

mgr inż. Rafał Wypysiński
Politechnika Warszawska

ZASTOSOWANIE NIEZALEŻNEGO UKŁADU WSPÓLRZĘDNYCH DO BADANIA DOKŁADNOŚCI MASZYN NC

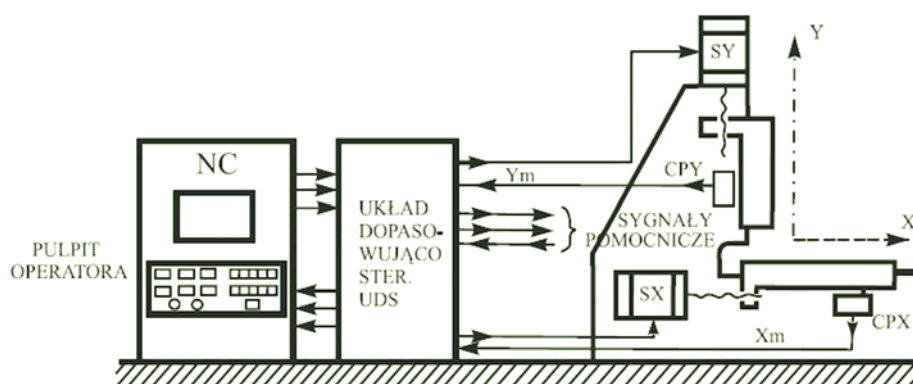
W artykule omówiono cele badania dokładności maszyn sterowanych numerycznie (NC) oraz istniejące rozwiązania konstrukcyjne i tendencje rozwojowe w tej dziedzinie. Dokonano klasyfikacji znanych metod ze względu na różne kryteria. Przedstawiono unikalną koncepcję, pozwalającą na określenie położenia punktów pomiarowych oraz trajektorii ruchów w niezależnym układzie współrzędnych. Omówiono możliwości, zalety i ograniczenia nowego rozwiązania oraz zaprezentowano przykładowe wyniki testów laboratoryjnych i przemysłowych.

INTRODUCTION OF INDEPENDENT COORDINATE SYSTEM FOR NC MACHINE ACCURACY MEASUREMENT

In this paper the purposes of numerical control (NC) machine accuracy measurement were described. The existing methods and trends in this application domain were characterized. All known methods were classified in case of different criteria. The unique conception of define measurement points positions and movements trajectory in an independent coordinate system was shown. Possibilities, advantages and limitations of described methods were presented. The results of laboratory and industrial tests were described.

1. WPROWADZENIE

Cechą charakterystyczną sterowania numerycznego jest zastosowanie sygnałów wielobitowych do przenoszenia informacji w dwóch kierunkach: od układu sterowania do elementów maszyny oraz sygnałów sprzężenia zwrotnego od wbudowanych czujników pomiarowych do układu sterowania [1]. Informacje o zmianach położenia elementów wykonawczych oraz położenia zadawane w programie, podobnie jak opis przedmiotu obrabianego, mają postać cyfrową, zaś ruchy sterowane numerycznie stanowią osie układu współrzędnych. Na rys. 1 pokazano schemat układu sterowania numerycznego obrabiarki o dwóch osiach liniowych NC.



Rys. 1. Układ sterowania numerycznego ruchami obrabiarki [1]

W programach NC określone są kolejne współrzędne (absolutnie lub przyrostowo), opisujące ruch narzędzia. Mogą one być zapisane z dowolnie dużą dokładnością, jednak położenie rze-

czywiste różni się od położenia zadanego. Dzieje się tak w wyniku błędów, które mogą wynikać z [2]:

- błędów geometrycznych obrabiarki
- mechanizmów napędowych
- procesu skrawania
- wpływu środowiska

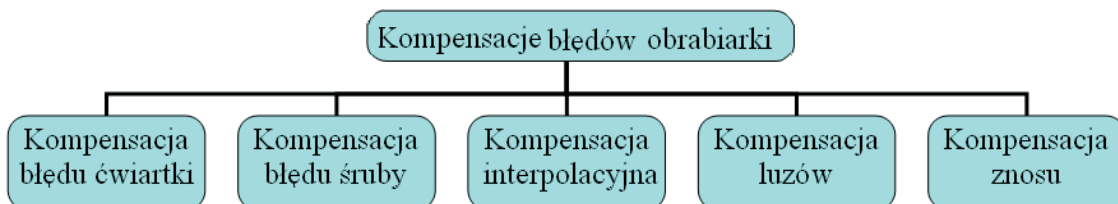
Dokładność geometryczno – ruchową (wynikającą z dwóch pierwszych punktów) można jednak zwiększyć, wprowadzając tablice korekcji do układu sterowania. W praktyce przemysłowej elementarnym ruchom liniowym przypisuje się najczęściej tzw. korekcję błędów śruby/błędów przetwornika. Oś dzieli się wtedy na równe segmenty, mierzy za pomocą niezależnego (dokładniejszego niż obrabiarka) urządzenia różnicę między pozycją rzeczywistą i zadaną i wprowadza wartości poprawek.

Rys. 2 przedstawia fragment przykładowej tablicy korekcji wprowadzonej dla układu sterowania PRONUM 630T. Tablica rozpoczyna się nagłówkiem, w pierwszej linii (oznaczonej N0) znajduje się nazwa osi (np. X), numer korekcji dla segmentu bazowego – oznaczający numer bloku, od którego zaczyna się definicja tablicy dla danej osi (dla osi X jest on równy 1) i długości segmentu dla każdej osi (5000 μm dla osi X). W kolejnych liniach są podawane wartości korekcji (w mikrometrach), liczone przyrostowo dla każdego segmentu. Wprowadzając 0 jako numer korekcji dla segmentu bazowego, wyłączamy kompensację błędów śruby.

```
%SCO
N0 X1 5000 Y250 4000 Z700 4000
N1 2
N2 1
N3 2
•
•
N998 0
N999 -1
N1000 1
```

Rys. 2. Fragment tablicy korekcji błędów śruby dla centrum frezarskiego z układem sterowania PRONUM 630T [3]

Przykład ten został przedstawiony z uwagi na prostą budowę pliku korekcji i obrazowe przypisanie poprawek kolejnym punktom pomiarowym, zdefiniowanym w układzie współrzędnych obrabiarki. Obecnie użytkownik może definiować kilka plików korekcji (rys. 3).



Rys. 3. Kompensacje dostępne w układzie NC firmy Siemens

Błąd ćwiartki uwidacznia się podczas testu kołowości przy przejściach między ćwiartkami (w wyniku zmiennych warunków tarcia na prowadnicach). Błędy śruby powstają natomiast w wyniku niedokładności mechanicznych uczestniczącej w posuwie śruby pociągowej i są wyrównywane przez układ sterowania na podstawie zapisanych wartości odchyłek. Kompensacja interpolacyjna pozwala na ograniczenie wpływu uwarunkowanych wykonawczo błędów

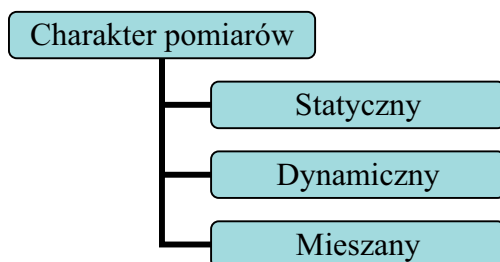
skoku śruby pociągowej i błędów systemu pomiarowego. Luzy mechaniczne maszyny (np. luzy nawrotu w śrubach pociągowych) są kompensowane przez definicję kompensacji luzów. Automatem kompensacja znosu pozwala na ruch ze stałą prędkością w przypadku analogowej regulacji prędkości obrotowej silników.

Kolejnym powodem badania dokładności maszyn NC jest kontrola stanu technicznego obrabiarki. Od niego zależy bowiem w dużej mierze dokładność wymiarowo – kształtowa przedmiotu obrabianego. Z tego względu testy przeprowadza się w trakcie konstruowania obrabiarki w warsztacie producenta, w trakcie instalowania obrabiarki u klienta (potwierdzenie deklarowanej przez producenta jakości) oraz w trakcie eksploatacji (przeglądy okresowe). Czynność ta jest powtarzana wielokrotnie, dlatego powinna przebiegać względnie szybko, jak najmniej kosztować i jednocześnie dostarczać jak najwięcej informacji o stanie technicznym obrabiarki i możliwych przyczynach błędów (w celu ich ograniczenia lub całkowitego wyeliminowania). Na możliwości diagnostyki polega przewaga testów „przy biegu luzem” (bez obróbki) w porównaniu z „próbami pracą”, które co prawda uwzględniają dodatkowo wpływ procesu skrawania i środowiska, ale mogą znaleźć zastosowanie tylko w przypadku produkcji wielkoseryjnej i masowej.

2. KLASYFIKACJA

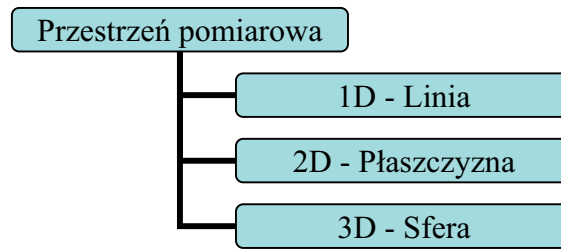
Istnieje wiele metod i urządzeń do sprawdzania dokładności maszyn NC. Do chwili obecnej nie zostały one w żaden sposób sklasyfikowane. Nie jest to zadanie proste, z uwagi na dużą różnorodność układów i trudności w znalezieniu wyraźnych kryteriów podziału.

Jednym z kryteriów może być charakter pomiarów (rys. 4). Pewna grupa urządzeń może być wykorzystywana tylko do pomiarów statycznych (położenia), metodyka pomiarów za pomocą innych wymusza prowadzenie testów wyłącznie w czasie ruchu, a więc dynamicznie (gdzie system wnioskowania jest oparty o kształt ścieżki pomiarowej, zaś określone w czasie pomiarów wielkości nie pozwalają na jednoznaczne wyznaczenie położenia punktu pomiarowego w układzie współrzędnych obrabiarki). Najkorzystniejsze wydają się rozwiązania mieszane, zapewniające prowadzenie pomiarów zarówno statycznych jak i dynamicznych.



Rys. 4. Klasyfikacja testów z uwagi na charakter pomiarów

Kolejne kryterium podziału uwidacznia się podczas analizy kształtu przestrzeni pomiarowej. W przypadku pomiarów statycznych mamy do czynienia ze zbiorem punktów, które są rozmieszczone wzdłuż ścieżki, odpowiedniej dla przyjętej strategii pomiarowej. Mogą się one znajdować na linii prostej, na równoległych odcinkach, lub też rozmieszczenie ich może mieć charakter przypadkowy. Bardziej jednoznaczne wnioski można wysnuć w odniesieniu do pomiarów dynamicznych. Pomiary te mogą mieć charakter liniowy (1D), w innych przypadkach ścieżka pomiarowa może mieć dowolny kształt na płaszczyźnie (2D) (najczęściej jest to koło), lub w przestrzeni (3D).

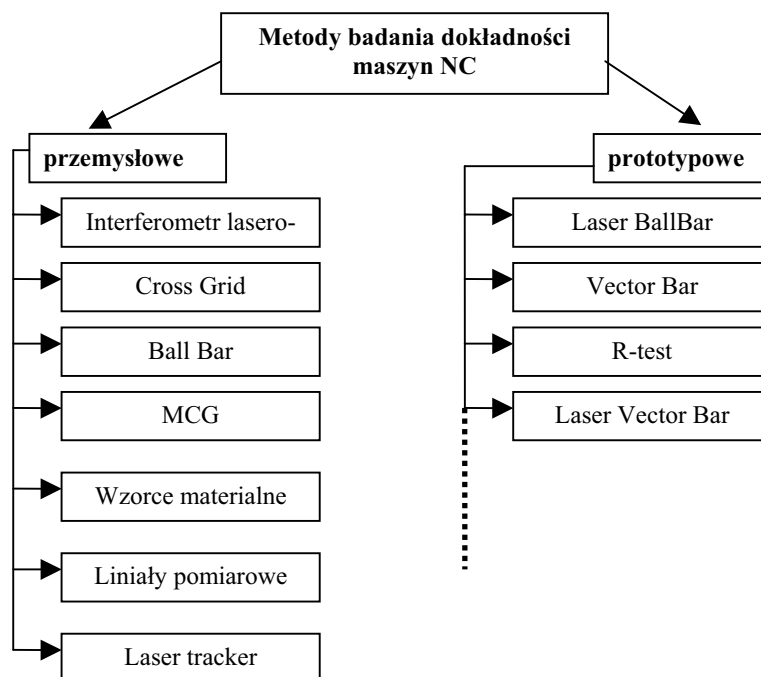


Rys. 5. Klasyfikacja testów z uwagi na przestrzeń pomiarową

Najprostszym z kryteriów podziału urządzeń do sprawdzania dokładności maszyn NC może być rodzaj zastosowanych przetworników pomiarowych (optyczne, piezoelektryczne, indukcyjne, pojemnościowe, magnetoindukcyjne, ...). Z uwagi na możliwość osiągnięcia dużych zakresów pomiarowych, wysokich rozdzielczości i dokładności, większość urządzeń jest wyposażana w przetworniki optyczne, szczególnie laserowe.

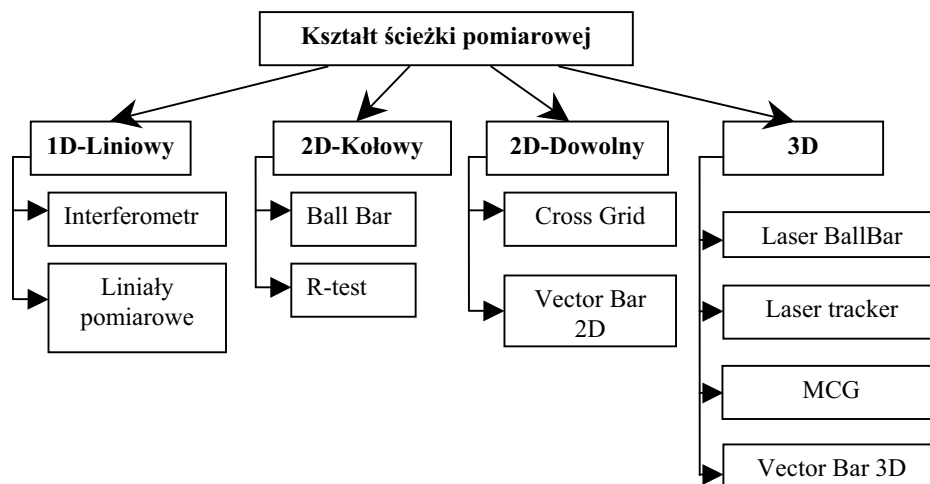
Należy podkreślić, iż żadna z dotychczas opracowanych metod nie pozwala na określenie położenia punktu pomiarowego w niezależnym (nie związanym z układem współrzędnych obrabiarki) układzie współrzędnych. Z tego względu nie mogą być wykorzystywane do testowania poprawności programów obróbkowych. Możliwość tą posiada VectorBar, opracowany w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej.

W zależności od tego, czy określona metoda pomiarowa znalazła zastosowanie w praktyce, czy też znajduje się dopiero w fazie testów lub jest rozwiązaniem koncepcyjnym, metody pomiaru można podzielić na dwie grupy:



Rys. 6. Klasyfikacja metod z uwagi na obszar zastosowań wraz z przykładami urządzeń

Z uwagi na kształt ścieżki pomiarowej można w praktyce wyróżnić cztery grupy układów do badania maszyn NC:



Rys. 7. Klasyfikacja metod z uwagi na kształt ścieżki pomiarowej wraz z przykładami urządzeń

3. URZĄDZENIA POMIAROWE STOSOWANE W PRZEMYŚLE

Zgodnie z rys. 6, do tej grupy urządzeń zaliczyć należy co najmniej kilka rozwiązań. Różnią się one konstrukcją i zakresem zastosowań.

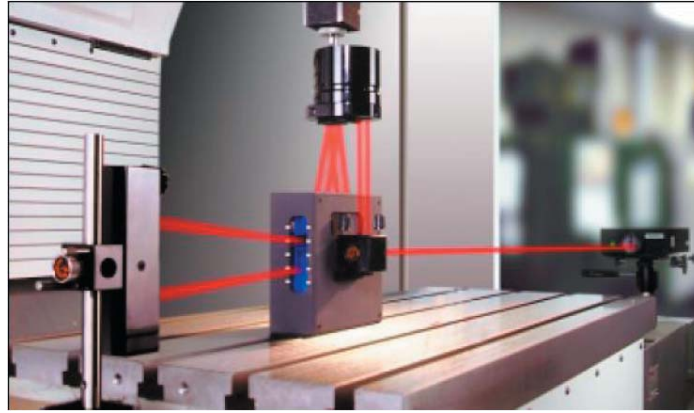
Najprostsze z nich to wzorce materialne, które mogą być wykorzystane do badania dokładności współrzędnościowych maszyn pomiarowych [4] lub centrów frezarskich (ta implementacja wymaga jednak zastąpienia narzędzia głowicą przełączającą i podłączenia jej do układu sterowania – w celu zapamiętania aktualnej współrzędnej podczas najazdu na charakterystyczne elementy wzorca).

Do bezpośrednich pomiarów przemieszczeń liniowych najczęściej wykorzystywane są liniały optyczne (rys. 8). Znalazły one również zastosowanie jako wyposażenie dodatkowe obrabiarek tradycyjnych, pozwalając operatorowi na precyzyjną kontrolę przemieszczeń i zwiększając tym samym dokładność obróbki.



Rys. 8. Liniał optyczny firmy Heidenhein [5]

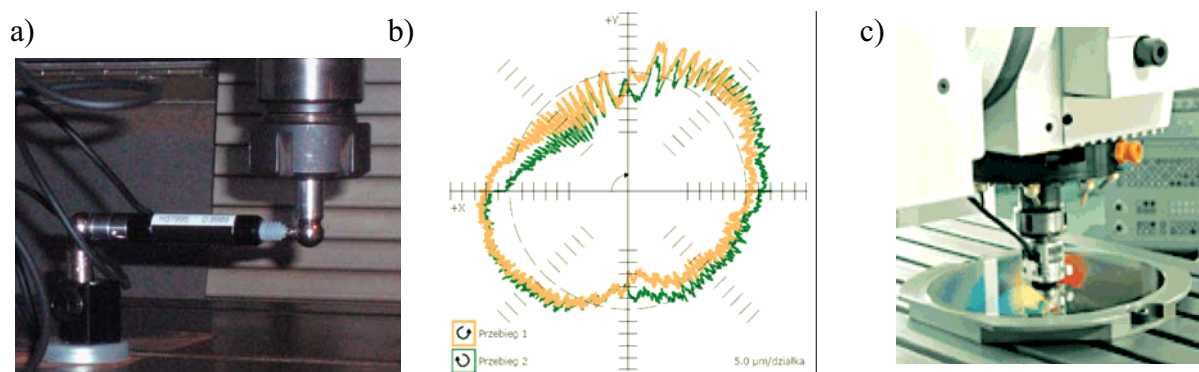
Większe możliwości posiada interferometr laserowy, wykorzystywany głównie do badania dokładności elementarnych ruchów liniowych. W szybki sposób pozwala sprawdzić dokładność pozycjonowania obrabiarki. Jeśli zostaną spełnione dodatkowe wymagania (opisane w normach), wystarczy później obliczyć na podstawie zebranych danych poprawki i wpisać je do tabeli korekcji błędów śruby. Dodatkowo za pomocą interferometru można określić np. prostoliniowość osi i powtarzalność pozycjonowania a nawet prostotałość osi (rys. 9).



Rys. 9. Badanie prostopadłości osi centrum frezarskiego pionowego za pomocą interferometru laserowego Renishaw [6]

Możliwa jest także kompensacja wpływu środowiska (temperatury, ciśnienia i wilgotności powietrza). Pomiary są realizowane bezkontaktowo z dużą dokładnością, co czyni układ wrażliwym na zakłócenia (np. drgania generowane przez układ napędowy czy przerwanie wiązki w trakcie pomiarów).

Szybką diagnostykę stanu technicznego obrabiarki umożliwia tzw. test kołowości, opisany w normie [7]. Jego nazwa pochodzi od kształtu zaprogramowanego w czasie pomiarów toru ruchu. Rzeczywisty kontur różni się od okręgu idealnego (zadanego w programie NC) i dostarcza informacji o odchyłkach geometrycznych (progresywny liniowy błąd pozycjonowania, nieprostopadłość osi, odchyłki okresowe) oraz wpływie sterowania numerycznego i serwonapędów (błąd zwrotny, przyspieszenia osiowe i inne błędy - w tym niedopasowanie przyrostów pętli pozycjonowania). W praktyce przemysłowej testy kołowości są najczęściej wykonywane za pomocą przyrządów typu Ball Bar (BB) lub Cross Grid.

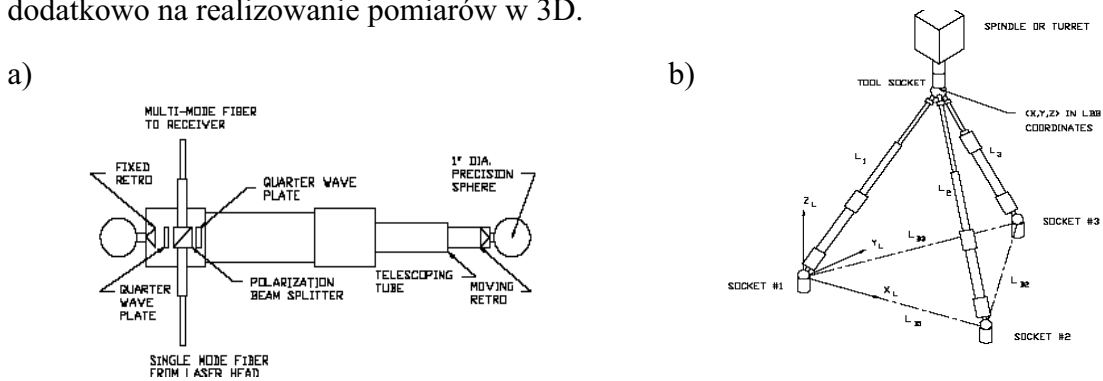


Rys. 10. Test kołowości wykonywany za pomocą urządzenia Ball Bar i Cross Grid:
a) Ball Bar Renishaw zamocowany na centrum frezarskim pionowym, b) wykres testu kołowości wygenerowany przez oprogramowanie, c) test kołowości wykonywany za pomocą urządzenia Cross Grid [8]

4. ROZWIĄZANIA PROTOTYPOWE

Dynamiczny rozwój maszyn NC i ich zastosowań sprawia, iż w szybkim tempie rozwijają się metody i urządzenia do badania dokładności. Jedne z nich bazują na rozwiązaniach już znanych, inne są przejawem myśli nowatorskiej i postępu techniki.

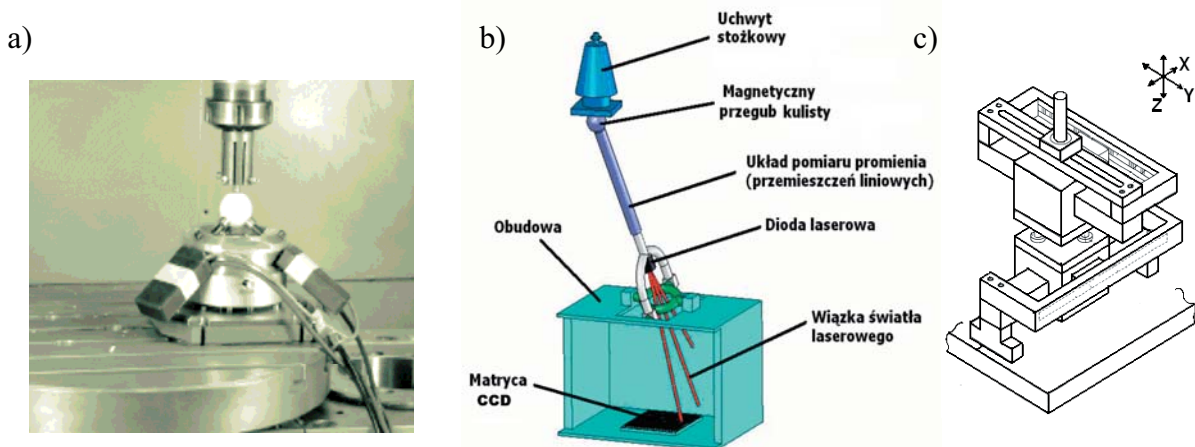
Wiele konstrukcji odnosi się do sprawdzonego w praktyce przemysłowej pręta kinematycznego z przegubami kulistymi (Ball Bar). Przykładem może być Laser BallBar (rys. 11), którego konstrukcja oparta jest na urządzeniu Ball Bar, ale pomiar zmian odległości między przegubami kulistymi jest realizowany za pomocą interferometru laserowego (wiązka wprowadzana do wnętrza pręta teleskopowego za pomocą światłowodu). Zwiększono dzięki temu zakres pomiarowy (kształt ścieżki nie ogranicza się już tylko do koła). Połączenie trzech prętów w jednym przegubie kulistym (u góry) i zamocowanie (po przeciwnych końcach prętów) przegubów kulistych na trzech podstawkach magnetycznych do stołu obrabiarki pozwala dodatkowo na realizowanie pomiarów w 3D.



Rys. 11. Konstrukcja urządzenia prototypowego Laser BallBar: a) budowa, b) wersja z trzema ramionami do pomiarów w 3D [9]

Wyniki testów zbliżone do testu kołowości dostarcza R-test (rys. 12a), który jest jednak dedykowany do badania obrabiarek ze stołami obrotowymi [10]. Jego prosta konstrukcja opiera się na indukcyjnych czujnikach przemieszczeń liniowych i precyzyjnie wykonanej kuli.

Istnieje jeszcze wiele innych rozwiązań, które znajdują się w fazie testów laboratoryjnych lub czekają dopiero na praktyczną realizację w postaci prototypu.



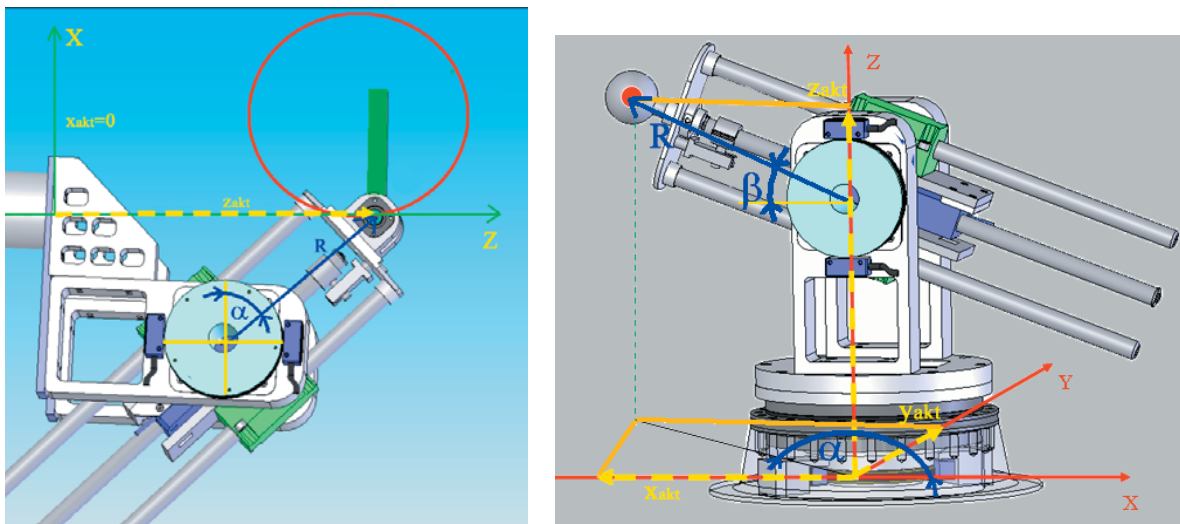
Rys. 12. Przykłady prototypowych rozwiązań: a) R-test, b) Laser Vector Bar (LVB) opracowany w ITM Politechniki Warszawskiej, c) układ oparty na trzech modułach przemieszczeń liniowych [11]

5. VECTOR BAR

W Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej opracowano koncepcję pręta wektorowego (Vector Bar – VB). Jak sama nazwa wskazuje, podstawą konstrukcji tego urządzenia jest pręt (a dokładnie cały moduł przemieszczeń liniowych), zakończony przegubem kulistym. W odróżnieniu od opisywanych wcześniej urządzeń, pręt jest sztywny (nie teleskopowy jak w BB) i przechodzi przez oś obrotu urządzenia. Kolejną cechą wyróżniającą to rozwiązanie jest jednoczesny pomiar przemieszczeń liniowych i kątowych. Dzięki takiemu podejściu w trakcie pomiarów uzyskujemy wszystkie wielkości opisujące wektor (zarówno w czasie pomiarów na płaszczyźnie, jak i w przestrzeni 3D): zwrot, kierunek, wartość i punkt zaczepienia. Punkt zaczepienia wynika z konstrukcji, wartość jest określana przez enkoder przemieszczeń liniowych, kierunek przez enkoder (dla rozwiązania 2D) lub dwa enkodery (dla rozwiązania w 3D) kątowe, zaś zwrot – przez znaki odczytanych wskazań.

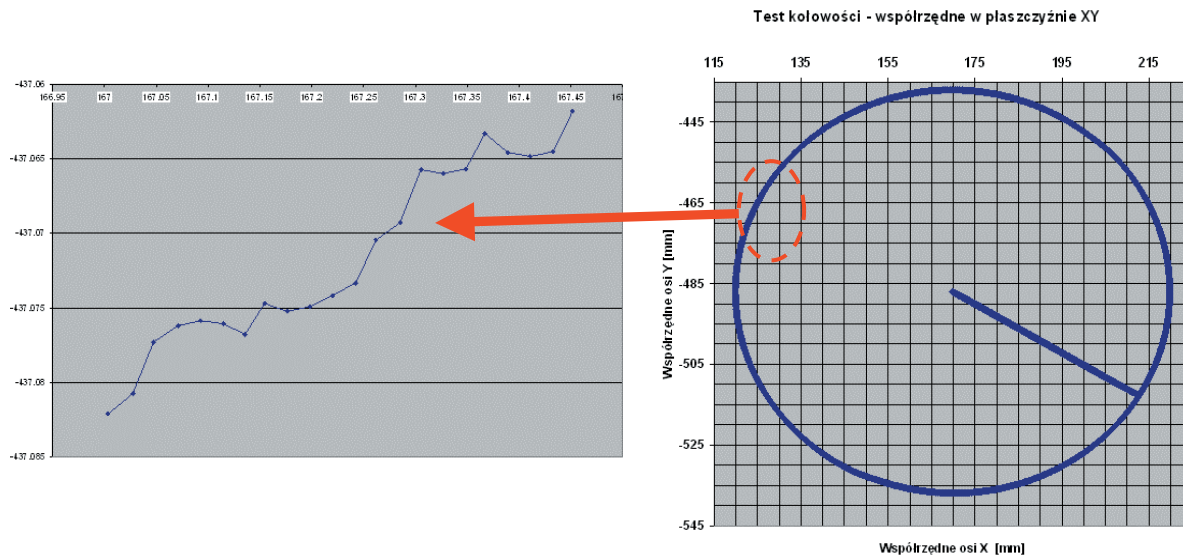
Na rys. 13a przedstawiono Vector Bar 2D – dedykowany do badania dokładności ruchów płaskich maszyn NC (głównie tokarek). Oprócz osi obrabiarki (X i Z) oznaczono współrzędne biegunowe (kąt α i promień R), które są bezpośrednio wyznaczane przez moduły pomiarowe oraz przykładowy tor ruchu w trakcie testu. Przesunięcie środka obrotu (początku biegunowego układu współrzędnych) poniżej osi Z oraz odsunięcie go od wrzeciona (w kierunku +Z) pozwala na wykonanie testu kołowości w pełnym zakresie osi X oraz wykonanie pomiarów w pobliżu wrzeciona.

Vector Bar 3D (rys. 13b) został rozbudowany o dodatkową oś obrotową (usytuowaną w podstawie). Dzięki temu możliwy jest pomiar we współrzędnych sferycznych. Za pozycję początkową ramienia przyjęto w tym przypadku jego poziome usytuowanie, co zostało zaprogramowane jako znak referencyjny.



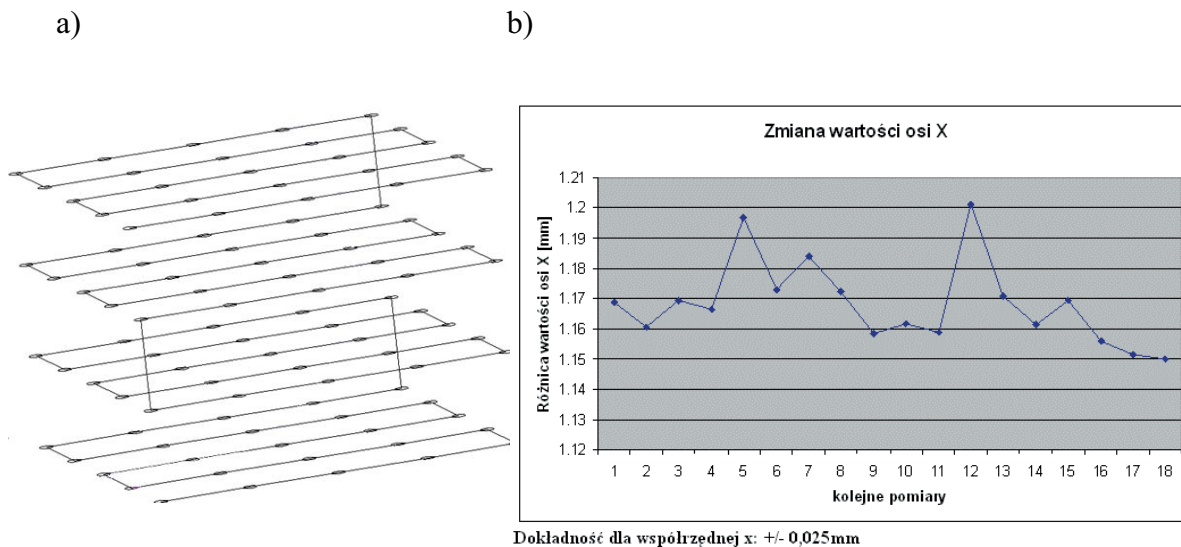
Rys. 13. Vector Bar: a) konstrukcja do pomiarów w 2D, b) układ pracujący w sferycznym układzie współrzędnych

W przypadku testu kołowości przepisy badania obrabiarek nie wymagają pomiaru kąta, gdyż analizowany jest tylko kształt wykresu. Pomiar kąta pozwala jednak na skrócenie czasu testu (nie jest potrzebny dodatkowy przejazd, na podstawie którego jest najczęściej wyliczana średnia prędkość ruchu) i jednoznacznie identyfikację poszczególnych położeń. W czasie ruchu po okręgu istnieje możliwość sprawdzenia np. powtarzalności toru ruchu, czy też dokładności pozycjonowania.



Rys. 14. Wykres testu kołowości, wykonanego za pomocą VB na centrum frezarskim Arrow 500 i jego powiększony fragment

Współrzędne układu związanego z VB są przeliczane przez oprogramowanie na współrzędne kartezjańskie. Jeśli osie układu współrzędnych obrabiarki pokrywają się z osiami VB, współrzędne punktów mogą być bezpośrednio porównywane w celu uzyskania odchyłek. Kształt ścieżki pomiarowej jest przy tym praktycznie dowolny (rys. 15).



Rys. 15. Badanie mapy odchyłek centrum frezarskiego: a) kształt ścieżki pomiarowej, b) zmiany wartości współrzędnej x w jednym z punktów pomiarowych

6. PODSUMOWANIE

Wprowadzenie niezależnego układu współrzędnych do układów testujących dokładność maszyn NC pozwala na zwiększenie ilości informacji zebranych w czasie testów. Jednym urządzeniem można badać dokładność geometryczno – ruchową obrabiarki (gdy będziemy analizowali kształt uzyskanego wykresu), dokładność i powtarzalność pozycjonowania oraz wiele innych parametrów charakteryzujących dokładność obrabiarek.

Konstrukcja pręta wektorowego umożliwia badanie praktycznie całej przestrzeni roboczej (zarówno tokarek jak i centrów frezarskich) i nie wprowadza ograniczeń kształtu ścieżki pomiarowej. Pojawia się zatem możliwość testowania programów obróbkowych jeszcze przed rozpoczęciem procesu skrawania – nie jest to już tylko symulacja komputerowa, lecz rzeczywiste ruchy i kontrola położenia narzędzia.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Szafarczyk M., Śniegulska - Grądzka D., Wypysiński R., *Podstawy układów sterowań cyfrowych i komputerowych*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007.
- [2] Kakino Y., Ihara Y., Shinohara A., *Accuracy inspection of NC machine tools by Double Ball Bar method*, Wydawnictwo Hanser, Monachium 1993.
- [3] *PRONUM Instrukcja instalacji układu sterowania numerycznego CNC PRONUM 630T*, Pronum Sp. z o.o., Warszawa 2003.
- [4] Ratajczyk E., *Współrzędnościowa technika pomiarowa. Maszyny i roboty pomiarowe*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa 2005.
- [5] Prospekt informacyjny firmy Heidenhain, *Linear Encoders for Numerically Controlled Machine Tools*, Heidenhain 2007.
- [6] Prospekt informacyjny firmy Renishaw plc, *Performance measuring system*, Renishaw 2005.
- [7] PN-ISO 230-4, Przepisy badania obrabiarek, Badania okrągłości w obrabiarkach sterowanych numerycznie, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 1999.
- [8] Heidenhain, *Measuring Systems for Machine Tool Inspection and Acceptance Testing*, Heidenhain, Berlin 2002.
- [9] Sriyotha P., Yamazaki K., *An Experimental Study on the Vibration-Free High-Speed Operation of a Three-Dimensional Coordinate Measuring Machine*, Journal of Manufacturing Systems: Volume 23, str. 173-181, 2004.
- [10] Weikert S., *R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools*, CIRP ANNALS 2004, Volume 53/1-2004.
- [11] Masaki U., *Machine tool accuracy measuring device*, numer patentu: JP2001091203, 2001.