

Eugeniusz RATAJCZYK

POLITECHNIKA WARSZAWSKA, INSTYTUT METROLOGII I SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Zaawansowane pomiary współrzędnościowe w technikach wytwarzania

Prof. zw. dr inż. Eugeniusz RATAJCZYK

Uprawiana dyscyplina: miernictwo
interdyscyplinarne: metrologia wielkości
geometrycznych, współrzędnościowa technika
pomiarowa, maszyny i roboty pomiarowe, sensory i
sondy pomiarowe. Autor podręcznika:
„Współrzędnościowa Technika Pomiarowa”. Wyd.
Oficyna Wyd. Pol. W-wskiej, Warszawa, 2005.



e-mail: Erat@mchtr.pw.edu.pl

Streszczenie

Przedstawiono maszyny i urządzenia pomiarowe pracujące w technice pomiarów współrzędnościowych, które mogą być zastosowane bezpośrednio w otoczeniu produkcji. Zilustrowano je przykładami maszyn w postaci robotów i centrów pomiarowych oraz tzw. ramion pomiarowych.

Słowa kluczowe: współrzędnościowa maszyna pomiarowa, robot pomiarowy, centrum pomiarowe, ramiona pomiarowe.

Advanced coordinate measurements in production engineering

Abstract

CMM's and measuring equipments that can be used in environments of production are presented. They are illustrated by examples of robots, measuring centers and measuring arms.

Keywords: coordinate measuring machine (CMM), measuring robot, measuring center, measuring arms.

1. Wprowadzenie

Współrzędnościowe maszyny pomiarowe (CMM) i takie ich opcje jak roboty, centra i ramiona pomiarowe pozwalają na wykonywanie pomiarów złożonych i skomplikowanych elementów w czasie dostosowanym do rytmu produkcji, dzięki czemu możliwe jest bezpośrednie oddziaływanie na jakość procesu wytwarzania. Ich szczególną własnością jest możliwość zastosowania bezpośrednio w otoczeniu produkcji, dzięki zwiększonej odporności na wpływy temperatury, drgań podłoża oraz na zanieczyszczenia zewnętrzne takie jak zapylenia, mgły olejowe, itp. Ponadto odznaczają się one, zwłaszcza roboty pomiarowe, zwiększoną prędkością pomiaru i zwiększonymi przyspieszeniami zespołów ruchomych w porównaniu do klasycznych maszyn pomiarowych.

W referacie przedstawione zostaną przykłady robotów, centrów i tzw. ramion pomiarowych z pokazaniem ich możliwości pomiarowych oraz scharakteryzowane zostaną ich główne parametry metrologiczne i funkcyjne.

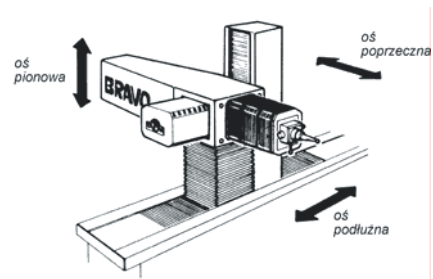
Zarówno roboty jak centra pomiarowe pracują w trybie automatycznym (CNC). Natomiast ramiona pomiarowe przystosowane są do pracy w trybie ręcznym, chociaż umożliwiając przeprowadzenie pomiarów również w trybie ciągłym jako pomiary skaningowe.

2. Roboty pomiarowe

Roboty pomiarowe budowane są w dwóch opcjach konstrukcyjnych jako wysięgnikowe oraz jako kabinowe o konstrukcji kolumnowej.

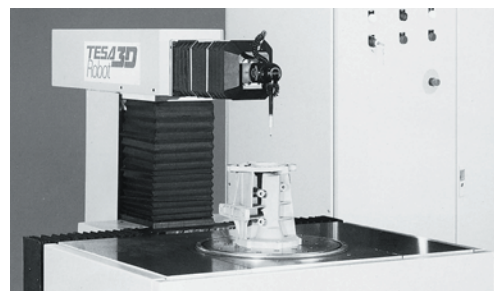
2.1. Roboty wysięgnikowe

Roboty wysięgnikowe realizują pomiary współrzędnościowe poprzez przemieszczenia pomiarowe w trzech kierunkach X,Y,Z, tj. w osi podłużnej, poprzecznej i pionowej w sposób pokazany na rys. 1.



Rys.1. Osie przemieszczeń robota wysięgnikowego
Fig. 1. Displacement axes of cantilever robot

Pierwszym producentem robotów wysięgnikowych była szwajcarska firma TESA, która zastosowała robot pokazany na rys.2 w amerykańskiej firmie HRRIS GRAPHIS w Dover już w 1986 r. do kontroli precyzyjnych elementów maszyn drukarskich, konkretnie korpusu przekładni zębatej. O ile pomiar tego korpusu prowadzony uprzednio tradycyjnie, przy użyciu różnorodnych narzędzi pomiarowych, trwał 4,5 godziny, a przy zastosowaniu współrzędnościowej maszyny pomiarowej – 50min, to zastosowanie robota pomiarowego skróciło ten czas do 15min.

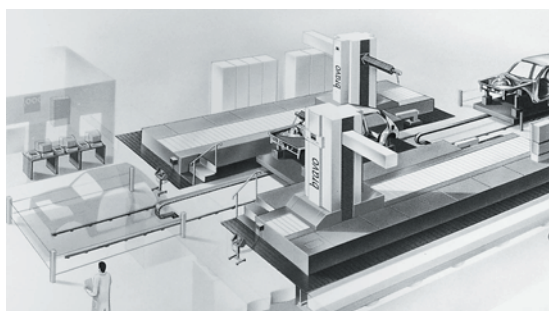


Rys.2. Robot wysięgnikowy firmy TESA
Fig.2. Cantilever robot (TESA)

Firma TESA rozpoczęła wówczas wytwarzanie dwóch rodzajów robotów wysięgnikowych. Jeden o symbolu 533, mający zakres pomiarowy 500x300x3000 lub 500x650x300mm oraz drugi, o symbolu 1057, mający zakres 1000x500x700 lub 1000x1000x7500mm. Rozdzielczość ich układów pomiarowych wynosi 1 μ m, a błąd pomiaru w jednym kierunku, na poziomie 2s (niepewność wg VDI/VDE 2617 [1]), wynosi dla obu rodzajów robotów $U_1 = 7+1.5L/100 \mu$ m, gdzie: L-mierzona długość w mm. Rozrzut wskazań w dowolnym punkcie zakresu pomiarowego, również na poziomie 2s, równa się $\pm 5 \mu$ m. Prędkość pomiarowa wynosi 0.5 m/s, a maksymalne przyspieszenie - 3 m/s². Roboty

te wyposażane są w głowice elektrostatyczne i głowice obrotowo-uchylne typu PH9 firmy RENISHAW [2]. Mogą one być integrowane z procesem produkcyjnym, poprzez umiejscowienie ich w liniach technologicznych lub umieszczenie w ich pobliżu. Obecnie głównym producentem robotów pomiarowych pod nazwą BRAVO jest włoska firma DEA (Digital Electronic Automation).

Roboty BRAVO wytwarzane są w sześciu rozmiarach od najmniejszych zakresów pomiarowych wynoszących 4150x1500x2650 do największych – 85300x1500x3250mm. Ich niedokładności, określane wg wytycznych VDI/VDE [1] jako niepewność pomiarowa, wynoszą od $U_3=40+35L/1000 \mu\text{m}$ do $U_3=50+45L/1000 \mu\text{m}$. Są to więc dokładności o rząd mniejsze od maszyn klasycznych średniej dokładności pomiarowych typu laboratoryjnego. Dlatego też stosowane są głównie do pomiaru karoserii samochodowych i różnych części blaszanych, gdzie tolerancje wykonania są stosunkowo duże. Na rys. 3 pokazano zastosowanie robotów BRAVO do pomiaru karoserii samochodu.



Rys.3. Roboty wysięgnikowe BRAVO firmy DEA w procesie pomiarów karoserii samochodowych

Fig.3. Cantilever robot 'BRAVO (DEA)' during measurements of car-body

Roboty BRAVO osiągają prędkości przemieszczeń zespołów ruchomych 52m/min, a przyspieszenia 2,9m/s². Podstawowym oprogramowaniem jest pakiet PC-DMIS [2].

Oprogramowanie zawiera opcje statystyczne, które pozwalają na śledzenie, poprzez monitoring graficzny, jakości procesu wytwarzania i korygowania nastawień obrabiarek. Uzyskiwana jest informacja w postaci graficznej m.in. na tle utworzonej karty kontrolnej. Podawane są średnie wartości wymiarów poszczególnych partii elementów, co pozwala ocenić trend zmiany wymiarów. Ponadto podawane są wartości wskaźników, m.in. Cp i Cpk określających zdolność procesu obróbkowego. Tworzone są histogramy dotyczące uzyskiwanych wymiarów podczas obróbki i podawane parametry rozkładu wymiarów. Wszystko to pozwala śledzić przebieg jakości procesu obróbkowego i przeciwdziałać powstawaniu ewentualnych braków.

Nie można nie zauważyć, że postęp w budowie, sterowaniu i oprogramowaniu maszyn wysięgnikowych zbliżył się do osiągnięć robotów wysięgnikowych i to zarówno co do wydajności pomiarowych jak i dokładności. Nie mniej otwarte konstrukcje narażone są na wpływ temperatury i innych czynników zaburzających proces pomiarowy nie dający się w pełni skompensować. Dlatego też budowane są roboty obudowane tzw. kabinowe zwane również automatami (mess automat) zapewniające wyższe dokładności, chociaż ze względu na wymiary kabin nadające się głównie do pomiaru przedmiotów o niedużych wymiarach, a więc w większości przedmiotów maszynowych.

2.2. Roboty kabinowe

Roboty kabinowe w pełni lub częściowo obudowane wytwarza szereg firm jak C.ZEISS, LEITZ Messtechnik, RENAULT, MITUTOYO, BROWN&SHARPE i inni.

Robot pomiarowy kabinowy (w części obudowany) SIRIO 688 produkcji firmy LEITZ Messtechnik przedstawiono na rys.4. Jest on wykonywany w dwóch odmianach różniących się zakresami pomiarowymi. SIRIO 688 ma zakresy pomiarowe wynoszące 600x800x800mm, a robot SIRIO 6128 – 600x1200x800mm. Każdy z nich wykonywany jest w dwóch opcjach jako Standard i jako MultiSCAN.

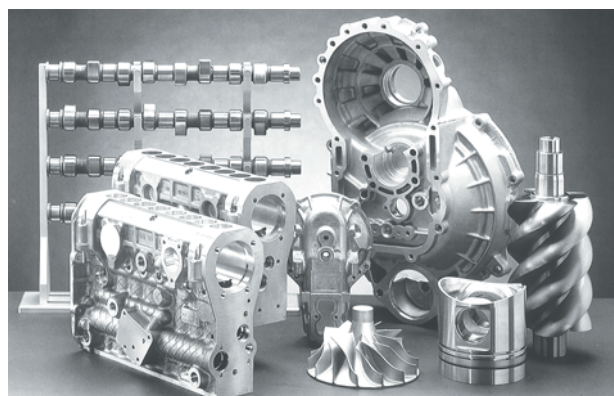
Graniczny błąd dopuszczalny wskazania pomiaru długości (wg oznaczeń ISO [3]) wynosi dla maszyn SIRIO 688 i SIRIO 6128 w wykonaniu standard $MPE_E=2,5+L/250 (\mu\text{m})$ a błąd systemu głowicy pomiarowej dla pomiarów punktowych – $R=3,2 \mu\text{m}$. Dla opcji MultiSCAN wartości te wynoszą $MPE_E=1,9+L/250 (\mu\text{m})$, $R=2,6 \mu\text{m}$ i dla pomiarów skaningowych $THP = 3,5 \mu\text{m}$ (72s). Wartości wymienionych błędów są zapewnione nawet gdy temperatura na zewnątrz utrzymana jest w przedziale 10-40°C.



Rys.4. Robot kabinowy SIRIO 688 firmy LEITZ Messtechnik

Fig.4. Cabine Measuring robot, SIRIO 688 Leitz Messtechnik

Przykłady pomiaru elementów maszynowych, które mogą być zmierzone przy zastosowaniu robota SIRIO przedstawione są na rys. 5. Elementy do mierzenia, umocowane w odpowiednich uchwytach lub paletach, umieszczane są na obrotowym stole pomiarowym, co pozwala na ustawianiu kolejnych powierzchni przedmiotu do kierunku przemieszczania pinoli.



Rys.5. Przykłady elementów maszynowych możliwych do zmierzenia za pomocą robota kabinowego SIRIO

Fig.5. The example of workpieces that can be measured by SIRIO robot

Wymiana zestawów głowic i trzpieni pomiarowych odbywa się za pomocą podajnika z magazynka tarczowego w czasie nie dłuższym niż 12s. Przy czym w opcji MultiSCAN dobór głowic, w celu wykonania pomiarów, odbywa się automatycznie na podstawie pojedynczych punktów lub skaningowo w opcji High Speed Scanning. Temperatura jest w pełni kompensowana automatycznie dzięki zastosowaniu 28 zintegrowanych sensorów do pomiaru temperatury. Podstawowym pakietem oprogramowania jest

QUINDOS [2]. SIRIO jest w zasadzie przeznaczone do zastosowania w liniach produkcyjnych jako składnik systemu kontroli jakości i jest przeznaczone do dokładnego pomiaru takich przedmiotów jak bloki silników, obudowy przekładni zębatych, itp.

Automaty SIRIO oferuje także firma BROWN&SHARPE w ramach koncernu HEXAGON METROLOGY. Również japońska firma MITUTOYO oferuje automaty kabinowe pod nazwą **MACH 806** o zakresach pomiarowych 460x460x300mm modelu MACH 403-04 i 1021x818x615 modelu MACH 806-10. Graniczny dopuszczalny błąd wskazania pomiaru długości wynosi $MPE_E=3,5+4,0L/1000$ (μm) przy temperaturze 15-25°C i $MPE_E=5+5,0L/1000$ (μm) przy temperaturze 10-25°C. Zastosowane układy pomiarowe mają rozdzielczość wyjściową 0,1 μm .

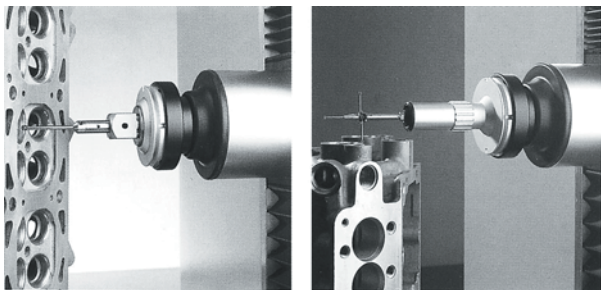
Podobne automaty, lecz całkowicie obudowane wytwarza także firma C.Zeiss.

Kabinowy robot pomiarowy **FC** produkcji firmy C.ZEISS wytwarzany jest w dwóch zakresach pomiarowych jako FC 600 i FC 900. Występuje również pod nazwą Producyjne Centrum Pomiarowe. Robot FC 600 ma zakresy pomiarowe wynoszące 300x450x600mm, a robot FC900 – 500x700x900mm.

Roboty FC 600 i FC 900 mogą mierzyć przedmioty o masach dochodzących do 300 i 1000kg. Są to urządzenia wysokiej dokładności, dzięki zastosowaniu korzystnych termicznie przewodnic w osi X i Z wykonanych w technologii CARAT i wzorców inkrementalnych o rozdzielczości sygnału wyjściowego wynoszącego 0,2 μm , a wykonanych z termicznie odpornego materiału jakim jest ZERODUR. Zastosowany automatyczny system pomiaru temperatury, zarówno mierzonych przedmiotów, jak i istotnych pod względem termicznym węzłów automatu, umożliwia kompensację temperatury na tyle, że realna jest praca obudowanego urządzenia nawet w obszarze temperatury otoczenia w przedziale od 15 do 35°C. Wówczas niedokładność pomiaru może być utrzymana na niskim poziomie i tak (wg VDI/VDE) jednoosiowa niedokładność wynosi $U_1=2,5+L/250$ (μm), a przestrzenna $U_3=3,5+L/200$ (μm).

Zintegrowany z systemem sterująco-pomiarowym automatu, pomiarowy stół obrotowy stwarza czwartą oś, co umożliwia ustawianie przedmiotu (w trybie CNC) odpowiednio do kierunku przemieszczenia pinoli. Zwiększa to dokładność i prędkość pomiaru i stopień dostępu do mierzonej powierzchni. Pomiarowy stół obrotowy, m.in. RT02-400 lub RT02-600 ma rozdzielczość wskazań wynoszącą 0,25' i może osiągać prędkości obrotu od 1'"/s do 90°/s z błędem położenia kąowego wynoszącym 2'".

Automatem można mierzyć przedmioty w postaci korpusów i głowic silników, obudów skrzyni biegów, m.in. (rys.6) przy użyciu impulsowych głowic dwustopniowych ST lub RST.

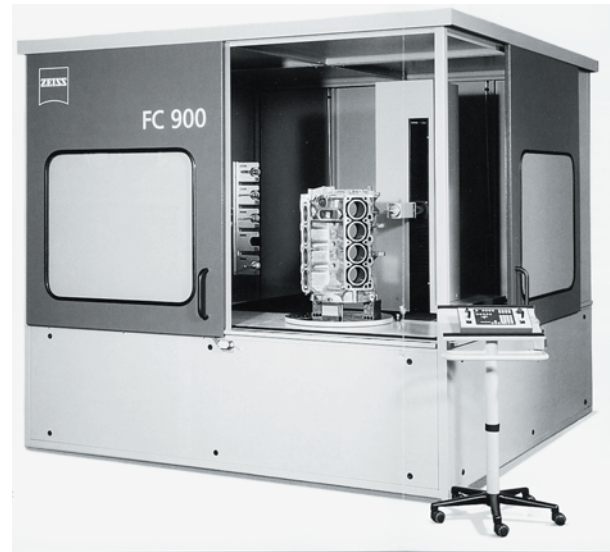


Rys. 6. Przykłady pomiaru przy użyciu głowic pomiarowych ST i RST
Fig. 6. The examples of measurements with the use of measuring probes ST and RST

Na podkreślenie zasługuje stosunkowo duża prędkość pomiarowa dochodząca do 100mm/s (w trybie pomiarów seryjnych prędkość ta może osiągać 200mm/s przez FC600 i 300mm/s – FC 900) i przyspieszenia dochodzące do 2000mm/s².

Na uwagę zasługuje robot kabinowy firmy C.Zeiss o symbolu FC 900 VAST (rys.7). Umożliwia on wykonywanie pomiarów w trybie skaningu ciągłego, dzięki zastosowaniu głowicy mierzącej VAST [4]. Ma on zakres pomiarowy wynoszący 500x700x900mm.

Niedokładności pomiarowe (wg VDI/VDE) wynoszą: jednoosiowa $U_1=2,5+L/250$ (μm) i przestrzenna $E_3=U_3=3,5+L/200$ (μm), przy niedokładności głowicy pomiarowej $R_3=3,5$ (μm) - E_3 i R_3 wg ISO 10360-2 (poprzednia opcja normy z 1995).



Rys. 7. Widok kabinowego robota pomiarowego FC 900 VAST firmy C.Zeiss
Fig. 7. The view of cabine robot FC900 VAST (C.Zeiss)

W budowie zastosowano materiały w technologii CARAT oraz liniały inkrementalne wykonane z ZERODURU, które pozwalają na osiągnięcie rozdzielczości sygnału wyjściowego wynoszącej 0,1 μm . Zastosowano obrotowy stół pomiarowy RT1 zintegrowany z systemem sterująco-pomiarowym robota. Prędkość pomiarowa może dochodzić do 70mm/s, a w cyklu CNC nawet do 300mm/s, przy maksymalnych przyspieszeniach do 2000mm/s². Maksymalna prędkość pomiarowego stołu obrotowego RT1 wynosi 450/s, maksymalne przyspieszenie 225°/s², a jego dopuszczalne odchyłki osi wynoszą: osiowa $f_a=0,5\mu\text{m}$, promieniowa $f_r=0,5\mu\text{m}$ i zataczania $f_t=0,5''$. Automat ma masę 5300kg i może mierzyć przedmioty, przy zastosowaniu stołu obrotowego ST1, mające masę nie większą niż 600kg. Gradienty temperatury wynoszą 2,5K/h, 10,0K/d i 2,5K/m.

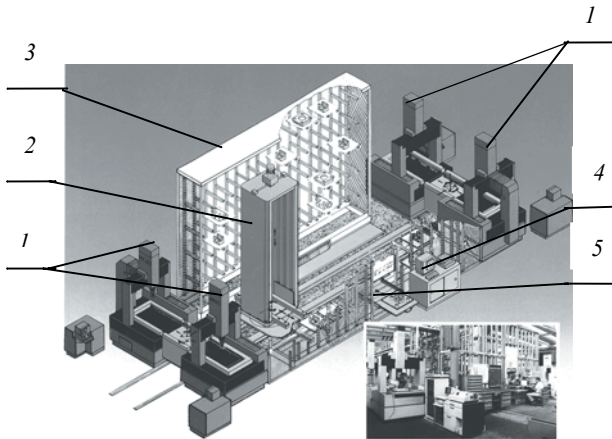
3. Centra pomiarowe

Centra pomiarowe tworzone są na bazie klasycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych, które, jako maszyny laboratoryjne, wymagają spełnienia odpowiednich warunków, by można było wykorzystać ich wysokie dokładności. Odpowiednie warunki mogą zaistnieć przez umieszczenie maszyny współrzędnościowej w kabinie, która znajdować się może nawet w pomieszczeniu produkcyjnym.

Na uwagę zasługuje rozwiązanie takich centrów zrealizowane na zamówienie przez niemiecką firmę KOMET, która specjalizuje się w wykonywaniu kabin termicznych (klimatyzowanych). Firma KOMET opracowała przy współudziale firmy C.ZEISS centra pomiarowe, zastosowane w przemyśle niemieckim, o symbolach AKZ 500, PKZ 850 i QUATRO. Dla ilustracji przedstawione zostanie jedno z nich jako najbardziej zaawansowane pod względem budowy i funkcji.

Centrum pomiarowe **QUATRO** zainstalowane w jednej z fabryk w Hamburgu składa się z czterech współrzędnościowych maszyn pomiarowych 1 (rys.8) PMC 850 i WMM 850 produkcji firmy C.ZEISS, manipulatora kolumnowego 2, magazynu regałowego 3 i centralnego komputera sterującego 4. Przedmioty przeznaczone do pomiarów, ustawione na paletach, podawane są do Centrum poprzez okienko 5, po zamknięciu którego manipulator 2 pobiera i przekazuje najpierw do magazynu regałowego 3, w którym przedmioty spoczywają do czasu wyrównania temperatury, a następnie dostarcza na stanowisko pomiarowe jednej z czterech

maszyn pomiarowych. Dla danego przedmiotu lub przedmiotów na palecie uruchamiana jest odpowiednio wcześniej przygotowana procedura pomiarowa. Rozpoznanie przedmiotu odbywa się przez skanowanie kodu kreskowego umieszczonego na palecie.



Rys.8. Centrum pomiarowe QUATRO
Fig.8. Measuring centre QUATRO

Zastosowany system sterujący ATRAL (Automatische Transport und Lagerverwaltungssystem), oparty na komputerze HP1000, odpowiada za transport przedmiotów, ich składowanie w magazynie regalowym i steruje pracą manipulatora. System ATRAL uruchamia procedury pomiarowe na poszczególnych maszynach współrzędnościowych odpowiednich dla danego przedmiotu. Manipulator może przemieszczać się wzdłuż kabiny, obracać się i przesuwac podnośnik z paletą w osi pionowej. Dwie z maszyn pomiarowych są przeznaczone do pomiaru kół zębatych. Połączenie systemu sterującego z manipulatorem i z poszczególnymi maszynami pomiarowymi, a właściwie z ich systemami sterująco-pomiarowymi, odbywa się poprzez interfejs RS232C.

Ciekawym rozwiązaniem jest propozycja firmy C.ZEISS zastosowania dokładnej współrzędnościowej maszyny pomiarowej jaką jest maszyna PRISMO w obudowie Akcept jako centrum, które pokazane jest na rys.9, a które jest przeznaczone do zastosowań produkcyjnych.



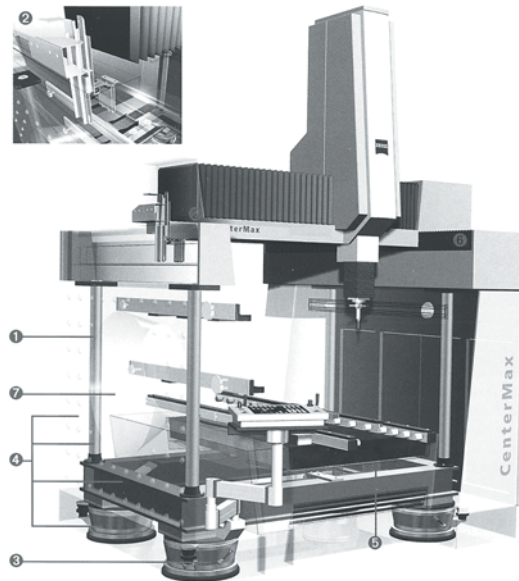
Rys. 9. Centrum pomiarowe PRISMO VAST
Fig. 9. Measuring centre PRISMO VAST

Centrum zbudowane jest na bazie maszyny pomiarowej PRISMO VAST HTG. Sztywno związana z systemem obudowa

stanowi integralną jego część i hermetycznie chroni maszynę przed zewnętrznymi zakłóceniami atmosferycznymi, elektromagnetycznymi i zanieczyszczeniami. Dostęp do przestrzeni pomiarowej umożliwiają dwa pneumatycznie zasuwane okna sterowane przez oprogramowanie sterujące. Komputer i jego urządzenia peryferyjne osadzone są w zamkniętej szafie zawieszanej na krawędzi kabiny. Specjalnie usztywniona konstrukcja pozwala na dowolne przemieszczanie maszyny przez użytkownika do różnych zadań pomiarowych w hali produkcyjnej, bez konieczności wykonywania prac kalibracyjnych przez serwis producenta. Centrum PRISMO ACCEPT produkowane jest standardowo w sześciu wielkościach zakresu pomiarowego od maszyn serii 7/9/5 do maszyn serii 12/24/10. Tak obudowana maszyna PRISMO może pracować w zakresie temperatury 18-35°C przy gwarantowanych niedokładnościach pomiarowych od $E/U_3=2,0+L/300$ (μm), $V_2=1,2\mu$ do $E/U_3=3,2+L/250\mu\text{m}$, $V_2=2,0\mu\text{m}$ zależnych od wielkości przestrzeni pomiarowej i przedziałów temperatury otoczenia. PRISMO ACCEPT wyposażone jest w głowice skaningową VAST.

Części do mierzenia dostarczane są na palecie, przy czym mogą być zastosowane, o różnym stopniu wydajności, a więc i różnym stopniu automatyzacji, urządzenia załadowcze i transportowe – z ręcznym systemem załadoczym lub automatycznym. Zależy to od ogólnego systemu produkcyjnego w danej fabryce.

W ostatnich latach podjęto prace nad zbudowaniem maszyny pomiarowej, która mogła by spełniać funkcje centrum pomiarowego w tym sensie, że mogła by być zainstalowana w otoczeniu produkcji i tym samym bez konieczności budowania specjalnych kabin. Przykładem takiego rozwiązania uwieńczonego sukcesem, jest centrum pomiarowe **CenterMax** produkcji firmy C.ZEISS, którego schemat przedstawiono na rys.10.



Rys. 10. Schemat budowy CenterMax
Fig. 10. The scheme of construction of CenterMax

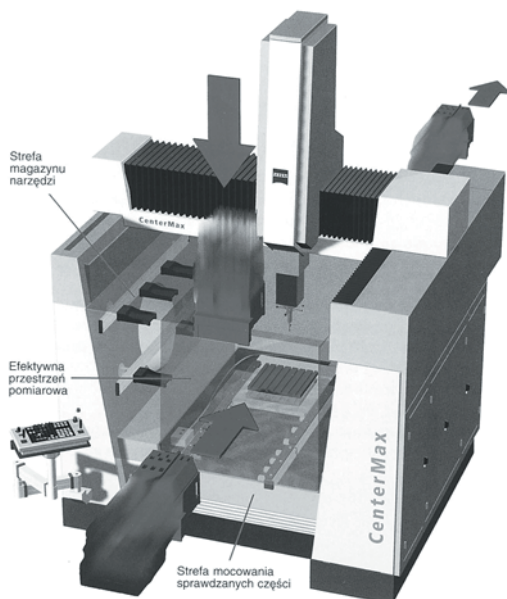
W budowie CenterMax zastosowano dźwigary z inwaru 1 (rys.10), które wraz z łożem wykonanym ze stopu mineralnego, stanowią twarde jądro maszyny. Inwar, charakteryzujący się niskim współczynnikiem rozszerzalności liniowej, zmniejsza podatność na wpływ temperatury. Osłony 2, o ukształtowaniu labiryntowym, chronią łożyska i linały pomiarowe, przed zapyleniem i mgłą olejową. Aktywny układ tłumienia 3 składa się z czterech tłumików drgań, a specjalny układ kontrolny nadzoruje działanie systemu, wyrównując ewentualne różnice ciśnień. Dodatkowo zastosowano układ tłumienia dynamicznego i termicznego 4 (temperature resistant frame) zbudowany ze stopu mineralnego połączony z dźwigarami ze stali niklowej. Przewidziano również

zbiorniki 5 do odprowadzania cieczy technologicznych, m.in. wody, oleju, chłodziwa, m.in. Prowadnice 6 umiejscowiono wysoko, by zmniejszyć wielkość przemieszczanych mas – zrezygnowano tym samym z podpór podtrzymujących belkę portalu, jak to występuje w maszynach portalowych. Osłony 7 wykonane ze stopu mineralnego, oprócz nadania odpowiedniego kształtu maszynie, chronią Centrum przed zewnętrznymi zaburzeniami dynamicznymi, termicznymi i przed zapyleniem.

CenterMax ma zakres pomiarowy wynoszący 900x1200x700mm. Graniczny błąd dopuszczalny wskazania MPE_E wynosi $1,6+L/300$ (μm), a wg VDI/VDE $U_1=1,3+L/300$ (μm), $U_3=MPE_E$. Graniczny błąd dopuszczalny zespołu głowicy pomiarowej dla pomiarów punktowych MPE_P wynosi $1,7\mu\text{m}$, (wg VDI/VDE $V_2=1,0\mu\text{m}$), a dla pomiarów skaningowych MPE_{THP} $3,1\mu\text{m}$ (72s). Wymienione niedokładności mogą być zachowane nawet gdy temperatura otoczenia zawiera się w przedziale od 8 do 40°C. Dopuszczalne gradienty temperaturowe wynoszą 2K/h, 8,0K/d i 2,0K/m.

Centrum CenterMax jest konstrukcyjnie dostosowane do warunków produkcyjnych m.in. poprzez (rys.11):

- zbudowanie przestrzeni pomiarowej umożliwiającej wielowariantowe wypełnianie strefy mocowania przedmiotów przez zastosowanie stołu pomiarowego w postaci płyty granitowej lub stołu obrotowo-pomiarowego lub palet,
- możliwość dostarczania części do pomiaru z trzech stron przestrzeni pomiarowej,
- zastosowanie automatycznego magazynu narzędzi znajdującego się poza przestrzenią pomiarową, umiejscowionego na bocznej ścianie maszyny o pojemności zawierającej maksymalnie 24 gniazda narzędziowe.



Rys.11. Strefy funkcjonalne CenterMax
Fig. 11. Functional zones of CenterMax

Zbudowane Centrum pomiarowe dało podstawy do opracowania mniejszych jednostek do podobnego stosowania w otoczeniu produkcji z możliwością integracji z centrami produkcyjnymi. Przykładem nowego kompaktowego centrum jest **GageMax** [2,5]. GageMax ma zakres pomiarowy wynoszący 700x500x500mm. Zastosowana głowica pomiarowa VAST_{XT} pozwala wykonywać pomiary, do wyznaczenia wymiarów kontrolowanych części, z pojedynczych punktów lub dużej liczby punktów na drodze skaningu.

GageMax jest przewidziane do zastosowania bezpośrednio w warunkach produkcyjnych i może być stosunkowo łatwo włączone w centrum obróbkowe, do jego miejsc transportowych, bowiem dostęp do przestrzeni pomiarowej maszyny jest możliwy

z jednego z trzech kierunków. Ponadto możliwe jest zamocowanie w podstawie maszyny stołu o dowolnej konfiguracji. Może to być stół granitowy, obrotowy stół pomiarowy lub paleta z opcją przesuwu m.in. na rolkach. Instalowanie tych elementów nie zmniejsza zakresu pomiarowego w osi Z, gdyż montowane są w głębi podstawy maszyny. Dla zachowania stałej przestrzeni pomiarowej również magazyn z gniazdami do wymiany głowic i trzpieni pomiarowych montowany jest poza obszarem przestrzeni pomiarowej.

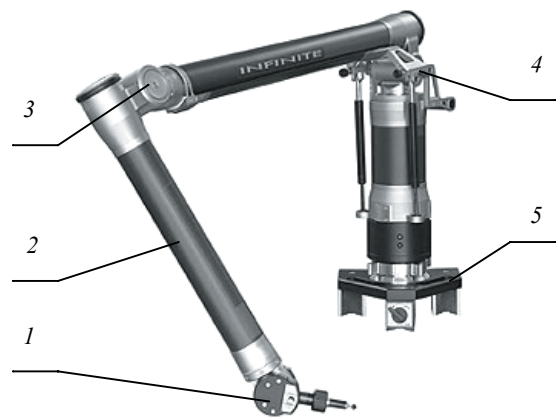
Ostatnio obserwuje się zainteresowanie techniką współrzędnościową przez małe firmy, m.in. zajmujące się naprawą aut, zwłaszcza karoserii po wypadkach ale także do pomiaru niekiedy drobnych chociaż dokładnych elementów maszynowych. Dla takich zakładów powstały konstrukcje przenośne stosunkowo tanich urządzeń pomiarowych pracujących w technice współrzędnościowej o nazwie „**Ramiona pomiarowe**”.

4. Ramiona pomiarowe

Ramiona pomiarowe wywarzane są obecnie przez szereg firm, przy czym do najbardziej znanych zalicza się firmę CimCore (USA), która wytwarza trzy rodzaje ramion pod nazwa Singer II, 3000i i Infinite; firmę FARO (USA) wytwarzającą sześć rodzajów ramion (Gage, Gage Plus, Advantage, Paltinum, Titanium, ScanArm); niemiecką firmę ZettMess (ramiona o symbolu AMPG) i firmę ROMER (Francja) oferującą ramiona Sigma, Flex i Omega. Niektóre z tych ramion pomiarowych zostaną zaprezentowane – ich działanie, własności metrologiczne i zastosowania.

4.1. Ramiona pomiarowe CimCore

Najnowszą i najdokładniejszą konstrukcją tej firmy jest ramię pomiarowe INFINITE (rys. 12), wprowadzone na rynek w 2004 r.



Rys.12. Ramię pomiarowe Infinite firmy CimCore
Fig. 12. Measuringarm INFINITE (CimCore)

Cechami szczególnymi rozwiązania konstrukcyjnego są:

- wykonanie z włókna grafitowo-węglowego zarówno końcówek pomiarowych montowanych głowicy 1 jak ramię 2 (rys.12) w celu uzyskania większej wytrzymałości mechanicznej i stabilności temperatury w zakresie od 0 do 46°C,
- zastosowanie enkoderów kątowych 3 firmy Heidenhain wykonanych specjalnie dla firmy CimCore,
- zastosowanie przeciwwagi 4 opartej na dwóch siłownikach kompensującej masę całego ramienia,
- system mocowania do podłoża przez zaciski magnetyczne 5,
- zastosowanie bezprzewodowej komunikacji pomiędzy ramieniem pomiarowym a komputerem w standardzie WiFi oraz wyposażenie w zintegrowany akumulator Li-Io,
- zamontowanie w głowicy pomiarowej 1 cyfrowej kamery pozwalającej na dokonywanie inspekcji oraz na nanoszenie, w

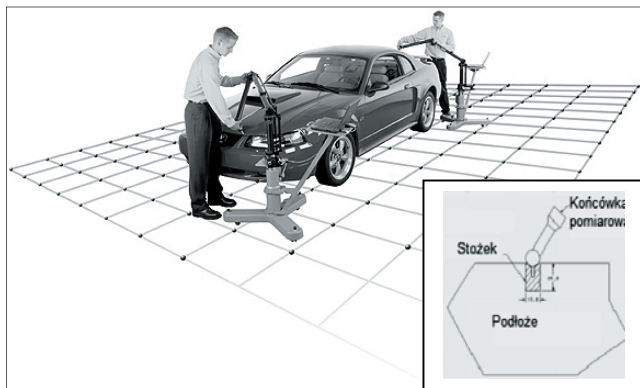
raporcie pomiarowym generowanym przez oprogramowanie, wartości odchylek poszczególnych punktów kontrolnych na rzeczywisty widok mierzonego elementu,

- zastosowanie systemu automatycznego rozpoznawania rodzajów zastosowanych końcówek pomiarowych montowanych do głowicy 1, bez potrzeby ich każdorazowej kalibracji,
- zastosowanie nieograniczonego obrotu ramion, co zwiększa dostępność do mierzonego detalu z dowolnego kierunku.

Dokładności ramienia pomiarowego Infinite dla konfiguracji 6 osiowej wynoszą, w zależności od rodzaju testu, od $\pm 4,3\mu\text{m}$ do $\pm 13,6\mu\text{m}$ dla najmniejszego zakresu wynoszącego 1200mm (obejmującego przestrzeń $0,9\text{m}^3$) i od $\pm 42,5\mu\text{m}$ do $\pm 63,8\mu\text{m}$ dla zakresu 3600mm (obejmującego przestrzeń 24m^3).

Ramieniem pomiarowym Infinite można mierzyć punktowo lub skaningowo zarówno małe elementy maszynowe jak i elementy o dużych wymiarach jak np. karoserie samochodowe. Za pomocą specjalnych końcówek typu widelkowego można mierzyć bezstykowo średnice różnego rodzaju rur, np. przewodów hydraulicznych.

Do pomiaru całych karoserii zastosowany został system GridLOK, który rozwiązuje sprawę jednoznacznego ustalania położenia ramienia względem mierzonej karoserii tak, że można ramieniem, mimo mniejszego od karoserii zakresu pomiarowego, zmierzyć całą karoserie. System ten składa się z siatki stożków osadzonych w betonowym lub stalowym podłożu, jak to ilustruje rys.13.



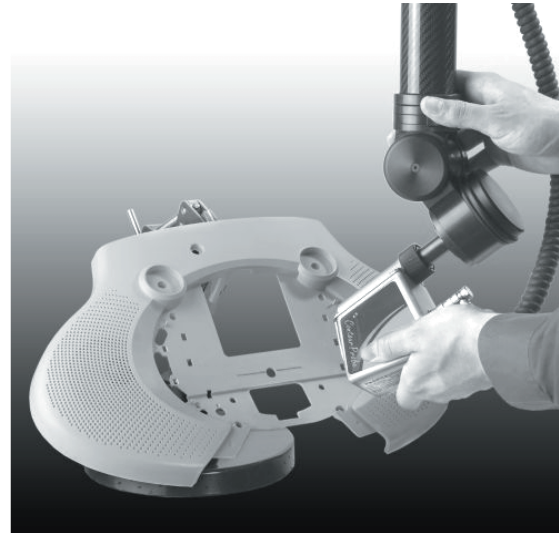
Rys.13. Pomiary karoserii samochodowej przy zastosowaniu systemu GridLOK
Fig. 13. Measurements of car-body with the use of GridLOK system

Rozmieszczenie stożkowych punktów bazowych jest certyfikowane, co umożliwi dokładne ustalenie położenia ramienia pomiarowego w dowolnym miejscu podłoża (opisanej siatką stożków). Odbywa się to poprzez zetknięcie końcówki pomiarowej z trzema kolejnymi stożkami umożliwiając jednoznaczne określenie pozycji ramienia w płaszczyźnie opisanej siatką stożków.

Na dokładność systemu GridLOK składają się dokładność uzyskana podczas certyfikacji położenia stożków oraz dokładność użytego ramienia pomiarowego. Certyfikowanie położenia stożków odbywa się poprzez pomiary laserowe, przez co niedokładność wyznaczenia ich położenia jest pomijalnie mała wobec niedokładności późniejszego pomiaru tych stożków ramieniem pomiarowym. Certyfikacja położenia stożków następuje po zbudowaniu siatki w podłożu a więc sztuka montażu sieci nie wpływa na ostateczną dokładność osiągalną w systemie. Podstawową zaletą GridLOK jest więc możliwość pomiaru w jednym układzie współrzędnych, wspólnym dla całego detalu. Dodatkowo system umożliwia pomiar z użyciem dwóch lub więcej ramion CimCore. Standardowa przestrzeń pomiarowa GridLOK to 4×6 m ale opcjonalnie możliwa jest nawet 60×60 m. Możliwe są więc pomiary elementów o wielkich gabarytach lub małych detali z utrzymaniem wysokiej dokładności. System GridLOK znajduje zastosowanie w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, w budowie maszyn ciężkich i turbin o dowolnym

rozmiarze ale także w wielu w specyficznych przykładach, gdzie ważnym kryterium dobranego systemu pomiarowego stają się gabaryty detalu.

Pomiary mogą być wykonywane punktowo za pomocą końcówek sztywnych jak i głowic impulsowych, np. PowerProbe lub nawet głowicy firmy Renisław [2] oraz skaningowo poprzez zastosowanie bezstykowej głowicy laserowej Contour Probe firmy Perceptron (rys.14).



Rys. 14. Pomiar triangulacyjny głowicą laserową Contour Probe
Fig. 14. Measurements by triangulation laser probe (Contour Probe)

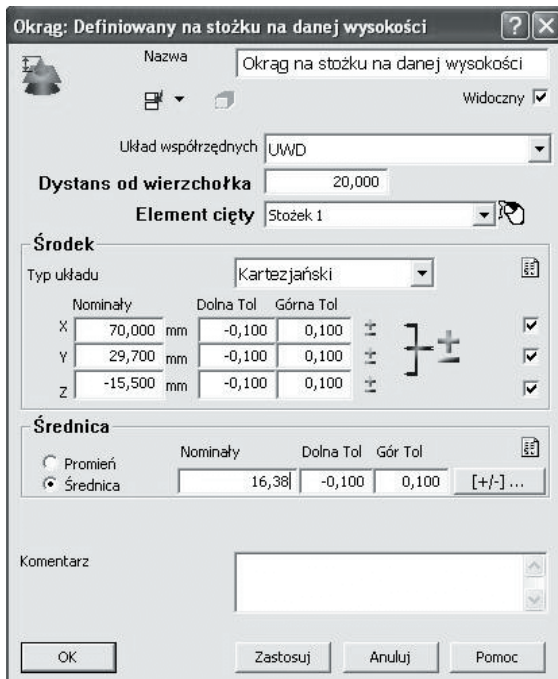
Na jedną wygenerowaną linię skanującą przypada 768 punktów pomiarowych, co przy prędkości skanowania 30 linii w ciągu sekundy uzyskuje się 23040 punktów zebranych z powierzchni mierzonego detalu. Pole widzenia (rys.14) jest trapezem o wysokości będącej zakresem pomiarowym głowicy wynoszącej 104mm oraz o szerokościach podstaw będących szerokościami pola widzenia w skrajnych punktach zakresu pomiarowego i wynoszących odpowiednio 32mm i 71mm. Dokładność skanowania, przy rozdzielczości sygnału 0,005mm, wynosi $30\mu\text{m}$ na poziomie 2s.

Ramionami pomiarowymi CimCore można mierzyć różnego rodzaju rury, np. przewody hydrauliczne. Do tego celu zastosowano specjalne końcówki w postaci widelków, które mierzą wymiary m.in. bezstykowo poprzez generowanie wiązek przez jedno z ramion w kierunku drugiego, którego wiązki w drugim ramieniu odbiera detektor. Obejmowanie pojedynczego przekroju rury powoduje przerwanie sygnału pomiarowego biegnącego z emitera do detektora w końcówce. Jednokrotne objęcie danego przekroju rury powoduje ośmiokrotne zakłócenie biegu wiązki – wybrany przekrój zostaje opisany przez 8 punktów pomiarowych.

Podstawowym **oprogramowaniem** ramion pomiarowych CimCORE jest PowerINSPECT. Oprogramowanie umożliwia (tak jak inne konwencjonalne pakiety do pomiarów na CMM) zmierzenie pełnego zakresu geometrii zarówno w przypadku, kiedy dostępny jest plik CAD jak również kiedy pliku takiego użytkownik nie posiada. PowerINSPECT pracuje w środowisku Windows a dokonane wyniki kontroli detalu są generowane w formie raportu w programie Microsoft Excel (lub w formacie HTML). Rezultaty pomiarów są wyświetlane w czasie rzeczywistym. Stworzone plany pomiarowe są zapamiętywane i mogą być wykorzystywane do kontroli kolejnych detali o tych samych kształtach i wymiarach (np. pochodzących z jednej linii produkcyjnej) bez potrzeby tworzenia osobnych planów kontroli dla pojedynczych elementów.

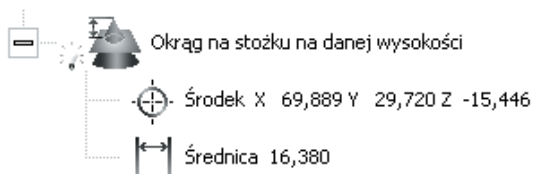
Okno główne programu zawiera paski zadań w postaci ikon i, jeśli został wybrany rysunek CAD, widok CAD-owski detalu. Tak jak w każdym programie pomiarów współrzędnościowych zaczyna się od wyznaczenia układu współrzędnych, poczym

przystępuje się do pomiaru poszczególnych elementów i figur geometrycznych, np. okręgów, wybierając z zestawu ikon poszczególne figury, walca, stożka, sfery, płaszczyzny, itp. Odległości między osiami figur można realizować jako Dystans 2D lub 3D lub tzw. Dystans poosiowy tj. po osiach wybranego układu współrzędnych. Potem mogą być realizowane rzuty, przekroje, itp.



Rys. 15. Okno konstrukcji „okrąg na stożku na zadanej wysokości”.
Fig. 15. Window of circumscribed circle on a cone of a given height

Oprogramowanie zawiera cały szereg oryginalnych rozwiązań jak np. oprogramowanie w celu wyznaczenia okręgu na stożku na danej wysokości w postaci dystansu od wierzchołka (rys.15) lub od podstawy. Okno dialogowe umożliwia wprowadzenie zadanej wysokości w postaci dystansu od wierzchołka stożka, wybór bryły, która ma być cięta, wpisanie nominalnych współrzędnych środka okręgu, który powstanie oraz jego nominalnej średnicy (lub promienia). Wszystkie informacje o okręgu można zobaczyć w polach karty Info, w raporcie pomiarowym lub (jeśli chodzi tylko o podgląd wartości liczbowych najważniejszych parametrów bez szczegółowych informacji) bezpośrednio w planie pomiarowym (rys.16).



Rys.16. Podgląd wyników dla okręgu na stożku w planie pomiarowym
Fig. 16. Snapshot of results for circumscribed circle on cone in surveying plan

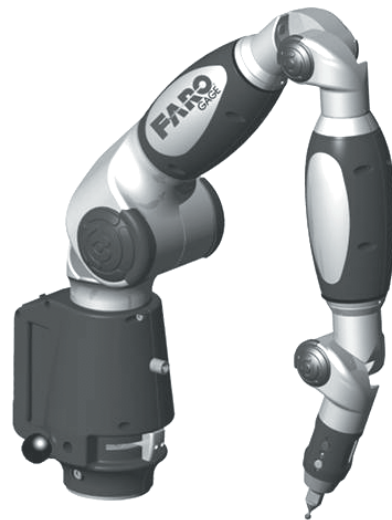
Podobnie można wykonać pomiary walca w wielu przekrojach o zadanych odległościach. Można wyznaczyć odchyłki kształtu i położenia, np. odchyłkę prostokątności osi walca względem płaszczyzny bazowej, równoległości osi walca do płaszczyzny lub tworzącej, a także, jeśli są otwory, wyznaczenie ich współśrodkowości. Program umożliwia przeprowadzenie kontroli powierzchni w wybranych przekrojach. Oprócz ilustracji graficznej w Raporcie z pomiarów przedstawiane są wyniki

liczbowe przeprowadzonych pomiarów i obliczeń, obejmujące również analizę statystyczną wyników.

4.2. Ramiona pomiarowe Faro

Ramiona pomiarowe amerykańskiej firmy FARO [6] oferowane są w pięciu wersjach, o różniących się rozwiązaniach konstrukcyjnych i parametrach dokładnościowych. Obok ramion Gage i Gage Plus, Advantage, Platinum, Titanium oraz ScanArm proponowany jest tzw. Laser Tracker, który bazując na innym rozwiązaniu niż systemy GridLOK lub SpaceLOK służy do rozszerzenia zakresu pomiarowego. Faro oferuje do swoich ramion własne oprogramowanie pomiarowe CAM2.

Ze względu na ograniczoną objętość niniejszego referatu zaprezentowany zostanie jeden z rodzajów ramion pomiarowych FARO, a mianowicie Faro Gage, którego widok przedstawiono na rys.17.

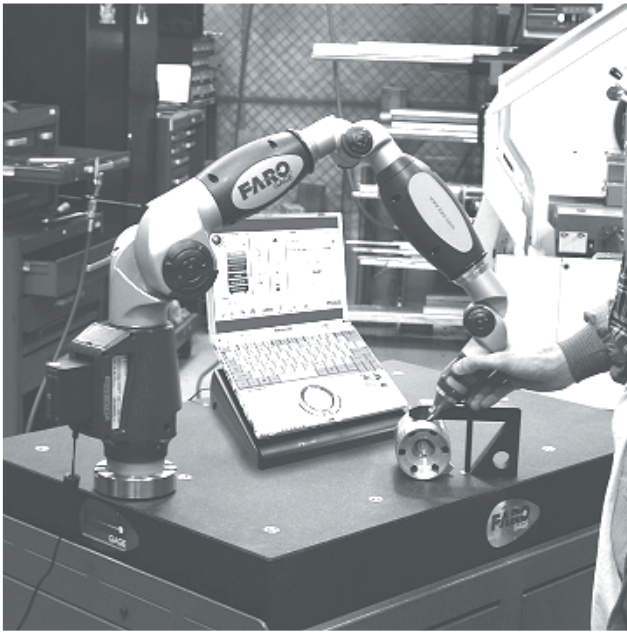


Rys.17. Ramię pomiarowe Faro Gage
Fig. 17. Measuring arm Faro Gage

Ramiona pomiarowe Faro Gage mają zakres pomiarowy 1200mm, a ich graniczny błąd dopuszczalny wg oznaczeń ISO 10360-2 z roku 1995 wynosi $E=10+16L/1000$ (μm) dla opcji standard i dla opcji Faro Gage Plus $E=5+8L/1000$ (μm). Ich stosunkowo nieduży zakres pomiarowy i stosunkowo wysoka dokładność a także niska stosunkowo masa (8kg) predysponują je do zastosowań w pomiarach różnego rodzaju elementów maszynowych, motoryzacyjnych, itp. wykonywanych w warunkach produkcyjnych. Mają one charakter urządzenia przenośnego, dlatego też wyposażone są w dodatkowe zasilanie akumulatorowe wbudowane w podstawę.

Konstrukcja ramion zawiera system przeciwwag, co ułatwia wykonywanie pomiarów nawet jedną ręką. Możliwe jest stosowanie głowic pomiarowych z różnymi rodzajami końcówek – nie tylko kulistych i przedłużaczy oraz głowic impulsowych np. produkcji firmy Renishaw. Mocowanie ramion zawiera trzy opcje; standardową opartą na stopie przekręcającej, na łączeniu magnetycznym oraz pneumatycznym. Ramiona pomiarowe mają wbudowane czujniki temperatury, dlatego pomiary mogą być wykonywane w zakresie temperatury 10-40°C z gradientem 5°C/5min. Dopuszczalne przyspieszenie kątowe wynosi 105 rad/s².

Przykłady zastosowań ilustrują rys. 18 i 19. Rys. 18 pokazuje zastosowanie do pomiaru walcowego elementu maszynowego, przy zamocowaniu ramienia bezpośrednio na płycie, na którym także zamocowano mierzony przedmiot.



Rys.18. Przykład pomiaru elementu maszynowego za pomocą ramienia pomiarowego Faro Gage
Fig. 18. The example of measurements of small parts with the use of measuring arm, Faro Gage

Ramiona Faro Gage mogą być zastosowane bezpośrednio na stole obrabiarki (rys.19). Pomiary mogą wykonywać operatorzy obrabiarek, którzy doskonale znają detal, sposób jego zamocowania. Dzięki temu od razu mają dane pomiarowe.

Dzięki stopie magnetycznej FARO Gage montuje się bezpośrednio np. na stole obrabiarki, a akumulator zapewnia działanie urządzenia do 8-miu godzin bez zasilania zewnętrznego.



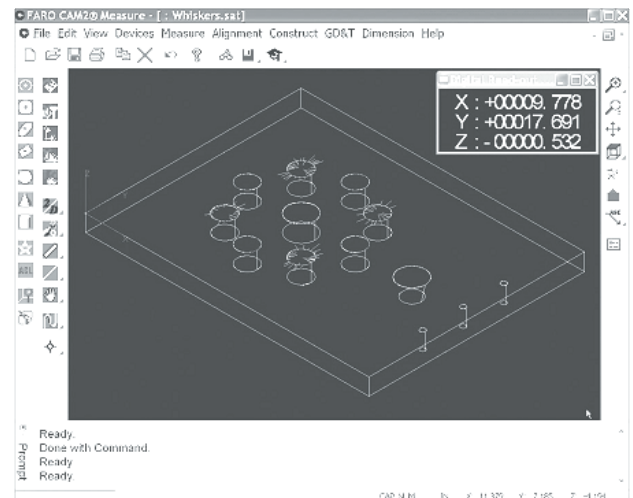
Rys.19. Przykład pomiaru elementu maszynowego bezpośrednio na obrabiarce
Fig. 19. The example of a measurement directly on a machine tool

Pomiary mogą być wykonywane w tym samym zamocowaniu, w którym przedmiot jest obrabiany. Zachowanie baz obróbczych i pomiarowych pozwala na osiągnięcie wyższej dokładności i zmniejszenie czasu operacji obróbka-pomiar.

Oprogramowanie Faro CAM2 obejmuje szereg opcji i tak:

- CAM2 Automativ przeznaczony jest dla przemysłu motoryzacyjnego i operuje nawet na ponad 100MB plikach CAD
- CAM2 Measure (rys.20) pozwala na przeprowadzanie pomiarów dowolnej geometrii (bryły i powierzchnie) pozwalając na porównania z modelem CAD,
- CAM2 SPC Graph pozwala na dokumentowanie graficzne wyników pomiaru i zestawienia liczbowe wyników pomiaru,

- CAM2 SPC Proces pozwala na dokonanie statystycznej analizy wyników jako składnik systemu kontroli jakości.



Rys.20. Ekran główny oprogramowania Faro CAM2 modułu MEASURE
Fig. 20. The main screen of Faro CAM2 software for MEASURE module

W oknie głównym rysowany jest na ekranie element w trakcie pomiaru lub naniesiony model CAD elementu w celu porównania go z wymiarami obiektu mierzonego. Z lewej strony ekranu widoczne są ikony wyboru poszczególnych elementów i figur geometrycznych stanowiących podstawy pomiarów współrzędnościowych. W górnym prawym rogu pokazane są bieżące wartości wyznaczanych współrzędnych.

Ostatnio pojawiła się nowa wersja oprogramowania pod nazwą CAM2 Measure X, która pozwala użytkownikowi na wczytywanie oraz wizualizację nawet bardzo dużych plików z wysoką prędkością. Program ten posiada zwiększoną uniwersalność dzięki wbudowanym zaawansowanym translatorom, które pozwalają na obsługę większej liczby formatów jak np. IGES, VDA, CATIA, Unigraphics, Parasolid, SolidWorks, Solid Edg, Pro-Engineer i Inventor.

W referacie przedstawiono rodzaje urządzeń pomiarowych pracujące w technice pomiarów współrzędnościowych, które mogą być stosowane w otoczeniu produkcji. Ze względu na objętość referatu ograniczono się do przedstawienia wybranych urządzeń jednak takich, które reprezentują wszystkie ich rodzaje; roboty i centra pomiarowe oraz ramiona pomiarowe. W przypadku robotów i centrów pomiarowych pominięto oprogramowania, które są pełniej opisane w rozdziale V podręcznika opracowanego przez autora [2].

5. Literatura

- [1] VDI/VDE 2617 VDI/VDE 2617 Genauigkeit von Koordinatenmessgeräten; Kenngrößen und deren Prüfung, 1986-1993, VDI-Verlag;
- [2] E.Ratajczyk: Współrzędnościowa technika pomiarowa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2005.
- [3] PN-EN ISO 10360-2: 2003. Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS). Badania odbiorcze i okresowe współrzędnościowych maszyn pomiarowych (CMM). Część 2: CMM stosowane do pomiaru wymiarów.
- [4] M. Nocuń: VAST-Navigator – skaning trzeciej generacji. MECHANIK nr 3/2004, s. 140-142.
- [5] Centrum pomiarowe CenterMax. Z izby pomiarowej do hali produkcyjnej. Mechanik nr 3/2002, s.185-188.
- [6] R.Cieślak, M.Ławicki: Faro-szybki pomiar geometrii droga do sukcesu. Mechanik nr 10/2005, s.832-833.