzu w przekładni zębatej, a zwłaszcza zbyt wolnej odpowiedzi serwonapędu na sygnał z układu sterowania [16].

Oprogramowanie Ballbar 20, oferowane przez firmę Renishaw, posiada funkcję nazwaną symulatorem wykresów. Daje on możliwość przeglądania na ekranie wyników testu oraz pozwala na symulowanie różnych modyfikacji geometrii obrabiarki, luzów i parametrów dynamicznych. Te symulacje pozwalają operatorowi, na podstawie metody prób i błędów, dobrać optymalne parametry pracy obrabiarki, np.: wartości położeniowego współczynnika wzmocnienia, który dobrany nieprawidłowo powoduje błąd nadażania [28]. Ponieważ jest to tylko symulacja mamy zawsze pewność, że dane oryginalne nie zostaną zmienione. Dopiero po zakończeniu symulacji i wyznaczeniu optymalnych wartości współczynników wprowadza się je do sterownika obrabiarki. Jednak nie w każdym przypadku jest to możliwe, ponieważ nie zawsze producent obrabiarek daje możliwość programowego korygowania geometrii, luzu czy parametrów dynamicznych. Wprowadzenie zmienionych danych często wymaga przestawienia obrabiarki na tzw. „tryb serwisowy”, którego włączenie wymaga specjalnych uprawnień obsługi. Inną funkcją dostępną w Ballbar 20 jest archiwizacja danych z poszczególnych testów oraz tworzenie szablonów testów [55]. Na tej podstawie można zauważyć, w jakim tempie zużywa się obrabiarka, co pozwala przewidzieć i odpowiednio zaplanować czynności serwisowe - naprawę lub wymianę zużytych elementów.

Ballbar QC 20 charakteryzuje się dokładnością +/- 1,25 μm , rozdzielczością 0,1 μm i maksymalną szybkością próbkowania 1000 na sekundę. Zastosowanie urządzenia „bluetooth” umożliwia transmisję danych na odległość do 10 metrów. Niweluje to szereg problemów jakie powstawały w przypadku poprzedniej generacji urządzenia Ballbar QC 10, gdzie transmisja danych przeprowadzana była za pomocą przewodu narażonego na uszkodzenia i przerwania. Transmisja bezprzewodowa danych pomiarowych pozwala na testy z zamkniętymi osłonami obrabiarek.

Pręt kinematyczny Ballbar jest chętnie stosowany do diagnostyki obrabiarek głównie dzięki takim cechom jak: możliwość stosowania go w warunkach warsztatowych, odporność na zabrudzenia i chłodziwo oraz duża szybkość działania urządzenia [41]. Jak twierdzi producent kompletną diagnostykę można przeprowadzić już w 10 minut. Odporność na zabrudzenia związana jest głównie z brakiem układów optycznych, co daje przewagę temu urządzeniu np. nad interferometrem laserowym, w którym te układy są niezbędne do działania całego urządzenia.

Istotne ograniczenie dla stosowania omawianej metody stanowi system ekspertowy opracowany przez producenta Ballbara. Opracowany on został tylko dla prostych 3-osiowych konstrukcji centrów frezarskich ze śrubami tocznymi i 3-osiowych centrów tokarskich [55]. W przypadku pozostałych maszyn, zarówno tradycyjnych, jak i o kinematyce równoległej, możliwe jest wykonanie tylko prostego testu interpolacji kołowej [6].



Rys. 4. Charakterystyka przykładowych wyników testu okrągłości [55]

Fig. 4. Characteristics of the sample test roundness test results [55]

Do innych wad tego urządzenia zaliczyć trzeba to, że wykorzystując Ballbar pomiary przeprowadza się tylko w wybranej części przestrzeni roboczej obrabiarki. Pomimo tego, że producent oferuje różne długości pręta dwukulowego, co daje możliwość dokonywania testów na okręgu o promieniu w zakresie od 50 do 1350 mm to i tak nie da się otrzymać mapy błędów w całej przestrzeni roboczej. Ponadto ścieżka pomiaru musi mieć zawsze kształt koła lub jego fragmentu [41].

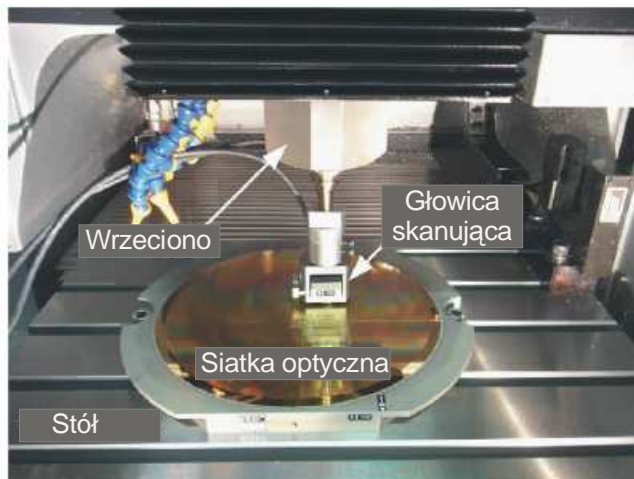
Mimo wymienionych wad Ballbar, głównie dzięki szybkości i prostocie pomiaru, pozwala na częstą diagnostykę obrabiarek bez nadmiernych przestojów w procesie produkcyjnym.

Wykorzystanie wyników uzyskiwanych Ballbarem do kompensacji błędu przestrzennego wymaga uzupełniających pomiarów innymi metodami i opracowania odpowiednich procedur wiążących te wyniki ze składowymi błędami przestrzennymi. Procedury takie opracowywane są zarówno w ramach badań naukowych [21] jak i przez producentów urządzeń realizujących te metody.

3.3. METODA SIATEK OPTYCZNYCH

Metoda siatek optycznych i urządzenie KGM (Cross Grid encoder), rozwijane obecnie przez firmę Heidenhain, przeznaczone jest głównie do oceny statycznych i dynamicznych błędów obrabiarki. Urządzenie składa się z laserowej głowicy skanującej mocowanej do

wrzeciona i dwóch szklanych płyt z naniesionymi siatkami tytanowymi, odbijającymi i tłumiącymi światło – mocowanych na stole obrabiarki (rys. 5). Obie siatki ustawione są względem siebie prostopadłe (krzyżują się) .



Rys. 5. System KGM podczas pomiarów dokładności precyzyjnej obrabiarki [50]
Fig. 5. KGM system setup when measuring the accuracy of a precision machine tool [50]

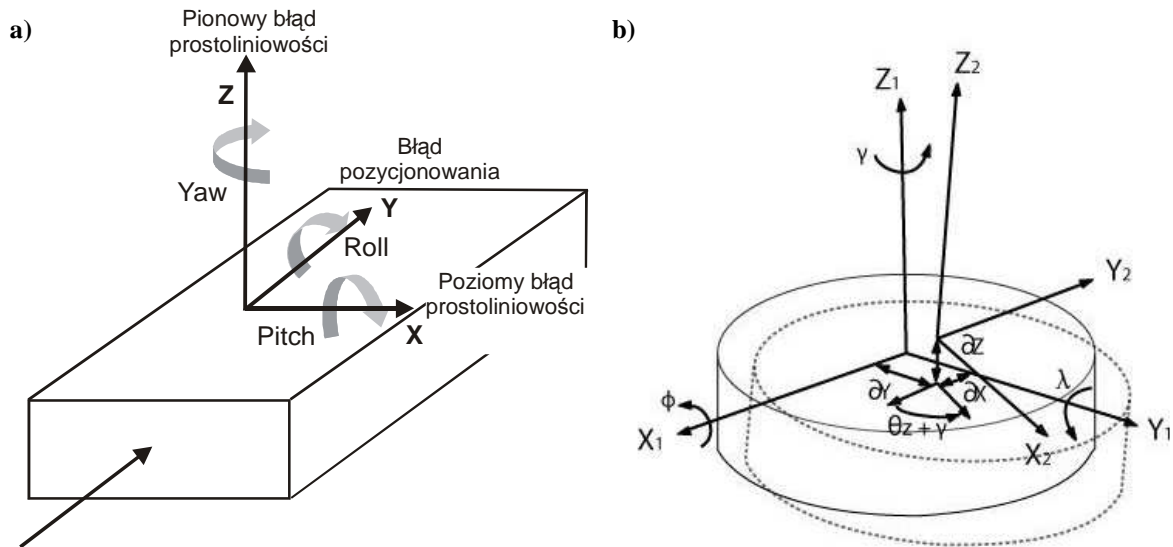
Metoda ta pozwala rozróżnić błędy związane ze strukturą mechaniczną obrabiarki od błędów związanych ze sterowaniem ruchami dwóch osi. Stosując bowiem małe promienie okręgów podczas interpolacji kołowej wpływ błędów geometrycznych jest pomijalny. Duży promień okręgu pozwala na dokładniejsze wyznaczenie błędów geometrycznych. Podczas pomiaru mogą być wykonywane dowolne ruchy w testowanych płaszczyznach XY, XZ lub YZ. Test, podobnie jak test Ballbarem, wykonywany jest zgodnie i przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, w celu wykrycia histerezy związanej z różnicami w sterowaniu osiami obrabiarki. Transformacja wyników z KGM na składowe błędy przestrzennego wymaga odpowiednich algorytmów przeliczeniowych. Algorytmy takie, omówione np. w pracy [53], pozwalają na wyznaczenie 21 składowych błędów przestrzennego obrabiarki 3-osiowej. Oparte są one na kinematycznym modelu błędów i wykorzystują metodę HTM (Homogenous Transformation Matrix).

4. BEZPOŚREDNIE METODY WYZNACZANIA BŁĘDU PRZESTRZENNEGO

4.1. BŁĄD PRZESTRZENNY

Błąd przestrzenny jest najbardziej wiarygodnym parametrem opisującym dokładność obrabiarki. Jego znajomość w całej przestrzeni roboczej pozwala na zwiększenie dokładności wykonywanych części na drodze kompensacji błędów, realizowanej przez układ sterowania CNC. Rodzaje i liczba błędów składająca się na błąd przestrzenny zależy

od konstrukcji obrabiarki tzn. od liczby osi sterowalnych liniowych i obrotowych. Możliwe błędy, jakie mogą wystąpić w osiach sterowalnych obrabiarek pokazano na rys. 6. Oprócz nich występują jeszcze błędy związane z oddziaływaniem błędów w jednej osi na błędy w innej osi.



Rys. 6. Błędy w osiach sterowanych a) osie liniowe, b) osie obrotowe [39]
Fig. 6. Errors in controlled axis a) linear axis, b) rotary axis [39]

Dla obrabiarki 3-osiowej jest zatem 21 błędów, z czego 3 to błędy wzajemnej prostopadłości trzech osi. W obrabiarkach o większej liczbie osi składowych błędy przestrzennego może być znacznie więcej. Dla maszyn 5-osiowych o dwóch osiach obrotowych liczba składowych wynosi już 43.

Zgodnie z konwencjonalną definicją przestrzenny błąd geometryczny w przestrzeni 3D, wyznaczany interferometrem laserowym 1D, jest średnią kwadratową z trzech błędów pozycjonowania w osiach x , y , z . Zminimalizowanie tak rozumianego błędu przestrzennego nawet do zera nie gwarantuje jednak oczekiwanej dokładności obrabiarki, gdyż definicja ta nie uwzględnia wszystkich składników błędu. Identyfikacja interferometrem 1D wszystkich 21 składowych, dla punktów rozmieszczonych w całej przestrzeni roboczej, jest nierealna ze względów czasowych i z powodu oddziaływań cieplnych środowiska w długim przedziale czasowym.

Rozwój narzędzi i metod pomiarowych doprowadził do modyfikacji definicji błędu przestrzennego. Od roku 2000, zgodnie ze standardem ASME B5.54 i ISO 230-6, obejmuje on oprócz błędów pozycjonowania również poziome i pionowe błędy prostoliniowości oraz błędy kątowe (Roll, Pitch, Yaw). Standardom tym, dotyczącym obrabiarek 3-osiowych, mogą sprostać urządzenia realizujące pomiary przemieszczeń wzdłuż czterech przekątnych przestrzeni roboczej np. metodą wektorową.

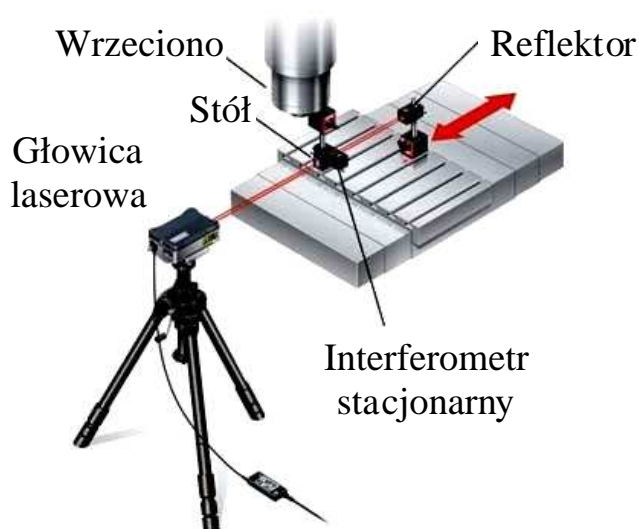
Coraz większa łatwość pomiaru i kompensacji błędów pozycjonowania sprawia, że dominującymi błędami stają się prostopadłość i prostoliniowość osi. Ponadto urządzenia i metody pomiarowe skuteczne dla osi liniowych są mało przydatne do identyfikacji błędów osi obrotowych. Wyznaczenie błędu przestrzennego przy bardzo dużej liczbie jego

składowych i ich zróżnicowaniu jest zadaniem niezmiernie złożonym. Tym potrzebom mogą sprostać tylko najnowsze osiągnięcia techniczne i metody pomiarowe jak laserowe pręty wektorowe z pomiarem położenia kątowych lub śledzące systemy laserowe. Rosnąca dostępność innowacyjnych mikroukładów opto-foto-elektronicznych jak: diody laserowe, kamery CCD, przetworniki PSD itp. sprawia, że wciąż opracowywane są stosunkowo tanie urządzenia i odpowiednie metody pomiarowe ukierunkowane nie na sumaryczny błąd przestrzenny obrabiarek, lecz pomiary dokładności ruchowej najważniejszych zespołów jak: wrzeciono, skrzynia głowica wrzecionowa, stół wahliwy itp. Błędy tych zespołów mogą być następnie niezależnie kompensowane.

4.2. INTERFEROMETR LASEROWY JEDNOOSIOWY

Jednym z najdokładniejszych sposobów oceny dokładności obrabiarki jest opracowanie mapy błędów dla całej przestrzeni roboczej maszyny. Wymaga to przeprowadzenia pomiarów dokładnościowych we wszystkich osiach ruchu obrabiarki. Ze względu na dużą dokładność, do pomiaru przemieszczeń i kątów wykorzystywany jest interferometr laserowy [2].

Obecnie do najprostszych interferometrów laserowych należą przyrządy mogące wykonywać pomiary w jednej osi. Wykorzystywane są one do pomiaru przemieszczeń liniowych i kątowych, płaskości, dokładności pozycjonowania zespołów obrabiarki itp. Takie interferometry jednoosiowe proponują m.in. firmy Hewlett-Packard, Lasertex i Renishaw (rys. 7). Interferometry laserowe w porównaniu do Ballbara charakteryzują się większą dokładnością pomiaru liniowego - w granicach $\pm 0,5 \mu\text{m/m}$.



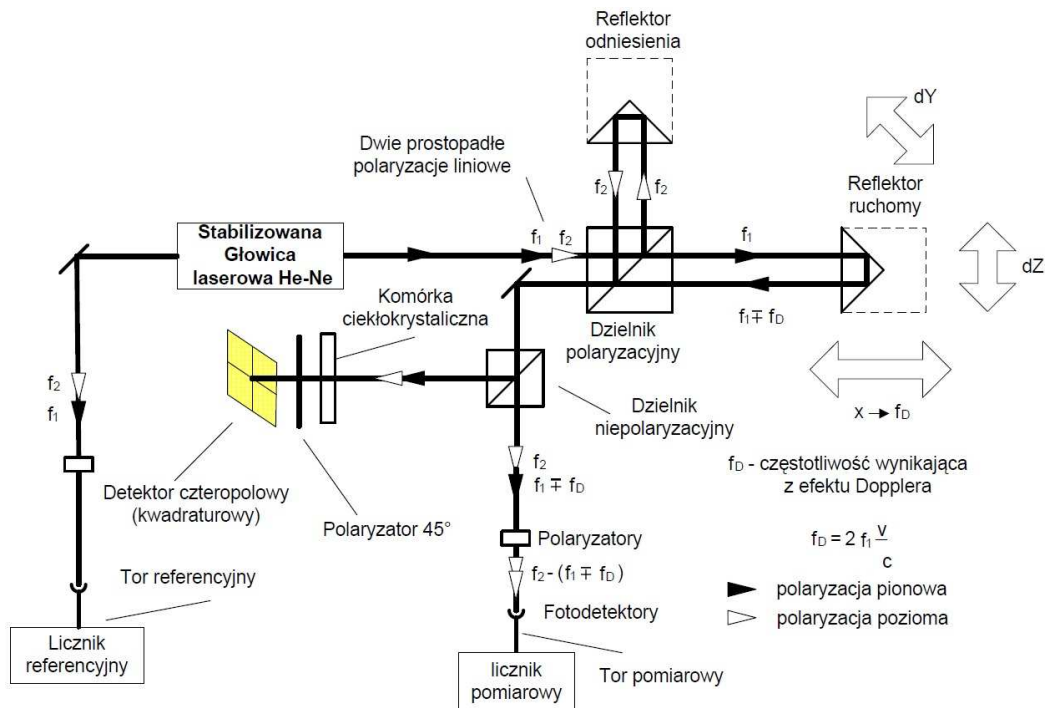
Rys. 7. Pomiar dokładności pozycjonowania stołu frezarki przy użyciu interferometru laserowego [55]
Fig. 7. Measurement of positioning precision for milling machine table using a laser interferometer [55]

Zmiana osi pomiarowej wymaga przestawienia optyki lasera. Takie rozwiązanie jest bardzo mało wydajne i czasochłonne. Związane jest to z tym, że wszystkie pomiary należy wykonać trzykrotnie, dla każdej osi oddzielnie, a każda zmiana położenia lasera lub optyki wymaga przeprowadzenia kalibracji całego układu. Powoduje to, że do określenia 21-parametrowego modelu błędów geometrycznych potrzeba kilku dni dla trzyosiowej obrabiarki [44]. Zwykle nie ma możliwości wyłączenia obrabiarki na tak długi okres czasu. Z tego powodu w praktyce wyznacza się zazwyczaj tylko najważniejsze składniki błędu, co pozwala skrócić czas przestoju obrabiarki, i uzyskać jeszcze założoną dokładność wykonywanych przedmiotów. Jest to jednak rozwiązanie połowiczne, które nie pozwala w pełni wykorzystać danej maszyny.

4.3. INTERFEROMETR LASEROWY JEDNOOSIOWY 3D

Konstrukcja interferometru 3D jest zwykle modyfikacją interferometru 1D, polegającą na jego uzupełnieniu o układy pozwalające na równoczesny pomiar bocznych ruchów reflektora. Mogą to być kamery CCD, przetworniki PSD, detektory czteropolowe itp.

Przykładem takiego rozwiązania może być interferometr laserowy z detektorem czteropolowym (rys. 8) [2]. Jest to interferometr dwuczęstotliwościowy, wykorzystujący metodę heterodynową. Przeznaczony jest on głównie do przeprowadzania pomiarów geometrii obrabiarek CNC i maszyn współrzędnościowych. W przypadku laserów dwuczęstotliwościowych istotną sprawą jest rodzaj zastosowanej stabilizacji wiązki laserowej. Polega ona na pomiarze częstotliwości wynikającej z efektu Dopplera.



Rys. 8. Schemat zliczania impulsów metodą heterodynową [2]

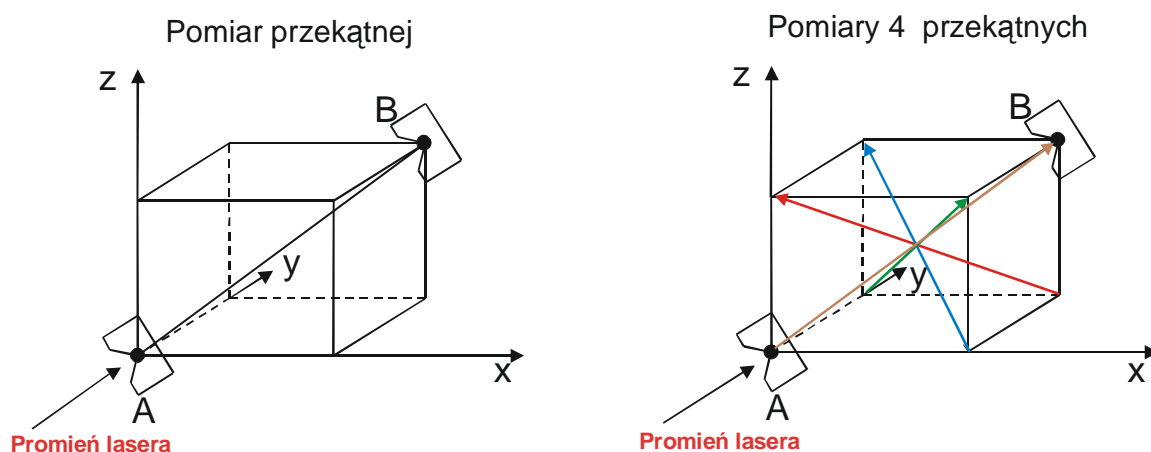
Fig. 8. Diagram of pulse counting method of heterodyne [2]

Ponieważ mierzona jest różnica częstotliwości pomiędzy torem pomiarowym a torem odniesienia, cały układ jest odporny na zmiany amplitudy wiązki powrotnej czy zakłócenia pochodzące od detektorów. Istotną wadą tego rozwiązania jest ograniczenie prędkości przesuwu ramienia pomiarowego w jednym kierunku do ok 0,3 m/s. [54]. W tym rozwiązaniu istnieje możliwość pomiaru drugiej osi, co wymaga zastosowania odpowiedniego dzielnika, ale zmniejsza się wówczas moc wiązki laserowej o 50%. Może to utrudnić lub uniemożliwić wykonywanie pomiarów na większych obrabiarkach.

Wykonując interferometryczne pomiary liniowe np. w osi x, jednocześnie mierzone są analogowo w zakresie +/- 1mm odchylenia w osiach y i z, z zastosowaniem komórki ciekłokrystalicznej i detektora czteropolowego. Dzięki temu w każdym punkcie pomiarowym rejestrowany jest błąd pozycjonowania wzdłuż mierzonej osi i dwa błędy jej prostoliniowości (poziomej i pionowej). Dokładność pomiaru wzdłuż mierzonej osi jest równa dokładności interferometru, a w pozostałych dwóch osiach jest ona zwykle mniejsza. W efekcie metoda ta pozwala na znaczne skrócenie czasu potrzebnego do oceny dokładności badanej maszyny. Równocześnie korzystając z dołączonego oprogramowania otrzymuje się tabele z wartościami kompensacyjnymi dla obrabiarek wyposażonych w takie sterowniki jak np. Siemens lub Heidenhain.

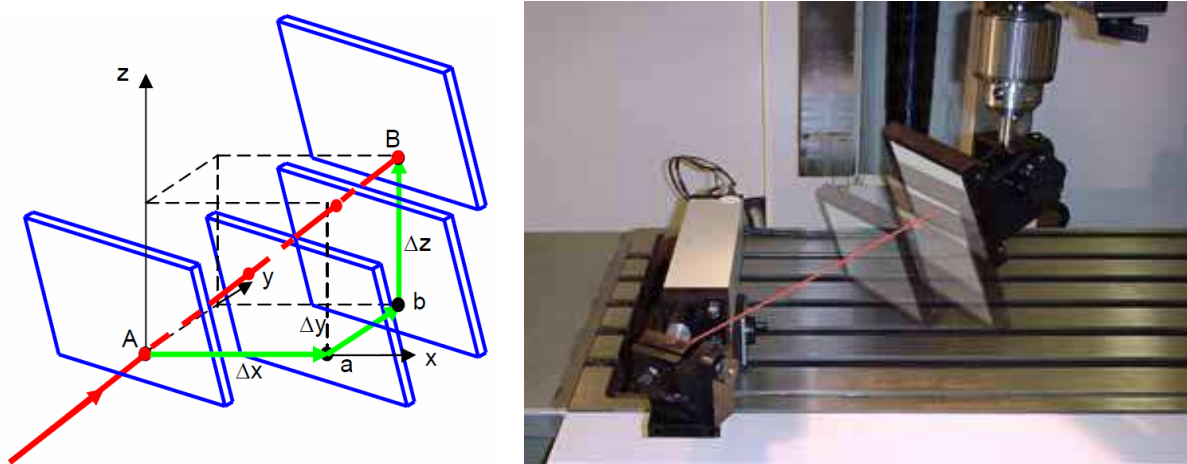
4.4. INTERFEROMETR LASEROWY– METODA WEKTOROWA

Pomiary wszystkich składowych błędów przestrzennego, omówionymi metodami laserowymi 1D i 3D, są technicznie trudne i bardzo pracochłonne. Dla ich uproszczenia opracowana została propozycja analitycznego wyznaczania większości składowych, na podstawie pomiaru laserem 1D przekątnych prostopadłościanu, opisującego przestrzeń roboczą obrabiarki [22]. Do jednoznacznego wyznaczenia tych składowych potrzebne są pomiary dla wszystkich czterech przekątnych (rys. 9).



Rys. 9. Pomiary przekątnej
Fig. 9. Diagonal measurement

Do zrealizowania procedury pomiaru przekątnej laserem 1D niezbędne jest zastosowanie odbłyśnika w postaci lustra płaskiego o możliwie dużych wymiarach. Pozwala to na boczne odchylenia lustra względem głowicy laserowej bez rozjustowania optyki systemu laserowego. Pomiar przekątnej w tej metodzie polega bowiem na sekwencyjnym przesuwaniu lustra względem promienia laserowego, wyznaczającego mierzoną przekątną, w kierunkach x, y, z o wartość $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ (rys. 10). Zaletą jest to, że jednocześnie mierzone są błędy pozycjonowania i błędy prostoliniowości.



Rys. 10. Wektorowa metoda pomiaru [43]

Fig. 10. Vector method measurement [43]

Porównując tę metodę pomiaru do bezpośredniego pomiaru przekątnych, to metoda wektorowa pozwala na uzyskanie trzy razy większej liczby danych. Wynika to z sekwencyjności ruchów w metodzie wektorowej, dzięki której możliwe jest gromadzenie wyników pomiaru przemieszczenia dla wszystkich pośrednich położen lustra. Po zakończeniu pomiaru, dla wszystkich czterech przekątnych, uzyskuje się dwanaście zestawów danych, z których można wyznaczyć 12 błędów: pozycjonowania (3), prostoliniowości poziomej (3) i pionowej (3) oraz prostopadłości osi (3). Wyniki mogą być przedstawiane w tabelach lub w postaci wykresów.

Zastosowanie metody wektorowej w obrabiarce lub maszynie współrzędnościowej o przestrzeni roboczej do 1 m^3 pozwala przeprowadzić pomiary wszystkich czterech przekątnych w czasie 2 – 4 godzin. Dzięki temu możliwe jest skrócenie czasu wyznaczania błędów obrabiarki w stosunku do metody zakładającej pomiar wszystkich rodzajów błędów indywidualnie [2]. Metoda ta oraz narzędzia programowe do wyznaczania poprawek dla celów kompensacji błędów obrabiarki rozwijane są m.in. przez Optodyne Inc. Dla niektórych sterowników (np. Fanuc, Siemens, Giddings and Lewis itp.) tabele kompensacyjne są generowane automatycznie, a po jej zastosowaniu otrzymuje się kilkukrotną poprawę dokładności. Ponadto metoda ta jest w pełni zgodna z normami ASME B5.54 oraz PN-ISO 230-2. Cały system pomiarowy jest przenośny, co umożliwia zastosowanie go na wielu różnych maszynach oraz daje możliwość sprawdzania

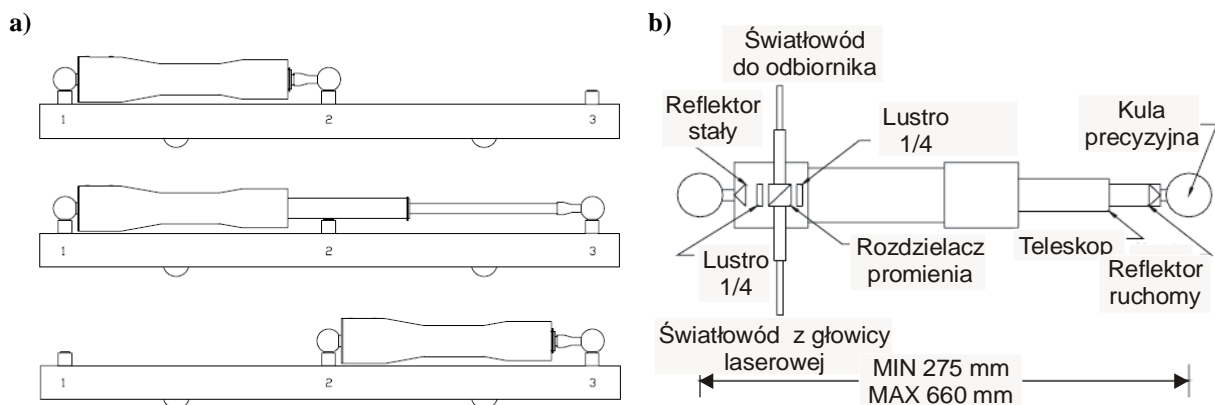
dokładności obrabiarek, nawet w niewielkich fabrykach, w których zakup droższego sprzętu nie jest uzasadniony [44].

Do stosowania metody wektorowej konieczne jest użycie specjalnego interferometru laserowego, który posiada izolację geometrycznej wiązki wychodzącej i powracającej i może współpracować z lustrem płaskim.

Główne ograniczenia metody wektorowej to: mały zakres ruchów w osiach x,y,z, wynikający z wielkości lustra, uwzględnianie tylko części składowych błędu przestrzennego oraz mała dokładność metody w przypadku dużych wartości błędów pozycjonowania [40].

4.5. LASEROWE PRĘTY KULOWE LBB

LBB (Laser Ball Bar) jest urządzeniem przeznaczonym do oceny dokładności obrabiarek przez bezpośrednie pomiary położenia narzędzia w przestrzeni roboczej w stosunku do powierzchni stołu. Tworzy je dwustopniowa tuleja teleskopowa z precyzyjnymi kulami mocowanymi na obu jej końcach i układem optycznym pozwalającym na laserowy pomiar odległości obu kul (rys. 11). Głowica laserowa łączona jest z urządzeniem za pomocą światłowodów.



Rys. 11. Laserowy pręt kulowy (LBB): a) pozycje kalibrowane [34], b) układ optyczny [33]

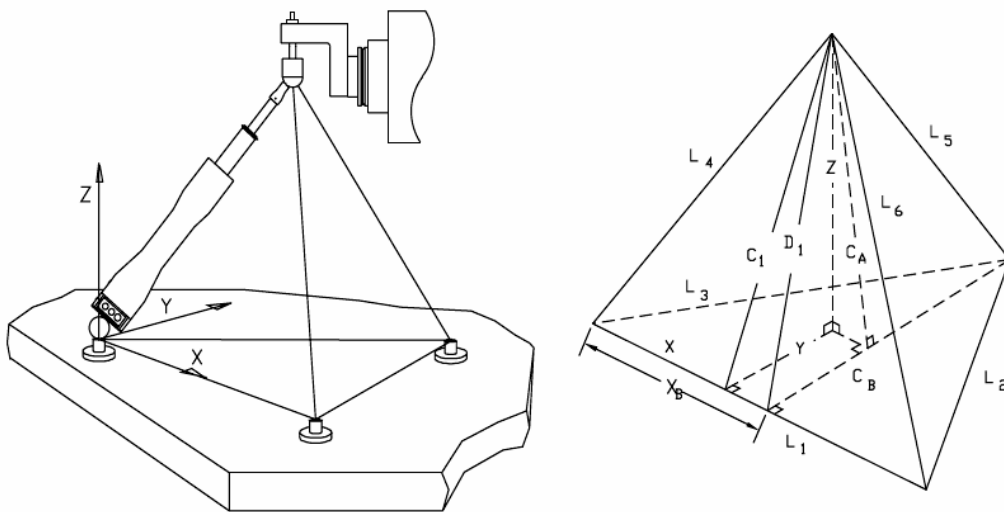
Fig. 11. Laser ball bar (LBB): a) calibrate position [34], b) optical system [33]

Pomiary odległości pomiędzy punktem na stole obrabiarki a punktem na końcówce wrzeciona nie pozwalają na dokładne wyznaczenie współrzędnych położenia wrzeciona w przestrzeni roboczej. Na podstawie takich pomiarów można tylko wyznaczyć błędy interpolacji kołowej oraz błędy prostokątności między osiami aktywnymi podczas testu. Wynika to stąd, że długość przekątnej niejednoznacznie definiuje jej orientację w przestrzeni. Z tego powodu opracowana została procedura trilateralna, polegająca na sekwencyjnie wykonywanych pomiarach urządzeniem LBB z trzech baz, rozmieszczonych na powierzchni stołu (rys. 12) [33]. Dzięki kalibrowanym pozycjom LBB wzajemne odległości trzech baz 1-2, 1-3, i 2-3 są znane, co pozwala, po zmierzeniu trzech krawędzi L4, L5, L6 powstałego w ten sposób czworościanu, wyznaczyć współrzędne jego

wierzchołka. Do wyznaczenia aktualnych współrzędnych przestrzennych wierzchołka x, y, z i oceny niepewności pomiarów [33], [9] wykorzystuje się zależności geometryczne

$$\begin{aligned}
 x &= \frac{L_4^2 - L_3^2 + L_1^2}{2L_1} & c_b &= \sqrt{L_3^2 - x_b^2} \\
 y &= \frac{d_1^2 - L_6^2 + c_b^2}{2c_b} & \text{gdzie: } x_b &= \frac{L_3^2 - L_2^2 + L_1^2}{2L_1} \\
 z &= \sqrt{c_1^2 - y^2} & d_1 &= \sqrt{c_1^2 + (x_b - x)^2} \\
 & & c_1 &= \sqrt{L_4^2 - x^2}
 \end{aligned}$$

oraz modele regresji liniowej i model HTM.



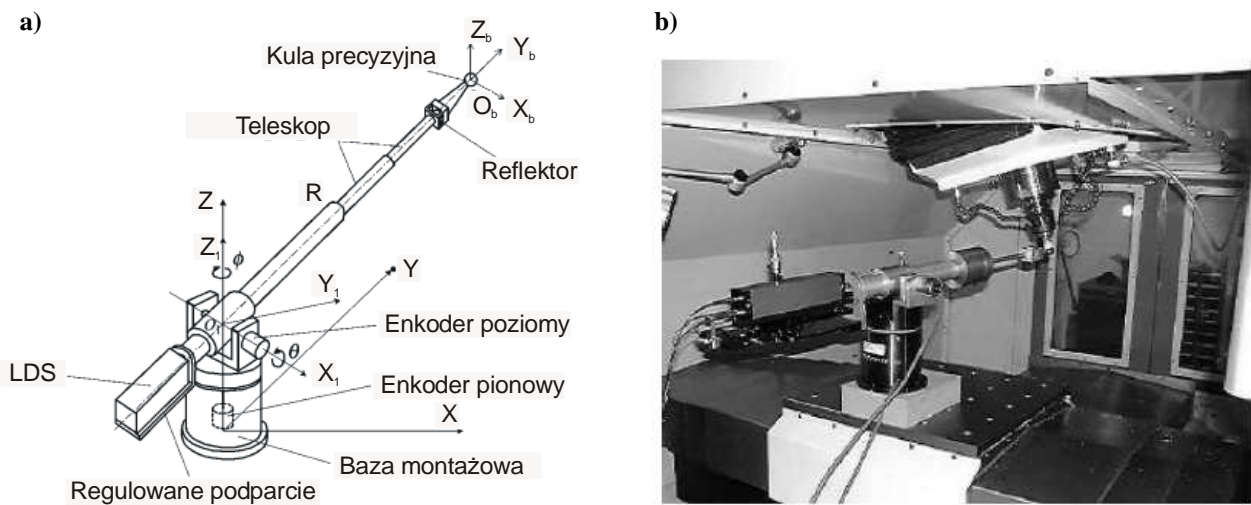
Rys. 12. Schemat układu współrzędnych i konfiguracja procedury trilateralnej [33]

Fig. 12. Diagram of coordinate system and setup for trilateration procedures [33]

Dzięki trilateralnej procedurze, na podstawie pomiarów położenia wrzeciona, wykonywanych z użyciem LBB, można wyznaczyć 21 składowych błędów przestrzennego, dla każdej z trzech liniowych osi sterowalnych. Wyznaczone wartości obejmują wszystkie oddziaływania na błąd obrabiarki, zarówno geometryczne jak też sprężyste i cieplne. Te ostatnie mogą negatywnie wpływać na dokładność oceny każdą metodą, gdy podczas kilkugodzinnych pomiarów błędów przestrzennego nie zapewni się stabilizacji temperatury otoczenia.

4.6. LASEROWY PRĘT KULOWY 3D LBB

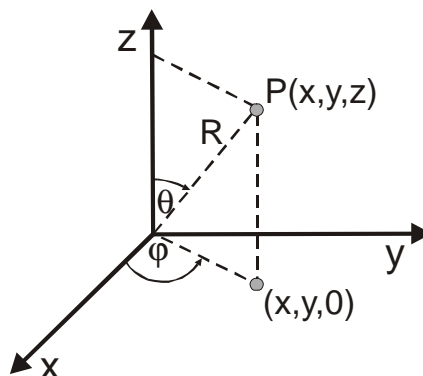
Uzupełnienie laserowych prętów kulowych o możliwość pomiaru dwóch kątów obrotu pręta pozwoliło uzyskać przyrząd nazywany 3D LBB, który rzeczywiście pozwala mierzyć położenie końcówki wrzeciona bezpośrednio i w czasie rzeczywistym. W przykładzie przedstawionym na rys. 13 zastosowano dwa laserowe enkodery obrotowe do pomiaru kąta obrotu względem osi pionowej z i poziomej x i pokazano precyzyjny interferometr laserowy do pomiarów liniowych.



Rys. 13. Laserowy pręt kulowy 3D (3D LBB): a) konstrukcja, b) widok urządzenia w czasie pomiaru [7]

Fig. 13. Laser ball bar 3D (3D LBB): a) construction b) view of the device during measurement [7]

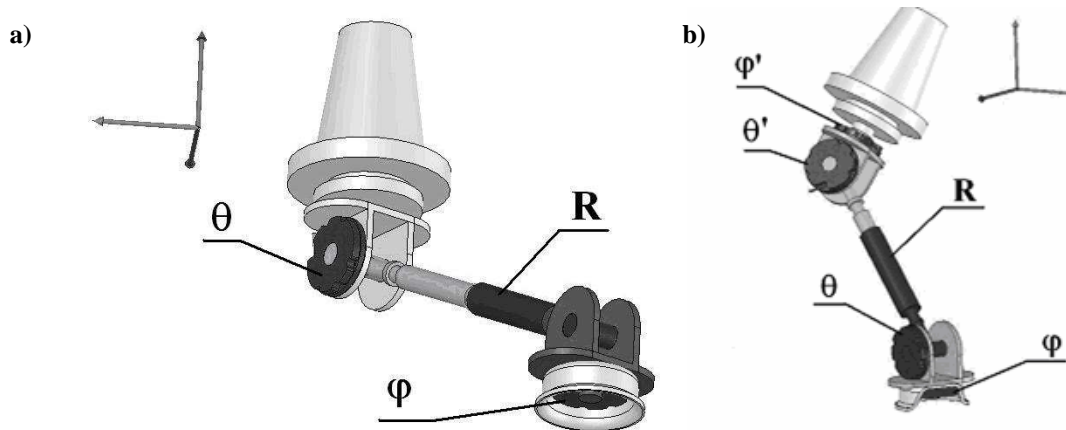
Trzy czujniki, jeden do pomiarów liniowych i dwa do pomiarów kąta obrotu, rejestrujące położenie pręta w układzie współrzędnych sferycznych, pozwalają na łatwą transformację wyników pomiaru do kartezjańskiego układu współrzędnych (rys. 14). Do wyznaczenia położenia punktu we współrzędnych sferycznych niezbędne jest określenie długości promienia R i dwóch kątów obrotu θ i φ .



Rys. 14. Transformacja wyników do kartezjańskiego układu współrzędnych

Fig. 14. Transformation of results to the Cartesian coordinate system

Do tej samej grupy należy zaliczyć rozwiązania nazywane prętami wektorowymi, realizujące omówioną wyżej zasadę, ale różniące się zastosowaną metodą pomiaru długości i kąta lub też liczbą mierzonych kątów (rys. 15) [41].



Rys. 15. Pręt wektorowy: a) z rozdzieleniem czujników pomiaru kąta, b) do pomiaru pięciu współrzędnych [41]
 Fig. 15. Vector bar: a) separation of the angle measuring sensors, b) measure of five coordinates [41]

Głównym ograniczeniem stosowania urządzeń LBB i 3D LBB jest minimalna i maksymalna długość pręta teleskopowego. Jednocześnie wyznaczają one część martwą przestrzeni roboczej, w której pomiary nie mogą być wykonywane i maksymalną wielkość przestrzeni roboczej, w której wykonywane są testy pomiarowe. Ograniczeń tych nie mają już najnowsze technologicznie śledzące systemy laserowe.

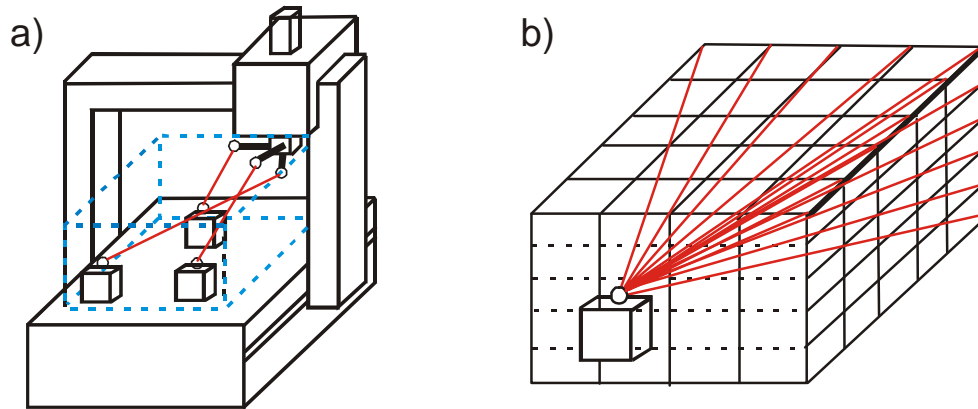
4.7. LASER ŚLEDZĄCY

Techniczne zrealizowanie koncepcji lasera śledzącego umożliwiło nowe podejście do odwzorowania błędów geometrycznych obrabiarki. Polega ono na interferometrycznych pomiarach przemieszczeń pomiędzy punktem referencyjnym związanym z bazą obrabiarki i ruchomym punktem (celem) związanym z głowicą lub oprawką narzędziową (rys. 16) [36], bez ograniczeń typowych dla przyrządów LBB i 3D LBB.

Dla każdego z trzech położenia lasera obrabiarka realizuje ruchy wrzeciennika tak, aby wypełnić możliwie dużą objętość przestrzeni roboczej. W każdym punkcie siatki przestrzennej ruchy osi są zatrzymywane i rejestrowane jest przemieszczenie reflektora względem nieruchomej kuli referencyjnej. Błędy obrabiarki są zdefiniowane jako różnice przemieszczeń nominalnych i zmierzonych.

Jednym z liderów w zakresie urządzeń i metod służących do identyfikacji i kompensacji błędów geometrycznych obrabiarek jest firma Etalon. Laser śledzący tej firmy (LaserTracer), wraz z niezbędnym oprogramowaniem, został opracowany przy współpracy z Physikalisch-Technische Bundesanstalt z Niemiec i National Physical Laboratory z Wielkiej Brytanii (rys. 17). Składa się on z interferometru laserowego, dwóch

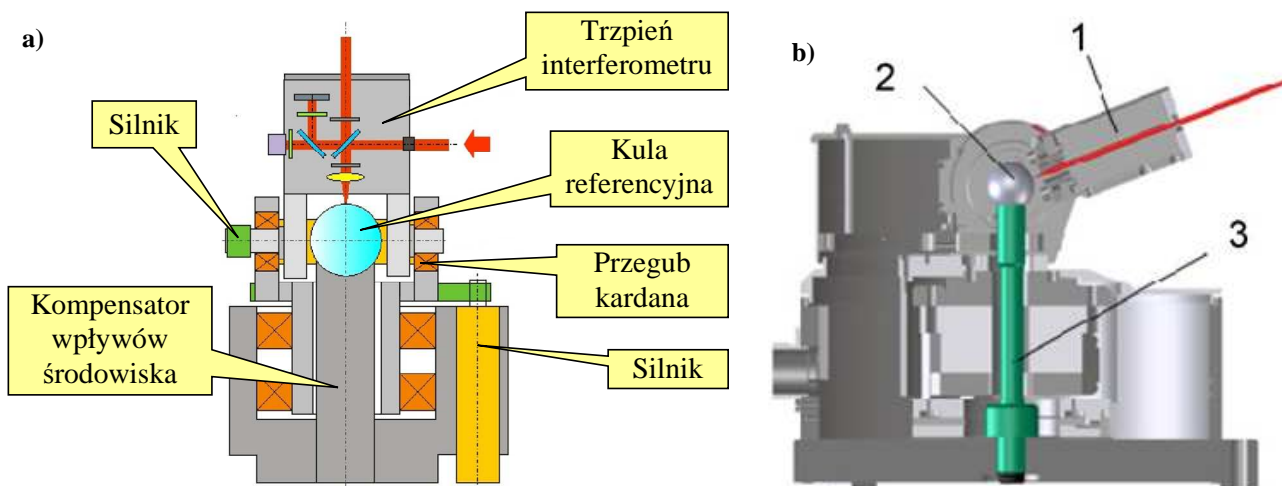
napędów dla realizacji obrotu interferometru w osi poziomej i pionowej, inwarowego kompensatora wpływu środowiska i reflektora ruchomego.



Rys. 16. Laser śledzący w co najmniej trzech pozycjach na stole obrabiarki: a) pozycje lasera, b) siatka przestrzenna [36]

Fig. 16. A lasertracker in at least three positions on the workpiece table: a) tracker positions, b) spatial grid [36]

Interferometr dzięki sterowanym silnikom automatycznie śledzi położenie ruchomego reflektora, umożliwiając pomiar odległości w dowolnej chwili. W tej konstrukcji trzpień interferometru porusza się w przegubie kardana, wewnątrz którego zamocowana jest precyzyjna kula stanowiąca stacjonarny punkt referencyjny i służąca jednocześnie, jako odniesienie dla interferometru. Rolę reflektora, w którym obszar pomiarowy jest ograniczony do $\pm 60^\circ$, spełnia układ optyczny „cats-eye”. Rozdzielczość wynosi $0,001 \mu\text{m}$, a zasięg 15 metrów [52].

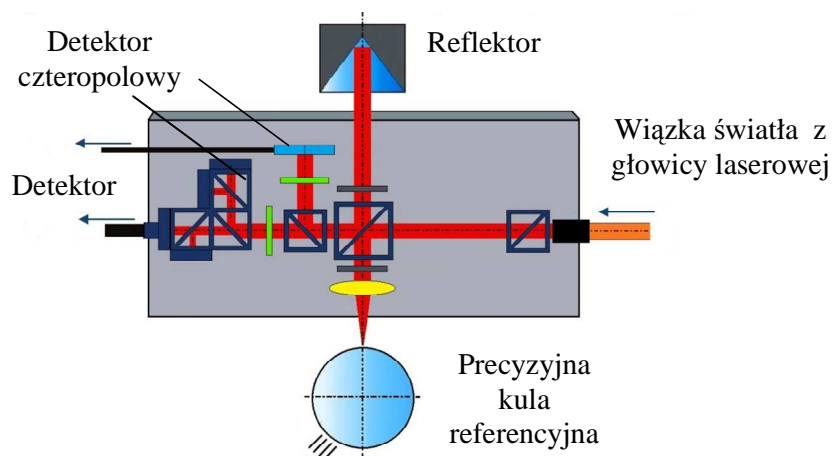


Rys. 17. Śledzący interferometr laserowy: a) struktura, b) (1) interferometr śledzący, (2) stacjonarna kula referencyjna, (3) niezmienny cieplnie pręt podpierający kulę referencyjną [35]

Fig. 17. Tracking laser interferometer: a) structure, b) schematic view: (1) tracking interferometer, (2) stationary reference sphere, (3) thermally invariant stem supporting the reference sphere [35]

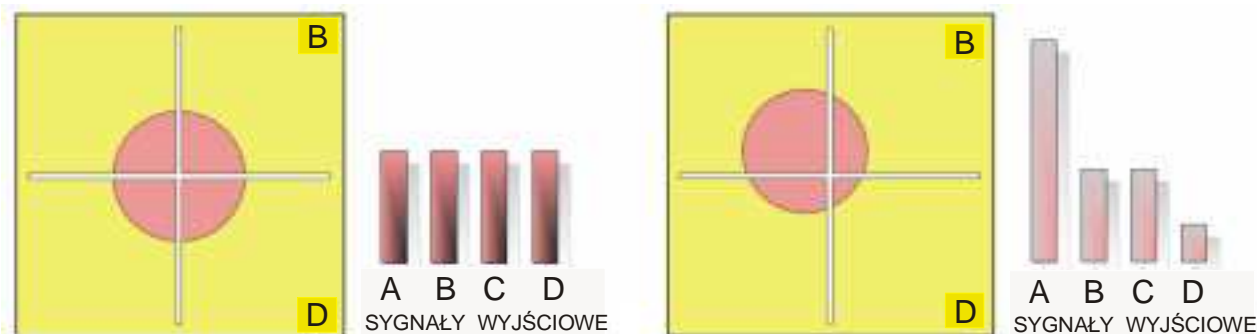
Dokładność pomiarów długości jest ściśle związana z dokładnością wykonania kuli referencyjnej, której błąd okrągłości nie powinien przekraczać 50 nm. [52]. Pozwala to zachować stałą dokładność w całym zakresie pracy interferometru [35]. Dodatkowo kula referencyjna zamontowana jest na podporze z materiału o niskim współczynniku rozszerzalności cieplnej (inwar), a promień lasera jest doprowadzany światłowodem z głowicy laserowej, umieszczonej poza obudową interferometru. Pozwala to zminimalizować oddziaływania cieplne i zmniejszyć masę ruchomych części przyrządu [42]. Jak w każdym innym rozwiązaniu także i ten interferometr ma kompensator wpływów środowiska: zmian temperatury, ciśnienia, wilgotności. Dzięki temu uzyskiwane pomiary cechują się znacznie wyższą dokładnością od dokładności konwencjonalnych laserów śledzących. Producent (firma Etalon) szacuje ją na 0,2 μm na odległości 0,2m, i 3 μm na odległości 5m.

Schemat układu optycznego interferometru przedstawia rys. 18. Doprowadzona, za pomocą światłowodu, wiązka światła laserowego załamywana jest na lustrze półprzepuszczalnym. Po załamaniu część promienia lasera przechodzi bezpośrednio do detektora, który dokonuje pomiaru, a część kierowana jest na kulę referencyjną. Wiązka światła zanim zostanie nałożona na wiązkę odniesienia odbijana jest od reflektora. Część wiązki odniesienia jest przekierowana na detektor czteropolowy [35]. Detektor czteropolowy wykrywa różnicę położenia pomiędzy kulą referencyjną a reflektorem. W ten sposób realizowana jest funkcja automatycznego śledzenia położenia reflektora. Detektor czteropolowy zbudowany jest z czterech fotodiód krzemowych, oddzielonych od siebie przerwą o szerokości kilkudziesięciu μm . Każdy obszar takiego czujnika generuje osobny sygnał. Wiązka laserowa padająca na powierzchnię detektora generuje cztery sygnały w postaci fotoprądów, o natężeniu odpowiednim do intensywności oświetlenia danego obszaru. Kiedy wiązka pada centralnie każde pole detektora jest oświetlone z taką samą intensywnością i każda dioda generuje taką samą wartość fotoprądu (rys. 19). W innym przypadku natężenie oświetlenia poszczególnych obszarów jest różne, co stanowi podstawę do obliczenia przemieszczeń w poszczególnych osiach, tak aby promień lasera nadążał za ruchem reflektora [2].



Rys. 18. Budowa układu optycznego w śledzącym interferometrze laserowym [35]

Fig. 18. Construction of optical tracking laser interferometer [35]



Rys. 19. Zależność sygnału wyjściowego z detektora od położenia wiązki światła laserowego [2]

Fig. 19. The dependence of the output signal on the position of the laser beam [2]

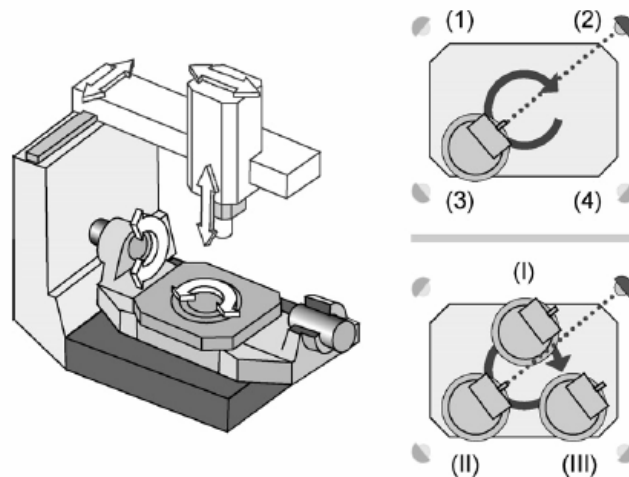
Dużą zaletą LaserTracera są jego niewielkie rozmiary, wynoszące 200 mm x 220 mm x 220 mm, dzięki czemu może być używany do pomiarów dokładności zarówno małych, jak i dużych obrabiarek.

Przeliczenia wykonywane podczas pomiarów dokładności obrabiarki wykonywane są na komputerze zewnętrznym, przez dołączane do urządzenia oprogramowanie TRAC-CAL. Reflektor mocowany do wrzeciona porusza się po zaprogramowanej trójwymiarowej siatce z przerwami na wykonanie pomiaru trwającymi 1-2 sekundy. Sekwencja pomiarów trwa 10-20 minut w jednym ustawieniu interferometru [42]. Po przeprowadzeniu takiej sekwencji laser śledzący jest mocowany w nowej pozycji i sekwencja pomiarów jest powtarzana. Pomiar może być przeprowadzany w 3-5 różnych zamocowaniach lasera. Gdy wykona się pomiary we wszystkich zaplanowanych pozycjach program TRAC-CAL oblicza błędy dla wszystkich parametrów [42]. Dodatkowo błędy przedstawiane są w postaci sprawozdań pomiarowych, co pozwala na szczegółową analizę błędów maszyn. Tabele kompensacyjne są dostosowane do tych sterowników, które pozwalają przeprowadzić pełną kompensację objętościową (np. Siemens 840 D sl, Heidenhain iTNC 530, Fanuc). Przetworzone dane pomiarowe w formie pliku wczytywane są do sterownika, który na ich podstawie oblicza wartości kompensacyjne.

W 2010 roku firma Etalon wprowadziła i opatentowała nowszą wersję oprogramowania TRAC-CAL. Opcja nazwana jako "on the fly" umożliwia skrócenie czasu pomiaru i zwiększyła liczbę punktów pomiarowych do trzech na milimetr [52]. Podłączenie LaserTracera do układu sterowania mierzonej maszyny pozwala na płynne przeprowadzanie pomiaru bez zatrzymywania w punktach pomiarowych.

Algorytm stosowany w pomiarach osi liniowych może być użyty dla osi obrotowych, gdy dostosuje się odpowiednio model błędu. Procedura dla identyfikacji błędów osi obrotowych wymaga wykonania pomiarów w kilku kombinacjach położenia lasera (3 położenia -I,II,III) i reflektora (4 położenia- 1,2,3,4). Pokazano to na rys. 20 w odniesieniu do stołu wahliwego 5-osowego centrum obróbkowego [38].

Błędy dla osi obrotowych są obliczane za pomocą algorytmów wielolateralnych, używanych również do oceny osi liniowych. Kinematyczny model błędu musi być również dostosowany do ruchów osi obrotowych. Model zaproponowany w pracy [38] zawiera wszystkie geometryczne błędy osi obrotowych wymienione w normie ISO 230-7.

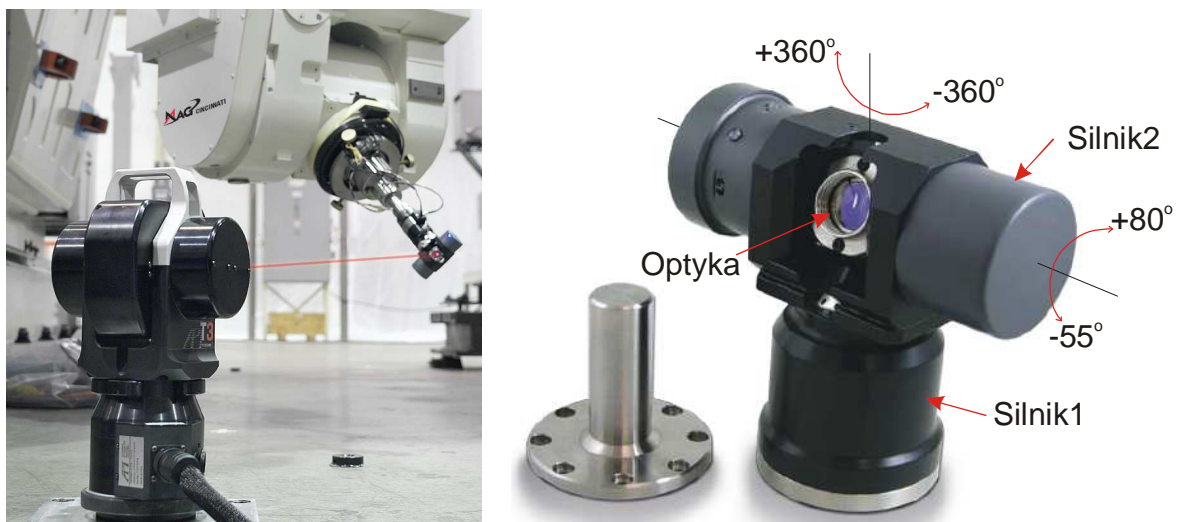


Rys. 20. Procedura kalibracji osi obrotowych przy użyciu śledzącego interferometru w trzech pozycjach (I–III) i czterech rozmieszczeniach reflektora (1–4). [38]

Fig. 20. Procedure for the calibration of rotary axes using a tracking interferometer in three positions (I–III) and four reflector locations (1–4). [38]

4.8. LASER ŚLEDZĄCY Z AKTYWNYM CELEM

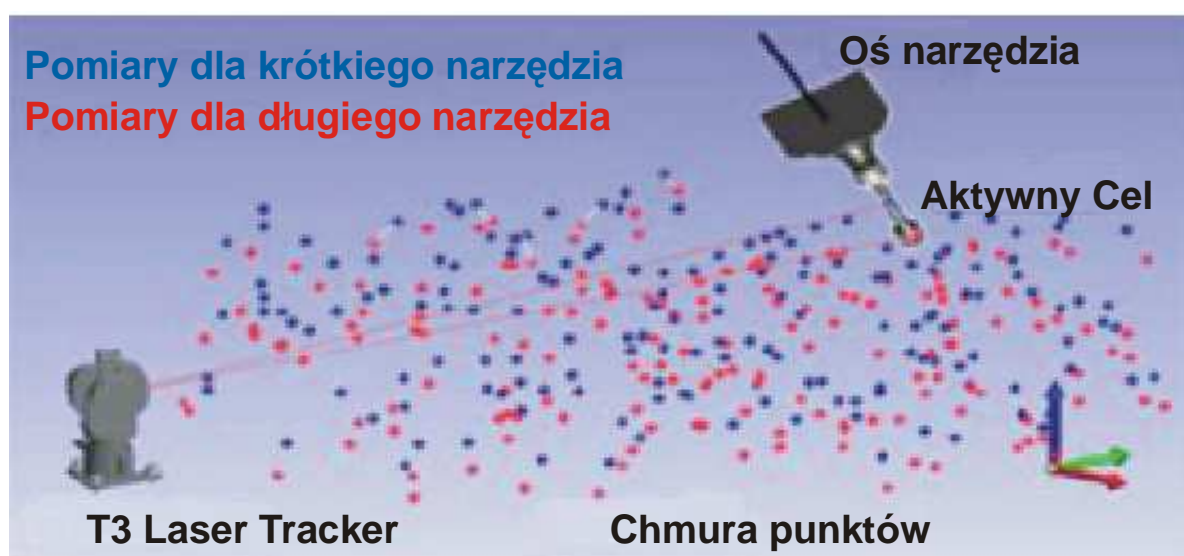
W wyniku realizacji zintegrowanego projektu pt. „Volumetric Accuracy for Large Machine Tool” realizowanego przez Automated Precision, Boeing, Siemens, Mag Cincinnati i Automated Precision Inc. opracowana została metodyka pozwalająca na precyzyjną kalibrację dużych wieloosiowych obrabiarek w krótkim czasie liczonego w godzinach. Do pomiarów używany jest specjalny laser śledzący T3 Laser Tracer współpracujący z opatentowanym aktywnym celem (Active Target) (rys. 21) [1].



Rys. 21. T3 Laser Tracker z aktywnym celem [1]

Fig. 21. Active Target T3 Laser Tracker [1]

Aktywny Cel jest kolejną generacją retroreflektorów, wyposażonych w dwa napędy, dzięki którym mogą się one automatycznie pozycjonować i śledzić wiązkę laserową, nie dopuszczając do jej przerwania. Prędkość zmian kąta padania wiązki laserowej na retroreflektor może wynosić nawet $50^\circ/\text{s}$. Dzięki możliwości obracania się retroreflektora o $\pm 360^\circ$ w jednej osi i $+80^\circ$ do -50° w drugiej. Do pomiarów błędu przestrzennego wystarcza jedno tylko położenie lasera śledzącego. Pomiar kończy się po zarejestrowaniu niezbędnej liczby wyników (chmura punktów), dla opisanie błędów obrabiarki w całej przestrzeni roboczej (rys. 22) [22].



Rys. 22. Mapa błędu przestrzennego w całej przestrzeni roboczej obrabiarki [22]
Fig. 22. Map of volumetric errors in the whole machine tool working space [22]

Korzystając z modelu CAD obrabiarki, oprogramowanie VEC tworzy kinematyczny model błędu z uwzględnieniem wszystkich osi liniowych i obrotowych. Na tej podstawie wyznaczany jest plan pomiarów, który unika wszelkich kolizji, ale maksymalnie wypełnia przestrzeń roboczą obrabiarki. W całej przestrzeni wyznaczane są punkty reprezentacyjne (200-400 punktów). Symulacja wstępna pozwala sprawdzić, czy nie występują kolizje i czy nie zostanie przerwana wiązka laserowa między laserem a aktywnym celem. Podczas realizowania planu pomiarowego, dla każdego zaplanowanego punktu reprezentacyjnego, wykonywany jest wielokrotnie pomiar (30-100 razy) i metodami statystycznymi obliczana jest średnia wartość błędu.

Wysoko rozwinięte oprogramowanie VEC przetwarza dane pomiarowe w ciągu kilku minut. Może ono symulować ścieżkę narzędzia i wyświetlać graficznie błędy wynikające z niedokładności obrabiarki. Ponadto oblicza tabele kompensacyjne dla dwóch różnych długości narzędzia (krótkie, długie), weryfikuje kompensowane wartości i przesyła je bezpośrednio do sterownika obrabiarki.

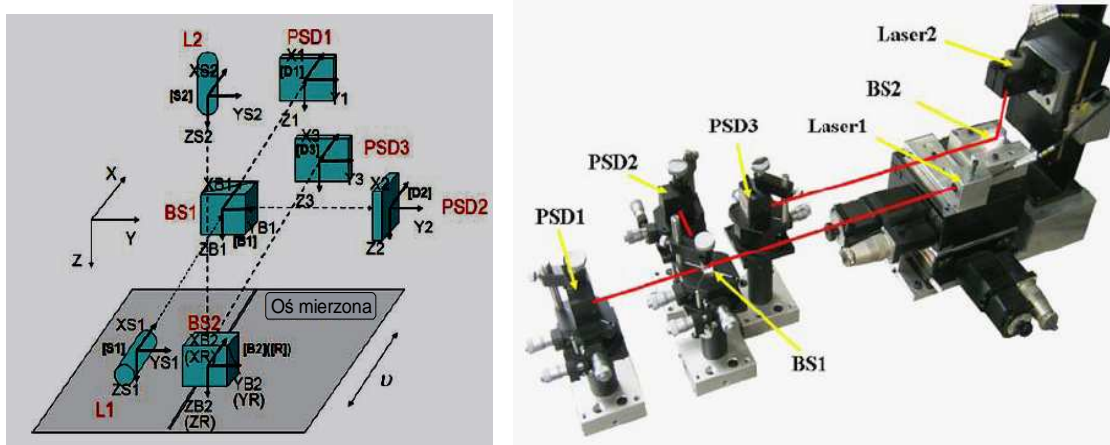
Proces przetwarzania wyników programem VEC zajmuje tylko niewielki ułamek czasu potrzebnego przy stosowaniu wcześniejszych metod.

5. INNE TAŃSZE ROZWIĄZANIA

5.1. SYSTEM OPTYCZNY 3- PSD DO OCENY DOKŁADNOŚCI OBRABIAREK 3-OSIOWYCH

Stosowanie dostępnych obecnie systemów pomiarowych do oceny dokładności nietypowych obrabiarek, jakimi są obrabiarki małe, bardzo małe i miniaturowe jest trudne nie tylko z powodów ekonomicznych, ale często technicznych, kiedy to gabaryty tych przyrządów są zbyt duże. Omówiona niżej koncepcja niedrogiego i niedużego laserowego systemu pomiarowego dla obrabiarek 3-osiowych rezygnuje z interferometrycznej metody pomiaru na rzecz śledzenia kierunku promienia laserowego przetwornikami PSD (Position Sensor Displacement).

System składa się z dwóch diod laserowych L1, L2, dwóch dzielników promienia laserowego BS1, BS2 i trzech układów śledzących położenie wiązki laserowej PSD1, PSD2, PSD3 (rys. 23). Kluczowe problemy w tej metodzie wiążą się ze stabilnością położenia plamki na przetwornikach PSD. W opisanych wcześniej metodach laserowych punktem ruchomym był zwykle cel, a punkt referencyjny był nieruchomy. W tej metodzie jest odwrotnie tj. wszystkie cele PSD1, PSD2, PSD3 są nieruchome



Rys. 23. Koncepcja laserowego systemu pomiarowego 3- PSD i stanowisko eksperymentalne [46]

Fig. 23. The concept of a laser measuring system 3 - PSD and the experimental setup [46]

Związki między odczytami z przetworników PSD a poszczególnymi składowymi błędami przestrzennego są obliczane przez algorytm metodą HTM, z uwzględnieniem konfiguracji badanej obrabiarki. Metoda ta pozwala na wyznaczenie globalnego błędu przestrzennego tj. 3 błędy liniowe i 3 błędy katowe dla każdej osi i 3 błędy prostopadłości między osiami. Rozdzielczość dla pomiarów liniowych oszacowano na $0,5\mu\text{m}$, a dla katowych $0,2\ \mu\text{rad}$ i stwierdzono, że uzyskiwana rozdzielczość układu dioda laserowa-przetwornik PSD jest wystarczająca w stosunku do wartości błędów obrabiarki, jakie podaje jej producent [46].

5.2. SYSTEM OPTYCZNY 4- DOF DO OCENY DOKŁADNOŚCI PRECYZYJNYCH STOŁÓW OBROTOWYCH

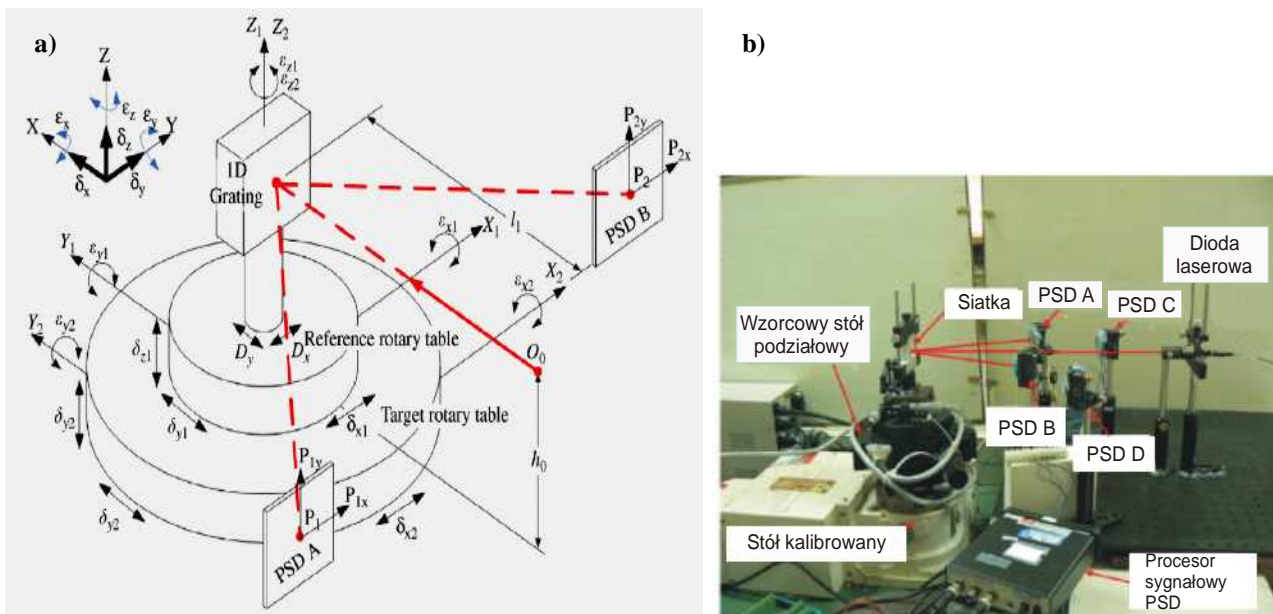
Konwencjonalne techniki kalibrowania stołów obrotowych bazują na metodzie porównawczej. Zwykle w tej metodzie używa się wzorcowego stołu podziałowego ze sprzęgłem Hirtha, wraz z interferometrem laserowym do pomiarów kątowych. Dokładność kalibracji uzależniona jest wówczas od dokładności stołu podziałowego. W prezentowanej metodzie interferometr laserowy zastąpiono tanią diodą laserową, siatką dyfrakcyjną i dwoma przetwornikami położenia plamki PSD. Przy takiej koncepcji pomiarowej nie jest już istotna dokładność pozycjonowania stołu podziałowego, lecz tylko powtarzalność położenia. Można więc było założyć:

$$\varepsilon_{zr1} + \varepsilon_{zr2} + \varepsilon_{zr3} + \dots + \varepsilon_{zrn-1} + \varepsilon_{zrn} = 360^\circ$$

a błąd stołu kalibrowanego jest różnicą odczytów

$$\varepsilon_{z1n} = \varepsilon_{ztn} - \varepsilon_{zrn},$$

gdzie: ε_{z1n} - pierwszy zestaw odczytów kątowych,
 n - numer przedziału w zakresie $0 - 360^\circ$,
 t - błąd dla stołu kalibrowanego,
 r - błąd dla wzorcowego stołu podziałowego.



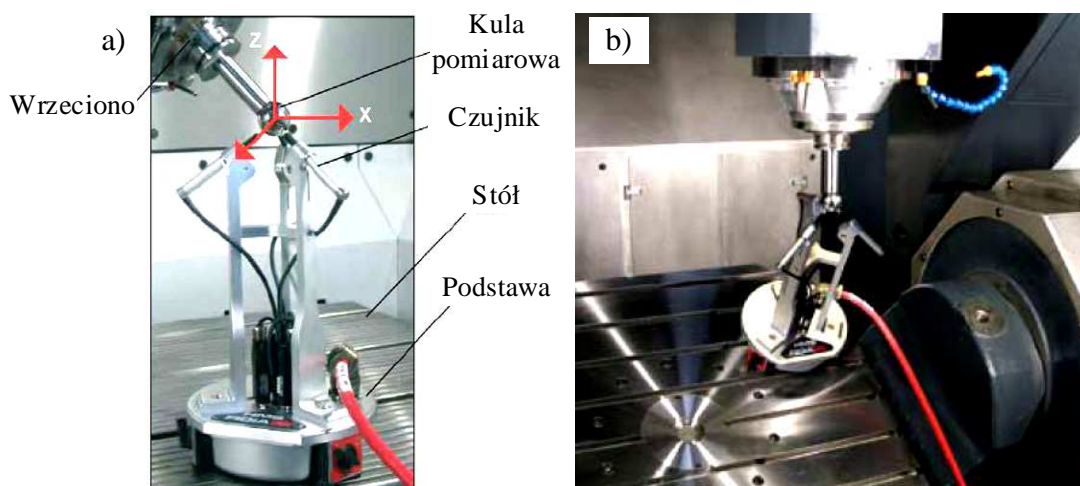
Rys. 24. System pomiarowy 4-DOF: a) schemat funkcjonalny, b) stanowisko eksperymentalne [17]
 Fig. 24. The 4-DOF measurement system: a) the functional diagram, b) experimental setup [17]

Po wykonaniu dwóch pełnych obrotów testowych obliczane są błędy dla 4 stopni swobody podziałowego stołu obrotowego i stołu kalibrowanego. Są to 3 katowe błędy pozycjonowania i jeden błąd liniowy. Katowa stabilność testowanego systemu pomiarowego, wyznaczona po czasie 4000sek, wynosiła poniżej 2", a liniowa stabilność poniżej 1,2 μm .

Zwiększenie liczby przetworników położenia z 2 PSD do 4 PSD pozwoliło ograniczyć liczbę niezbędnych punktów pomiarowych z 720 do 72 podczas całego testu.

5.3. SYSTEM HMS DLA OCENY DOKŁADNOŚCI OSI OBROTOWYCH OBRABIAREK 5-OSIOWYCH

HMS (Head Measuring System) jest urządzeniem obsługiwany przez system sterowania FIDIA klasy C, służącym do automatycznej kalibracji i diagnostyki dwuskrotnych głowic obrotowych oraz stołów wahliwych w obrabiarkach 5-osiowych. Głównym elementem przyrządu jest precyzyjna kula pomiarowa z trzpieniem, mocowana we wrzeciono za pośrednictwem oprawki narzędziowej (rys. 25).



Rys. 25. Urządzenie HMS firmy Fidia: a) konstrukcja [11], b) pomiary dokładności ruchów stołu wahliwego [8]

Fig. 25. HMS device Fidia company: a) the structure [11], b) measurements of tilting rotary table movements accuracy [8]

Podczas pomiarów kula dotyka do trzech precyzyjnych czujników przemieszczenia, rozmieszczonych równomiernie co 120° . Czujniki połączone z programowalnym modułem elektronicznym są osadzone w statywach inwarowych związanych z podstawą urządzenia, która mocowana jest magnetycznie do powierzchni stołu. Urządzenie jest zarządzane przez specjalne oprogramowanie konfiguracyjne, pomiarowe i przetwarzające wyniki pomiarów. Po sprzężeniu z układem sterowania cykl pomiarowy przebiega automatycznie i trwa ok. 30 min. Po jego zakończeniu dokonuje się kalibracja z precyzją większą niż jest to możliwe do osiągnięcia metodami tradycyjnymi. Rozwiązanie to umożliwia sprawdzenie geometrii w każdym przypadku, kiedy jest to potrzebne i skraca przestoje obrabiarki.

Oprogramowanie posiada również funkcje kompensacji błędów geometrycznych, dla różnych typów głowic i stołów. Dla stołów wahliwych realizowana jest w ten sposób kompensacja błędów pozycjonowania osi obrotowych i kompensacja położenia środka obrotu stołu.

6. PODSUMOWANIE

Omówione w artykule narzędzia i metody pomiarowe dedykowane są ocenie globalnego błędu obrabiarki, poprzez wyznaczenie jego rozkładu w przestrzeni roboczej tj. błędu przestrzennego. Wśród omówionych narzędzi/metod są takie, które rzeczywiście pozwalają bezpośrednio mierzyć wartość błędu i jego orientację w przestrzeni, takie które pozwalają obliczyć błąd i jego orientację na podstawie pomiaru wszystkich lub prawie wszystkich składowych błędów, takie których głównym celem nie jest wyznaczenie błędu przestrzennego nazwane „metodami pośrednimi” i wreszcie metody z jakiegoś względu uznane za specyficzne nazwane jako „inne”. Ogólną charakterystykę tych metod pogrupowanych zgodnie z tym podziałem zamieszczono w tabelicy 1.

Tabela 1. Charakterystyka urządzeń pomiarowych stosowanych do wyznaczania błędu przestrzennego
Table 1. Characteristics of measuring devices used to determine spatial error

Urządzenie/ metoda	Składowe błąd przestrzennego	Błąd przestrzenny obrabarki	Zastosowanie	Czas	Koszt	Dostęp- ność na rynku
METODY POŚREDNIE						
Pręt DBB	12- mierzone grupowo	obliczany po dodatkowych pomiarach	średnie obrabiarki	I	I	Tak
Siatka KGM	5- mierzone grupowo	obliczany	średnie obrabiarki	I	II	Tak
METODY BEZPOŚREDNIE						
Laser 1D	18-mierzone pojedynczo – bez Roll	obliczany	obrabarki 3- osiowe	IIIIIIII	III	Tak
Laser 3D	21-mierzone grupowo	obliczany	obrabarki 3- osiowe	III	IIII	Tak
Laser-metoda wektorowa	12-mierzone 4 przekątne	obliczany	średnie obrabiarki 3-osiowe	IIII	IIII	Tak
Pręt LBB	21-mierzone z 3 położen	obliczany	średnie obrabiarki 3-osiowe	IIII	IIII	Tak
Pręt 3D LBB	Wszystkie dla osi liniowych i obrotowych	mierzony	średnie obrabiarki wieloosiowe	II	IIIIII	Nie
Laser śledzący	Wszystkie dla osi liniowych i obrotowych	mierzony	duże i średnie obrabarki wieloosiowe	IIII	IIIIII	Tak
Laser śledzący z aktywnym celem	Wszystkie dla osi liniowych i obrotowych	mierzony	duże i średnie obrabarki wieloosiowe	II	IIIIIIII	Tak
INNE						
System 3PSD	21- mierzone grupowo	obliczany	małe obrabiarki 3- osiowe	III	I	Nie
System 4DOF	4-dla stołu obrotowego	obliczany	stoły obrotowe	IIII	I	Nie

System HSM	12-dla dwóch osi obrotowych	mierzony	osie obrotowe	II	II	Tak
OGRANICZENIA						
Pręt DBB	Tylko ruch po okręgu, ograniczona długość pręta					
Siatka KGM	Ograniczona średnica siatki optycznej					
Laser 1D	Tylko osie liniowe, bez błędów Roll					
Laser 3D	Mniejsza dokładność w osiach prostopadłych do osi mierzonej					
Laser-metoda wektorowa	Tylko osie liniowe, ograniczona wielkość ruchów x,y,z					
Pręt LBB	Tylko osie liniowe, ograniczona długość teleskopu, martwa strefa					
Pręt 3D LBB	Ograniczona długość teleskopu, martwa strefa					
Laser śledzący	Ograniczony kąt widzenia reflektora, martwa strefa, dokładność 0,2-3um w zakresie 0- 5m					
Laser śledzący z aktywn. celem	dokładność 0,2-3um w zakresie 0- 5m					
System 3PSD	Tylko osie liniowe, mały zakres pomiarowy					
System 4DOF	Tylko osie obrotowe					
System HSM	Tylko, obrabiarki z układem sterowania FIDIA klasy C					

W tabelicy m.in. podano: w jakim stopniu dane urządzenie jest w stanie mierzyć błąd przestrzenny (liczba mierzonych składowych), do jakich obrabiarek jest adresowane (małe, średnie, duże), a także główne jego ograniczenia. Tablica ta powinna ułatwić podejmowanie decyzji o wyborze najbardziej odpowiedniego narzędzia pomiarowego dla oceny i kompensacji błędów obrabiarki.

Nie zawsze uzasadnione jest wyznaczanie globalnego błędu dla całej obrabiarki, co wymaga drogiego sprzętu pomiarowego. Z ekonomicznego punktu widzenia może się okazać zasadne posłużenie się dwoma tańszymi metodami pomiaru dokładności, osobno dla osi liniowych i osobno dla osi obrotowych.

W wielu przypadkach wystarczające jest posłużenie się metodami pośrednimi (DBB, KGM), które pozwalają, oprócz kilku składowych błędów przestrzennego, wyznaczyć i skompensować inne błędy kinematyczne i błędy związane z regulacją sterowników oraz błędy interpolacji kołowej.

Duże oczekiwania wiąże się z metodami stosującymi tanie najnowsze układy optoelektroniczne. Są to jednak przeważnie metody, które obecnie są na etapie koncepcji lub stanowiskowych badań laboratoryjnych.

O wyborze metody i narzędzia pomiarowego decydować będą zawsze: wymagania dokładnościowe stawiane obrabiarence, koszt urządzenia, czas potrzebny na wykonanie testów i dostępność urządzenia na rynku.

Należy pamiętać, że z uwagi na czas potrzebny na wykonanie testów dokładności, uzyskiwane wyniki pomiarów błędów geometrycznych będą zawsze obciążone dodatkowo błędem cieplnym. Innowacyjne narzędzia i metody pomiarowe skłaniają wiele ośrodków naukowych i producentów do uwzględniania w modelach również błędu cieplnego.

Autorzy składają podziękowanie sponsorowi projektu pt.: „Wysokoobrotowe, precyzyjne pionowe centrum obróbkowe – inteligentna strategia kompensacji dla obrabiarek z napędami liniowymi” - Ministerstwu Nauk i Szkolnictwa Wyższego, w ramach którego wykonano niniejszą publikację.

LITERATURA

- [1] Active target motorized laser tracking target. Materiały firmowe EN082010, Automated Precision Inc.
- [2] BIELENIN M. Laserowy układ do pomiarów przestrzennych. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2009.
- [3] CHEN G., YUAN J., Ni J., A displacement measurement approach for machine geometric error assessment. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 2001, 149-161.
- [4] CHEN J. S., Fast calibration and modeling of thermally induced machine tool errors in real machining. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37, 1997, 159-169.
- [5] CHEN J. S., YUAN J. X., Ni J., WU S. M., Real-time compensation for time-variant volumetric errors on a machining center. *Journal of Engineering for Industry*, 115, 1993, 472-479.
- [6] CHRAPEK K., GÓRSKI P., IŻYKOWSKI S. MASŁAK P., Zastosowanie przyrządu pomiarowego typu ball-bar do badania właściwości mechanizmu o kinematyce równoległej. *Mechanik*, 2, 2010, 133.
- [7] FAN K-C., WANG H., SHIOU F-J, KE C-W, Design analysis and applications of a 3D Laser Ball Bar for accuracy calibration of multiaxis machines. *Journal of Manufacturing System*, 23, 2004, 194-203.
- [8] FIDIA CNC HMS HEAD MEASURING SYSTEMS. Technical Documentation MDO1690.
- [9] GILSINN D. E., LING A. V., Comparative statistical analysis of test parts manufactured in production environments. *Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 2004, 189-199.
- [10] GRZELKA J., MAZUR E., GRUCA M., TUTAK G., Miernictwo i systemy pomiarowe. Politechnika Częstochowska, Częstochowa, 2004.
- [11] HONCZARENKO J., KWAŚNIEWICZ J., Nowe systemy pomiarowe do sprawdzania dokładności obrabiarek CNC. *Mechanik*, 12, 2008, 1012-1016.
- [12] JĘDRZEJEWSKI J., KWAŚNY W., Modelling of angular contact ball bearings and axial displacements for high speed spindles. *Annals of the CIRP*, 59/1, 2010, 377-382.
- [13] JĘDRZEJEWSKI J., Kierunki rozwoju obrabiarek. *Inżynieria Maszyn*, 13, 3/4, 2008, 7-28.
- [14] JĘDRZEJEWSKI J., KWAŚNY W., Development of high performance machine tools. *Journal of Machine Engineering*, 9, 2009, 5-31.
- [15] JHA B. K., KUMAR A., Analysis of geometric errors associated with five-axis machining center in improving the quality of cam profile. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43, 2003, 629-636.
- [16] JÓŹWIK J., PIEŚKO P., KRAJEWSKI G., Ocena testu QC10 do kontroli off-line obrabiarek sterowanych numerycznie CNC. *Eksploatacja i Niezawodność*, 3, 2010, 10-19.
- [17] JYWE W., CHEN C. J., HSIEH W. H., LIN P. D., JWO H. H., YANG T. Y., A novel simple and low cost 4 degree of freedom angular indexing calibrating technique for a precision rotary table. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 2007, 1978-1987.
- [18] KIM H. S., JEONG K. S., LEE D. S., Design and manufacturing of a three-axis ultra-precision CNC grinding machine. *ASME Trans. Journal of Materials Processing Technology*, 71, 1997, 258-266.
- [19] KIM J. D., KIM D. S., Development and application of an ultra-precision lathe. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13, 1997, 164-171.
- [20] LEE J. H., YANG S. H., Statistical optimization and assessment of a thermal error model for CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 2002, 147-155.
- [21] MAHBUBUR R., Modeling and measurement of multi-axis machine tools to improve positioning accuracy. Oulu University Press, Oulu, 2004.
- [22] MAXHAM D., The practical approach to volumetric error compensation.
<http://www.qualitydigest.com/inside/cmssc-article/practical-approach-volumetric-error-compensation.html#>
- [23] MEKID S., Introduction to precision machine design and error assessment. CRC Press Taylor & Francis Group, Jędrzejewski J., *Capture* 3, 2009, 75-127.
- [24] MODRZYCKI W., Identyfikacja i kompensacja błędów obrabiarek. *Inżynieria Maszyn*, 13, 3/4, 2008, 91-100.
- [25] PAHK H. J., LEE S. W., Thermal error measurement and real time compensation system for the CNC machine tools incorporating the spindle thermal error and the feed axis thermal error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 2002, 487-494.
- [26] PAJOR M., OKULIK T., MARCHELEK K., CHODŹKO M., Badanie własności dynamicznych układów korpusowych obrabiarek w procesie projektowo-konstrukcyjnym. *Modelowanie Inżynierskie*, 35, 2008, 85-92.
- [27] PORTMAN V. T., Deterministic metrology of parallel kinematic machines. *Annals of the CIRP*, 49/1, 2000, 281-284.
- [28] PTASZYŃSKI W., Badanie dokładności obrabiarek szybkim testem QC-10 (Ballbar). *Laboratorium Badania Maszyn CNC*, Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Poznań, 2005.

- [29] RAHMAN M., HEIKKALA J., LAPPALAINEN K., Modeling, measurement and error compensation of multi-axis machine tools. Part I: theory. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000, 1535–1546.
- [30] RAMESH R., MANNAN M. A., Error compensation in machine tool – a review: Part II: thermal errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000, 1257-1284.
- [31] RAMESH R., MANNAN M. A., POO A. N., Error compensation in machine tools – a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture dependent errors. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40, 2000, 1235–1256.
- [32] RAMESH R., MANNAN M. A., POO A. N., Support vector machines model for classification of thermal error in machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20, 2002, 114–120.
- [33] SCHMITZ T., Rapid prototyping using high speed machining. Machine Tool Research Center, University of Florida, Gainesville, FL USA.
- [34] SCHMITZ T., ZIEGERT J., SUZANNE CANNING J., Using Homogeneous Transformation Matrices to define the measurand for uncertainty analysis of complex measurement system. Machine Tool Research Center, University of Florida, Gainesville, FL 32611.
- [35] SCHNEIDER C. T., LaserTracer - A new type of self tracking laser interferometer. IWAA 2004, CERN, Geneva, 2004.
- [36] SCHWENKE H., FRANKE M., HANNAFORD J., KUNZMANN H., Error mapping of CMMs and machine tools by a single tracking interferometer. *Annals of the CIRP*, 54/1, 2005, 475-478.
- [37] SCHWENKE H., KNAPP W., HAITJEMA H., WECKENMANN A., SCHMITT R., DELBRESSINE F., Geometric error measurement and compensation of machines—An update. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57, 2008, 660–675.
- [38] SCHWENKE H., SCHMITT R., JATZKOWSKI P., WARMANN C, On-the-fly calibration of linear and rotary axes of machine tools and CMMs. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58, 2009, 477–480.
- [39] Seng Khim, Tan and Chin Keong, Lim. KHIM S., KEONG T., KEONG CH., LIM F., Modelling the volumetric errors in calibration of five-axis CNC machine. *Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientist*, III, 2010, IMECS 2010, Hong Kong.
- [40] SVOBODA O., Testing the diagonal measuring technique. *Precision Engineering*, 30, 2006, 132-144.
- [41] SZAFARCZYK M., CHRZANOWSKI J., WYPYSIŃSKI R., Nowa koncepcja sprawdzenia dokładności maszyn NC. *AUTOMATION 2005*, PIAP, Konferencja N-t., Automatyzacja – Nowości i Perspektywy, 2005.
- [42] The LaserTRACER – Highest measuring accuracy for the compensation of machine tools. www.ogpnet.com/etalon.
- [43] WANG C., 3 Dimensional machine tool positioning accuracy: laser vector measurement vs. linear measurement. *Tooling & Production*, August, 2003.
- [44] WANG C., Laser displacement measurement. *Industrial Laser Solution*, March, 2001.
- [45] WANG C., Laser vector measurement technique for the determination and compensation of volumetric positioning errors. Part I: Basic theory. *Review of Scientific Instruments*, 71, 2000, 3933-3937.
- [46] WANG W., KWEON S-H., HWANG CH-S., KANG N-CH., KIM Y-S., YANG S-H., Development of an optical measuring system for integrated geometric errors of a three-axis miniaturized machine tool. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 43, 2009, 701–709.
- [47] WANG Y., Zhang G., Moon K. S., Sutherland J. W., Compensation for thermal error of a multi-axis machining center. *Journal of Materials Processing Technology*, 75, 1998, 45-53.
- [48] WU H., ZHANG CH., Fuzzy Logic thermal error compensation. *ICARCV*, 2006.
- [49] ZHU J., Robust thermal error modeling and compensation for CNC machine tools. A dissertation in The University Michigan, 2008.
- [50] ZHU W., WANG Z., YAMAZAKI K., Machine tool component error extraction and error compensation by incorporating statistical analysis. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50, 2010, 798-806.
- [51] ZIEGERT J. C., KALLE P., Error compensation in machine tools: a neural network approach. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 5, 1994, 143-151.
- [52] Materiały firmy Etalon-Ag.
- [53] Materiały firmy Heidennain, Measuring system for machine tool inspection and acceptance testing. December, 2002.
- [54] Materiały firmy Lasertex.
- [55] Materiały firmy Renishaw.

ADVANCED METHODS FOR THE IDENTIFICATION OF MACHINE TOOL ERRORS

This paper shows the overall conditions and needs to increase the accuracy of machine tools. Types of machine tool errors, their causes, as well as ways to reduce and compensate them are presented. The most useful methods of identifying particular geometric errors are discussed in detail. The classification of methods and tools of measurement in terms of their generality, measuring time, cost, availability and main constraints are presented.