

Współrzędnościowa, bezdotykowa metoda pomiaru położenia i średnicy otworu w warunkach warsztatowych

Piotr Dutka, Maciej Mrowiec

Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała

Streszczenie: Artykuł prezentuje metodę bezdotykowego wyznaczania położenia środka otworu i pomiaru średnicy za pomocą triangulacyjnego czujnika pomiarowego zamontowanego na flanszy robota przemysłowego. Dla opracowania wyników pomiaru zastosowano arkusz kalkulacyjny oraz metodę obliczeniową korzystającą z uogólnionego, zredukowanego gradientu (GRG). Ponadto przedstawiono metodę kalibracji polegającą na wyznaczeniu systematycznego błędu występującego podczas wykrywania krawędzi mierzonego otworu. Zidentyfikowano składowe opóźnienia występujące w torze pomiarowym i ich wpływ na niepewność pomiaru otworu. Metodę zilustrowano przykładem pomiaru otworów wykonanych w odlewie głowicy cylindrów silnika spalinowego.

Słowa kluczowe: wielopunktowy pomiar współrzędnościowy, niepewność pomiaru, metoda uogólnionego, zredukowanego gradientu (GRG)

1. Wprowadzenie

Przykłady zaczerpnięte z literatury [6, 7] pokazują zastosowanie robota przemysłowego jako urządzenia pozycjonującego do prowadzenia narzędzia pomiarowego, jakim jest skaner 3D. Skaner ma za zadanie zebrać dane o geometrii mierzonego obiektu w postaci chmury punktów, złożonej z setek a nawet tysięcy punktów pomiarowych. Liczba punktów uzależniona jest od stopnia skomplikowania geometrii przedmiotu oraz od wymaganej dokładności odwzorowania przedmiotu. Analizy tych danych dokonuje się w programie CAD stosując inżynierię odwrotną, w celu przetworzenia współrzędnych punktów na model 3D obiektu.

Podstawową zaletą zastosowania robota w pomiarach, obok możliwości ich automatyzacji w warunkach warsztatowych, jest powtarzalność parametrów ruchu wykonywanego podczas pozycjonowania oraz możliwość pomiaru przedmiotów w różnych obszarach przestrzeni roboczej manipulatora. Pomiaru wykonywane są w cyklu automatycznym, co pozwala na wyeliminowanie błędów związanego z czynnikiem ludzkim. Zastosowanie do pomiarów czujnika laserowego przyczynia się do zwiększenia bezpieczeństwa przez ograniczenie ryzyka kolizji ramienia robota z nieprawidłowo ustawionym przedmiotem mierzonym.

W celu przetestowania manipulatora jako robota inspekcyjnego, przeprowadzono szereg doświadczeń na stanowisku

w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji ATH. Zainstalowano i sparаметryzowano w tym celu na flanszy robota triangulacyjny czujnik pomiarowy (rys. 1), mierzący odległość do obiektów na podstawie metody triangulacji optycznej. Zastosowany czujnik pomiarowy zwraca informację o odległości między czujnikiem i mierzonym wyrobem. Aby zebrać większą liczbę punktów pomiarowych, należy powtarzać pomiar dla różnych punktów krawędzi otworu. Następnie na podstawie otrzymanych punktów, stosując równania geometrii analitycznej, można określić wymiary elementów zastępczych, w tym przypadku średnicy otworu i położenia jego środka.

Za wyborem trybu pracy, w którym robot przemieszcza narzędzie pomiarowe, a mierzony przedmiot jest nieruchomy, przemawia podstawowa zaleta – czujnik pomiarowy jest lekki (ok. 0,47 kg wraz z uchwytem), dzięki niewielkim wymiarom może być mocowany wspólnie np. z chwytem i może być bez problemu pozycjonowany w miejscach inspekcji. Dzięki takiemu rozwiązaniu można poddawać weryfikacji przedmioty o znacznej masie. Wybór rozwiązania z nieruchomym narzędziem skutkowałby brakiem możliwości wykonania pomiarów detali, których masa przekracza obciążenie nominalne robota. Dodatkowym minusem dla rozwiązania z nieruchomym narzędziem byłby problem występujący podczas mierzenia przedmiotów o różnych masach. Wtedy pojawiałby się niekorzystny czynnik związany ze zmieniającą się dokładnością i powtarzalnością pozycjonowania ramienia robota w zależności od masy mierzonego przedmiotu.

Najistotniejszym elementem podczas sprzężenia z robotem jest odpowiednia parametryzacja narzędzia. Na parametryzację narzędzia składa się wprowadzenie wymiarów geometrycznych, masy narzędzia i osiowych momentów bezwładności oraz kalibracja punktu TCP (ang. *Tool Center Point*). Właściwe wyznaczenie TCP narzędzia jest niezbędne do wygodnego określenia bazy dla przedmiotu obrabianego i w dalszej kolejności do efektywnego programowania zadań wykonywanych przez robota. W pracy [2] autor przedstawił dedykowane oprzyrządowanie oraz kolejne kroki niezbędne do wyznaczenia wirtualnego punktu

Autor korespondujący:

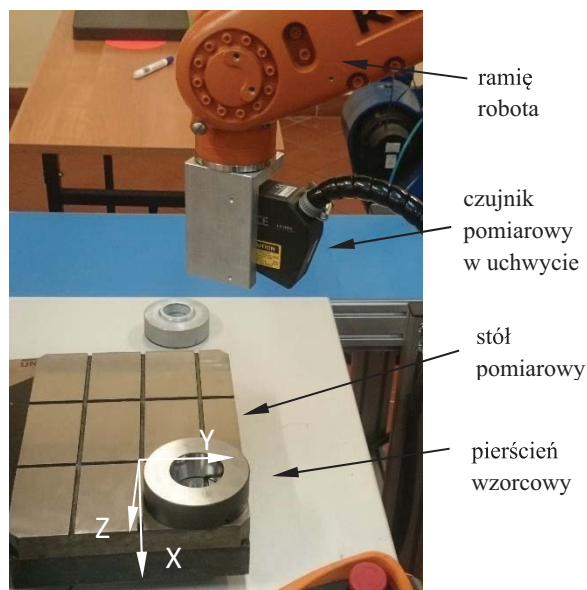
Piotr Dutka, wolfow@poczta.onet.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 26.05.2017 r., przyjęty do druku 30.06.2017 r.



Zezwala się na korzystanie z artykułu na warunkach licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0



Rys. 1. Widok stanowiska pomiarowego do kalibracji czujnika pomiarowego
Fig. 1. View of measurement stand for calibration purpose of distance sensor

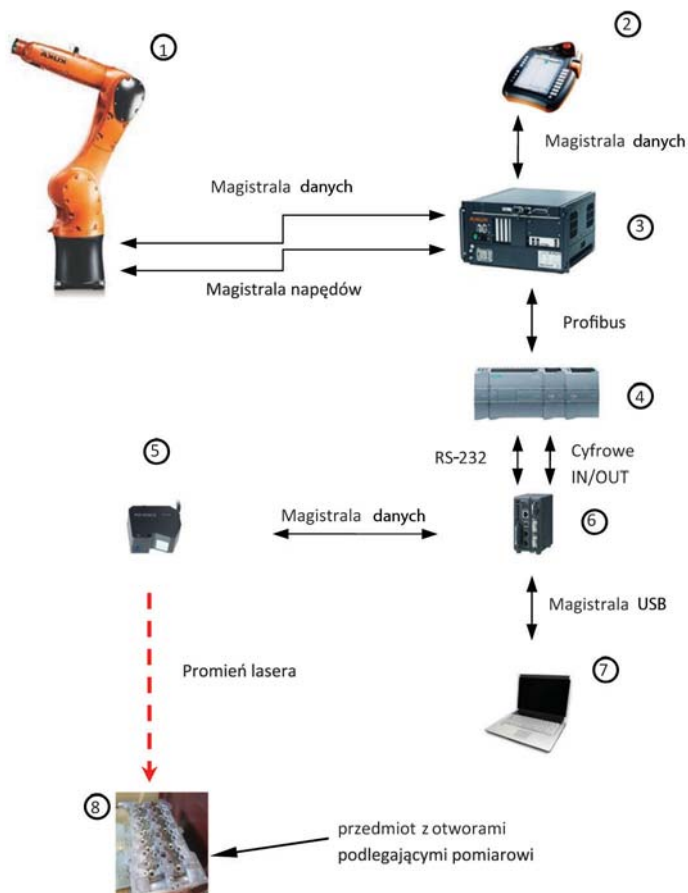
centralnego narzędzia TCP dla triangulacyjnego czujnika pomiarowego zintegrowanego z robotem przemysłowym.

2. Stanowisko badawcze

Stanowisko badawcze (rys. 2) oparto na nowoczesnym, sześciosiowym manipulatorze przemysłowym KR 6 R900 AGILUS (1) z kompaktowym kontrolerem KR C4 (3) oraz dotykowym urządzeniem typu smartPAD (2), umożliwiającym programowanie ruchów oraz obsługę robota. Urządzeniem pomiarowym jest optyczny, triangulacyjny czujnik laserowy LK-H152 (5) obsługiwany przez kontroler LK-G5001P (6). Dostęp do parametrycznej konfiguracji odczytów lasera oraz wizualizację i zarządzanie wynikami pomiarów umożliwia pakiet LK-Navigator-2, zainstalowany na PC (7). Standardowy kontroler KR-C4 uzupełnia kompaktowy sterownik PLC SIMATIC S7-1200 (4), wyposażony dodatkowo w opcjonalne moduły komunikacyjne Profibus i RS-232. Program zapisany w sterowniku PLC zapewnia synchronizację między programem pozycjonującym robota a zapisem danych pochodzących z kontrolera LK-G5001P. Element (8) stanowi mierzony przedmiot.

Zastosowany na stanowisku badawczym laserowy czujnik odległości mierzy dystans do badanego przedmiotu metodą triangulacji [1, 2]. Triangulacja jest jedną z najbardziej precyzyjnych metod pomiaru optycznego. Źródłem światła jest półprzewodnikowy laser o długości fali 650 nm (barwa czerwona) i mocy promieniowania wynoszącej 0,95 mW. Odległość referencyjna czujnika wynosi 150 mm, a zakres pomiarowy ± 40 mm. Wewnątrz laserowego czujnika pomiarowego zastosowano algorytmy odpowiadające za precyzyjny pomiar. Najważniejsze z zastosowanych algorytmów to: CPC (ang. *Center and Peak Composition*), ABLE (ang. *Active Balanced Laser Control Engine*), RPD (ang. *Real Peak Detect*).

Główne komponenty triangulacyjnego czujnika odległości to (rys. 3): źródło światła (laser półprzewodnikowy), układ optyczny i detektor (matryca RS – CMOS, tzw. fotolinijka). Zasada działania laserowego czujnika triangulacyjnego jest następująca. Promień lasera emitowany jest z diody półprzewodnikowej (1), przez układ optyczny (2) pada na mierzony obiekt (6), odbija się od niego i trafia przez kolejny zespół optyczny (3) na odbiornik w postaci matrycy RS-CMOS (5). Za pomocą metody triangulacji, znając odległości podzespołów wewnątrz



Rys. 2. Schemat komunikacji urządzeń wchodzących w skład stanowiska doświadczalnego

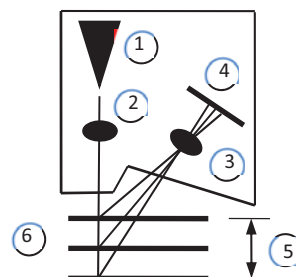
Fig.2. Communications between devices of measurement stand

główicy laserowej, tj. diody LED, matrycy RS-CMOS i punktu w którym odbita wiązka laserowa trafia na matrycę RS-CMOS obliczana jest odległość od przedmiotu, od którego odbił się promień laserowy.

3. Strategia realizacji pomiarów

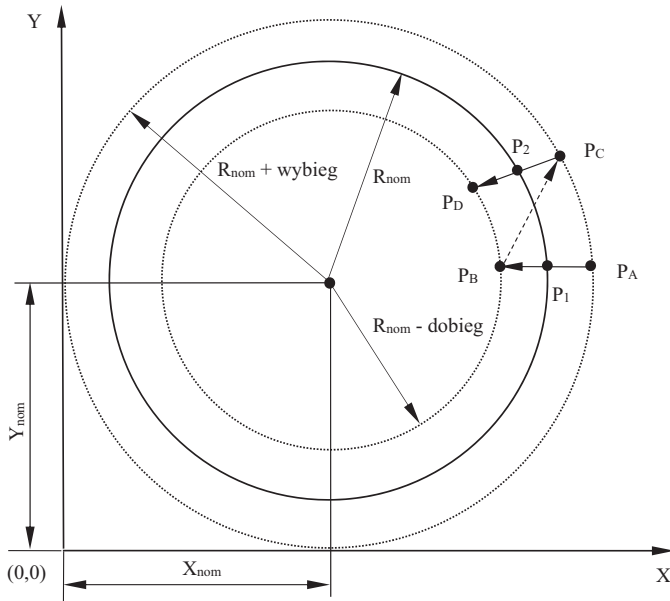
Dla celów kalibracji czujnika pomiarowego użyto pierścienia wzorcowego o średnicy nominalnej $50^{+2\text{mm}}$ deklarowanej dla temperatury 20 °C. W trakcie kalibracji wyznaczane są: przesunięcie D_i związane z opóźnieniem wywołania odczytu, oraz przesunięcia rzeczywistego środka otworu pierścienia wzorcowego, w stosunku do położenia teoretycznego, wynikającego z przyjętego układu współrzędnych, dla osi X i Y: e_{cx} i e_{cy} (rys. 8).

Pomiar położenia i średnicy otworu był wykonywany metodą wielopunktową. Ramię robota wyposażone w czujnik pomiarowy ustawiono równolegle do osi pierścienia (prostopadle do ułożenia badanego przedmiotu) tak, aby plamka lasera znajdowała się w punkcie referencyjnym (150 mm od czoła czujnika



Rys. 3. Widok komponentów znajdujących się wewnątrz laserowego czujnika pomiarowego

Fig. 3. View of components inside triangulation distance sensor



Rys. 4. Sposób akwizycji kolejnych punktów pomiarowych dla mierzonej średnicy

Fig. 4. Principle of acquisition of measured points for measuring diameter

pomiarowego). Odpowiada to zerowej wartości osi Z w układzie współrzędnych TCP narzędzia. Dodatkowa kontrola odległości była możliwa w aplikacji LK Navigator 2 zainstalowanej na PC.

Kolejne punkty pomiarowe P_i zostały wyznaczone zgodnie z następującym algorytmem (rys. 4). Ustawiono ramię robota w taki sposób, aby promień lasera rzutował płamkę na powierzchni pierścienia wzorcowego w punkcie P_A (stanowiącym średnicę wirtualnego, zewnętrznego okręgu o promieniu $R_{nom} + wybieg$). Następnie ramię robota w ruchu liniowym przebyło drogę do punktu P_B (leżącym na wewnętrznym, wirtualnym okręgu o promieniu $R_{nom} - dobieg$). Podczas ruchu wzdłuż odcinka $P_A P_B$ promień lasera przecina krawędź otworu (punkt P_1). Zdarzenie to jest rejestrowane przez oprogramowanie instrukcji *INTERRUPT 14*. Zgodnie z zaprogramowaną procedurą, współrzędne punktu P_1 zapisywane są do pliku ASCII. Zdefiniowane przerwanie aktywuje się, gdy wartość logiczna, informująca o położeniu czujnika pomiarowego w zakresie pomiarowym, zmieni swą wartość logiczną z *TRUE* na *FALSE*. Dzięki temu jednostronnemu działaniu eliminuje się przypadkowe wywołanie komendy, gdy robot wykonuje ruchy powrotne do zewnętrznego wirtualnego okręgu (o promieniu $R_{nom} + wybieg$). Takie zdarzenie miałyby miejsce dla odcinków, np. $P_B P_C$, gdy promień lasera wchodzi w zakres pomiarowy trafiając z otworu w materiał pierścienia. Zmienna Z dla kolejnych ruchów nie była modyfikowana i podczas całego pomiaru oscylowała wokół 0. Ustawiono prędkość liniową pokonywania odcinka pomiarowego $P_A P_B$ wynoszącą 0,001 m/s.

Ruchy do kolejnych punktów (P_C , P_D itd.) odbywały się w pętli iteracyjnej *for* dla pozycji obliczonych dla zależności (1), (2), (3), (4):

$$X_A = X_{nom} + (R_{nom} + wybieg) \cdot \cos(\gamma) \quad (1)$$

$$Y_A = Y_{nom} + (R_{nom} + wybieg) \cdot \sin(\gamma) \quad (2)$$

$$X_B = X_{nom} + (R_{nom} - dobieg) \cdot \cos(\gamma) \quad (3)$$

$$Y_B = Y_{nom} + (R_{nom} - dobieg) \cdot \sin(\gamma) \quad (4)$$

gdzie: X_A , X_B – współrzędne X punktów P_A , P_B ; Y_A , Y_B – współrzędne Y punktów P_A , P_B ; X_{nom} – nominalne położenie środka okręgu na osi X ; Y_{nom} – nominalne położenie środka okręgu na osi Y ; R_{nom} – wartość nominalna promienia badanego okręgu; *wybieg* – wartość dystansu dodana do R_{nom} ; *dobieg* – wartość dystansu odjęta od R_{nom} ; γ – aktualny kąt przemieszczenia w płaszczyźnie XY .

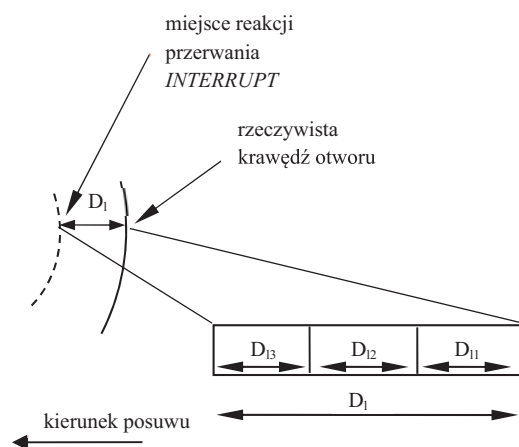
Część algorytmu sterującego pracą robota, odpowiedzialna za wykrycie krawędzi otworu, zapisana w standardzie KUKA KRL wygląda następująco:

```
FOR i=0 TO n-1 STEP 1
   $\gamma = i \cdot 360 / n$  ; aktualny kąt przemieszczenia
  PA.x = Xnom + (Rnom + wybieg) * cos( $\gamma$ )
  PA.y = Ynom + (Rnom + wybieg) * sin( $\gamma$ )
  $VEL.CP = 0.01 ; ustawienie prędkości przejazdowej
  [m/s]
  LIN PA ; ruch liniowy do punktu PA
  PB.x = Xnom + (Rnom - dobieg) * cos( $\gamma$ )
  PB.y = Ynom + (Rnom - dobieg) * sin( $\gamma$ )
  WAIT sec 1 ; czas relaksacji manipulatora [1]
  INTERRUPT ON 14 ; aktywowanie poszukiwania
  wystąpienia sygnału logicznego aktywującego przerwanie
  $VEL.CP = 0.001 ; ustawienie prędkości pomiarowej
  [m/s]
  LIN PB ; ruch liniowy do punktu PB
  INTERRUPT OFF 14
ENDFOR
```

4. Przyczyny wystąpienia opóźnienia w analizowanym sygnale

Zdarzenie *INTERRUPT* zachodzące w chwili napotkania krawędzi otworu podczas ruchu na przykładowym odcinku $P_A P_B$ następuje z pewną zwłoką czasową. Na wielkość czasu opóźnienia i związanym z tym przesunięciem D_i w rejestracji zdarzenia mają wpływ w kolejności ich wystąpienia następujące czynniki (rys. 5):

– przesunięcie środka plamki lasera w stosunku do krawędzi otworu w chwili utraty zakresu pomiarowego. Promień lasera rzutuje na mierzoną powierzchnię plamkę światła o średnicy 0,12 mm dla odległości referencyjnej wynoszącej 150 mm.



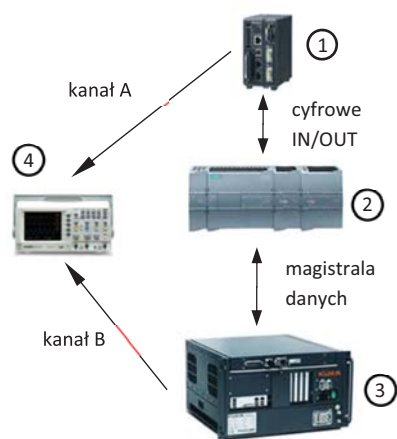
Rys. 5. Składowe przesunięcia D_i : D_{11} – przesunięcie spowodowane wielkością plamki, D_{12} – przesunięcie spowodowane opóźnieniem przesłania informacji siecią Profibus, D_{13} – przesunięcie spowodowane zwłoką wykonania polecenia przez kontroler robota

Fig. 5. Components of signal time lag D_i : D_{11} – component caused by outer beam diameter size, D_{12} – component caused by a delay in sending information by Profibus, D_{13} – component caused by executing a program by robot controller

Plamka porusza się po powierzchni pierścienia, następnie dociera do krawędzi otworu. Z punktu widzenia opisanej metody pomiarowej istotny jest ten fragment plamki lasera (jego środek lub koniec), w którym urządzenie znajduje się w zakresie pomiarowym, gdyż wiąże się to ze zwłoką czasową wystąpienia sygnału logicznego na wyjściu kontrolera LK-G5001P.

- zwłoka wynikająca z przesyłania sygnału pomiarowego przez ciąg komunikacyjny kontroler LK-G5001P → Sterownik PLC → kontroler KR C4. Sygnał logiczny informujący o wykryciu krawędzi otworu, zmierzony przez czujnik pomiarowy, jest przesyłany z kontrolera czujnika na wejście cyfrowe sterownika PLC. Następnie przez sieć Profibus zostaje wysłany do kontrolera robota. Sumaryczna droga przebycia sygnału zajmuje pewien czas.
- czas związany z wykonaniem polecenia przez kontroler robota. Każda instrukcja realizowana przez kontroler KR C4 wymaga określonego czasu wykonania. Tak samo dzieje się po otrzymaniu sygnału logicznego o wykryciu krawędzi otworu i reakcji kontrolera w postaci wykonania procedury *INTERRUPT*.

Zmierzono za pomocą dwukanałowego oscyloskopu cyfrowego OWON XDS3102A łączny czas przesunięcia D_b i D_a . Kanał A oscyloskopu analizował sygnał opuszczający wyjście cyfrowe kontrolera czujnika pomiarowego (Syg_A). Kanał B mierzył sygnał (Syg_B) z wyjścia cyfrowego robota (rys. 6).

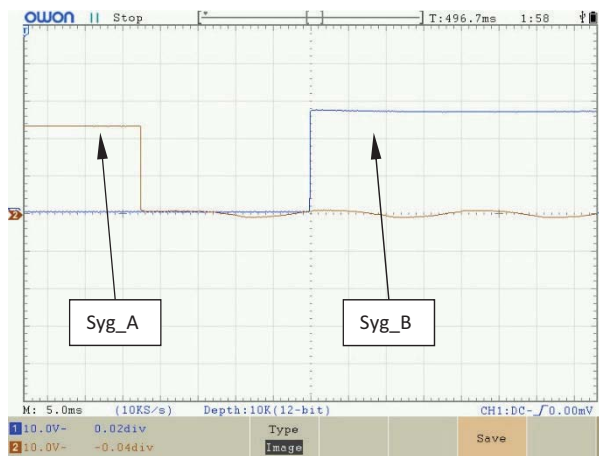


Rys. 6. Schemat połączenia oscyloskopu. Elementy składowe: 1 – kontroler LK-G5001P czujnika pomiarowego, 2 – sterownik PLC SIMATIC S7-1200, 3 – kontroler KR C4 robota przemysłowego, 4 – oscyloskop OWON XDS3102A
Fig. 6. Oscilloscope connection. 1 – LK-G5001P – controller of distance sensor, 2 – PLC SIMATIC S7-1200, 3 – KR C4 controller of industrial robot, 4 – OWON XDS3102A oscilloscope

Sygnał z kanału B występuje z opóźnieniem związanym z przyczynami opóźnienia podanymi w punktach 2 i 3. Zmierzone przesunięcie między Syg_A i Syg_B (rys. 7) oscyloowało w zakresie 23,5 ms, co uwzględniono na etapie określania niepewności pomiarów jako składowa budżetu niepewności. Najmniejsza wartość opóźnienia wynosiła 18 ms, największa 29 ms.

Znając prędkość liniową ruchu robota na odcinku $\overline{P_A P_B}$ wynoszącą 0,001 m/s i zmierzoną zwłokę czasową sygnału wynoszącą 23,5 ms, wyznaczono dystans (suma odległości D_b i D_a) jaki w tym czasie przebył czujnik pomiarowy wynoszący 0,0235 mm.

Opóźnienie w rejestracji przerwania *INTERRUPT* ma niekorzystny wpływ na dokładność pomiarów realizowanych na stanowisku. Współrzędne lokalizujące krawędź otworu pobierane są z toru pomiarowego osi robota, podczas wykrycia przerwania *INTERRUPT*. Przerwanie aktywuje się w momencie dotarcia i przetworzenia informacji o zmianie stanu logicznego z TRUE na FALSE. Ponieważ ramię robota cały czas wyko-



Rys. 7. Widok ekranu oscyloskopu obrazujący przesunięcie czasowe pomiędzy sygnałami Syg_A i Syg_B

Fig. 7. View of oscilloscope screen showing time lag between signals Syg_A and Syg_B

nuje ruch, w związku z opóźnieniem sygnału ramię przebędzie jeszcze pewien odcinek drogi i zostanie zapamiętana współrzędna punktu przesuniętego o odległość D_i w stosunku do krawędzi otworu.

Występowanie opisanego opóźnienia, zmierzonego pomiędzy wybranymi punktami w analizowanego torze sygnału, bezpośrednio wpływa na czas reakcji zdarzenia przerwania *INTERRUPT*. Znając wartość przesunięcia D_i należy wprowadzić ją jako poprawkę do algorytmu wyznaczającego średnicę i położenie środka otworu, kompensując negatywne skutki opisanego zjawiska.

5. Wyniki badań

Oprogramowanie odpowiedniej procedury w KRL umożliwiło zapis wyznaczonych punktów konturu do pliku ASCII. Wartości uzyskanych współrzędnych w poszczególnych punktach pochodzą z układów pomiarowych robota. Zwracane są przez zmienną systemową $\$POS_INT$ (będącą strukturą danych przechowujących informację o punkcie, przechwyconą podczas wystąpienia ostatniego aktywnego przerwania). Do tej zmiennej kontroler robota przepisuje dane w momencie wykrycia warunku logicznego aktywującego przerwanie.

Bezpośrednim zapisem strumienia danych do pliku tekstowego zajmuje się funkcja systemowa języka KUKA KRL – *curite*. Odpowiednie sformatowanie zapisywanych danych liczbowych ułatwia późniejsze importowanie pliku np. w arkuszu MS Excel.

Z pomiarów otrzymano n punktów zawierających informację o współrzędnych X i Y dla zarysu mierzonego otworu. W celu porównania ich z wartościami teoretycznymi, obliczono kolejne punkty X_i i Y_i wg zależności (5,6):

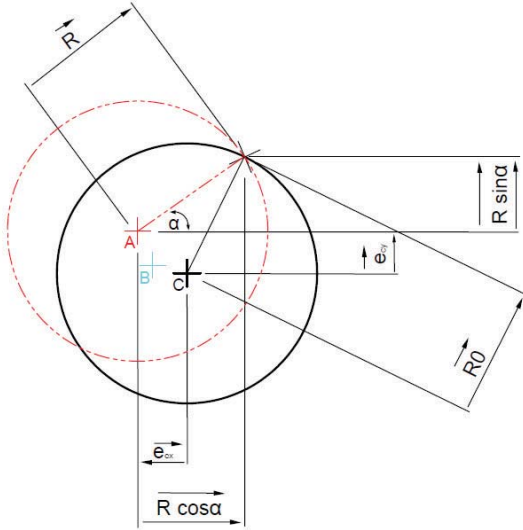
$$X_i = X_{nom} + R_0 \cdot \cos(\gamma) \quad (5)$$

$$Y_i = Y_{nom} + R_0 \cdot \sin(\gamma) \quad (6)$$

gdzie: X_i – kolejny obliczony i -ty punkt względem osi X , Y_i – kolejny obliczony i -ty punkt względem osi Y , R_0 – wartość promienia z uwzględnieniem przesunięcia D_p , γ – aktualny kąt przemieszczenia w płaszczyźnie XY .

5.1. Wyznaczenie położenia środka otworu

Skorzystano z możliwości arkusza kalkulacyjnego MS Excel 2013. Technika makr umożliwia automatyzację przeprowadzenia obliczeń. Dodatek Solver z pakietu MS Excel oferuje do dyspozycji użytkownika trzy metody optymalizacji [8]:



Rys. 8. Graficzna zależność między wektorami: \vec{R} , \vec{R}_0 , \vec{e}_{cx} , \vec{e}_{cy} dla średnicy nominalnej; A – rzeczywisty środek, B – środek założony (bez uwzględnienia błędu), C – środek z uwzględnieniem błędu TCP i przesunięcia bazy

Fig. 8. Dependence between \vec{R} , \vec{R}_0 , \vec{e}_{cx} , \vec{e}_{cy} vectors for nominal hole diameter, A – real hole center, B – hole center assumed without measurement error, C – hole center assumed with TCP error and base displacement error

- metoda Simplex LP – metoda odpowiednia dla zagadnień programowania liniowego. Metoda może być zastosowana, gdy wszystkie równania (zarówno funkcja celu jak i warunki ograniczające) są liniowe. Jeśli funkcja celu wraz z ograniczeniami ma rozwiązanie, ta metoda zawsze zwróci rozwiązanie optymalne globalnie.
- metoda ewolucyjna – stosuje się, jeśli jakkolwiek z funkcji jest nieciągła lub niegładka. Tego rodzaju funkcje powodują trudności podczas rozwiązywania zadań optymalizacji. Przykładem funkcji nieciągłych są funkcje MS Excel typu: MIN, MAX lub ABS. Przykłady dla funkcji niegładkich to: „mniejsze niż”, „równe”, „zliczanie”. Metoda używa algorytmów ewolucyjnych. Metoda ewolucyjna często potrafi znaleźć jedynie „zadowalające” rozwiązanie, które nie jest rozwiązaniem optymalnym w sensie znalezienia ekstremum lokalnego bądź globalnego.
- metoda nieliniowa GRG – powinna być użyta, jeśli jakkolwiek funkcja (celu bądź funkcje ograniczające) jest nieliniowa lub gładka. Twórcami algorytmu GRG są Lasdon, Fox i Ratner. Metoda GRG używa algorytmu gradientu sprzężonego, będącego rozwinięciem metody najszybszego spadku [9] i najlepiej nadaje się do rozwiązywania wcześniej przytoczonych funkcji. Metoda może być również użyta do rozwiązywania problemów liniowych, ale czas obliczeń jest dłuższy i jest mniej wydajna niż metoda Simplex LP. Dla funkcji wypukłych metoda wyszukuje ekstremum spełniające warunki Kuhn’a – Tucker’a, położone najbliżej zmiennych wyznaczających punkt początkowy poszukiwań. Ogólną regułą jest fakt, iż znalezienie ekstremum globalnego wymaga od użytkownika ogólnej wiedzy dotyczącej rozwiązywanego problemu. Dzięki doświadczeniu i wiedzy, użytkownik może podać wartości początkowe zmiennych decyzyjnych leżące relatywnie „blisko” obszaru występowania ekstremum globalnego. Dla funkcji niewypukłych możliwe jest, że metoda wyszuka ekstremum lokalne. Aby zwiększyć szansę odnalezienia rozwiązania globalnego, możliwe jest automatyczne poprawianie rozwiązania poprzez wybranie opcji poszukiwania „rozpocznij z wielu punktów”. Wówczas algorytm w sposób losowy wyznacza wartości początkowe wielu punktów startowych położonych w różnych miejscach przestrzeni poszukiwań (maksymalnie 200 punktów). Wybranie tej opcji może poprawić wynik działania algorytmu, gdyż start z wielu punktów może przyczynić się do znalezienia ekstremum globalnego.

Założenia początkowe do przeprowadzonych obliczeń:

- D_m – dla celów kalibracji czujnika pomiarowego wielkość przyjmuje wartość stałą równą średnicy pierścienia wzorcowego wynoszącą 50,002 mm,
- D_i – przesunięcie z wywołaniem odczytu, stanowiące błąd systematyczny o rozkładzie równomiernym,
- e_{cx} – przesunięcie w osi X względem X_{nom} (zmienna poszukiwana); przesunięcie jest wynikiem błędu spowodowanego niedokładnym wyznaczeniem punktu TCP, błędem związanym z wyznaczeniem układu współrzędnych, niedokładnym ułożeniem przedmiotu,
- e_{cy} – przesunięcie w osi Y względem Y_{nom} (zmienna poszukiwana),
- $R_0 = \left(\frac{D_m}{2} - D_i \right)$ – wartość promienia z uwzględnieniem przesunięcia D_i .

Równanie uwzględniające zależności z rysunku 8 w postaci wektorowej (7):

$$\vec{e}_{cx} + \overrightarrow{R \cdot \cos(\alpha)} + \vec{e}_{cy} + \overrightarrow{R \cdot \sin(\alpha)} = \vec{R}_0 \quad (7)$$

Konwersja zapisu z postaci wektorowej (7) do postaci skalarnej (8):

$$\left(e_{cx} + |R \cdot \cos(\alpha)| \right)^2 + \left(e_{cy} + |R \cdot \sin(\alpha)| \right)^2 = |R_0|^2 \quad (8)$$

Po przekształceniach równania (8) otrzymujemy postać ogólną równania kwadratowego (9):

$$R^2 + R \cdot (2e_{cx} \cdot \cos(\alpha) + 2e_{cy} \cdot \sin(\alpha)) + e_{cx}^2 + e_{cy}^2 - R_0^2 = 0 \quad (9)$$

Kolejne współczynniki a , b , c dla stworzonego równania kwadratowego (9) mają postać (10), (11), (12):

$$a = 1 \quad (10)$$

$$b = 2 \cdot e_{cx} \cdot \cos(\alpha) + 2 \cdot e_{cy} \cdot \sin(\alpha) \quad (11)$$

$$c = e_{cx}^2 + e_{cy}^2 - R_0^2 \quad (12)$$

Pierwiastkiem rzeczywistym z równania kwadratowego (10) jest wartość promienia R (13):

$$R = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4a \cdot c}}{2a} \quad (13)$$

Obliczony promień otworu dla kolejnych współrzędnych X_i , Y_i wyraża równanie (14):

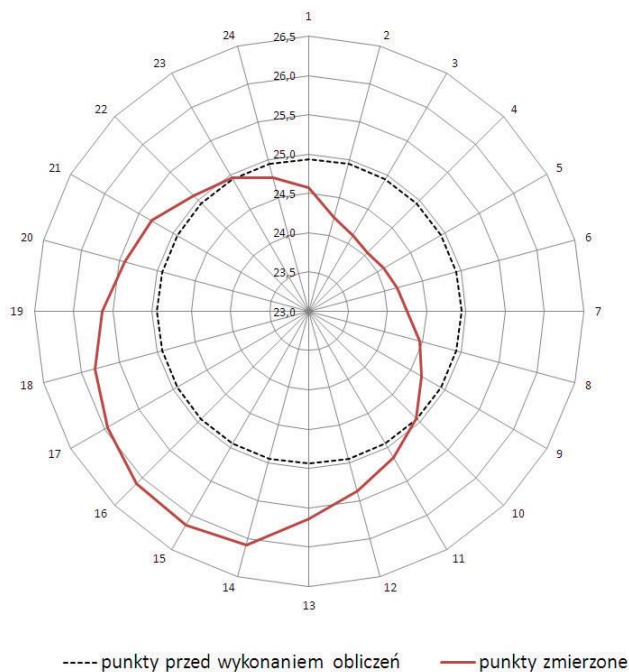
$$R_{obl} = \sqrt{(X_i - X_{nom})^2 + (Y_i - Y_{nom})^2} \quad (14)$$

Funkcja celu dla zagadnienia przyjmuje postać (15). Jest to suma różnic kwadratów dla n punktów pomiarowych między promieniem będącym pierwiastkiem z równania (9) a promieniem obliczonym z zależności (14):

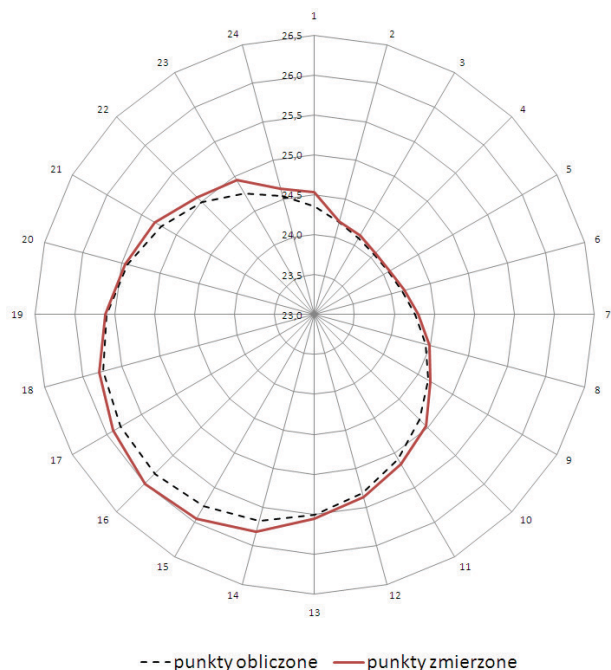
$$S = \sum_{i=1}^n (R - R_{obl})^2 \rightarrow \min \quad (15)$$

Minimalizowano wartość utworzonej sumy S (15) przez zmianę wartości parametrów: e_{cx} , e_{cy} . Do obliczeń zastosowano opisaną wcześniej metodę „nieliniowa GRG” dodatku Solver z pakietu MS Excel [8], która jest najbardziej odpowiednia do tego typu zagadnienia. Użyto kryterium najmniejszych kwadratów, aby jak najlepiej dopasować punkty teoretyczne do otrzymanych wyników z pomiarów i w ten sposób obliczyć rzeczywiste odchylenie od środka okręgu nominalnego e_{cx} i e_{cy} .

Dla wartości początkowych $e_{cx} = 0$, $e_{cy} = 0$ ilustrację wzajemnego położenia wartości promienia zmierzonego i obliczonego przedstawia wykres radarowy (rys. 9). Linia ciągłą zaznaczono kolejne, badane punkty rzeczywistego otworu w pierścieniu wzorcowym. Linia kreskowana odpowiada punktom okręgu przed wykonaniem obliczeń.



Rys. 9. Wygląd krzywych dla danych początkowych przed wykonaniem algorytmu metodą GRG
Fig. 9. Curves shows initial data before execution of GRG method



Rys. 10. Wygląd krzywych po wykonaniu obliczeń metodą GRG
Fig. 10. Curves shows data after execution of GRG method

Ostatecznie, dla prezentowanego przykładu, uzyskano wartość przesunięcia w osi X względem X_{nom} wynoszącą $e_{cx} = 0,250$. Przesunięcie w osi Y względem Y_{nom} wynosi $e_{cy} = -0,093$. Graficzny wynik prezentuje wykres (rys. 10).

5.2. Weryfikacja obliczeń

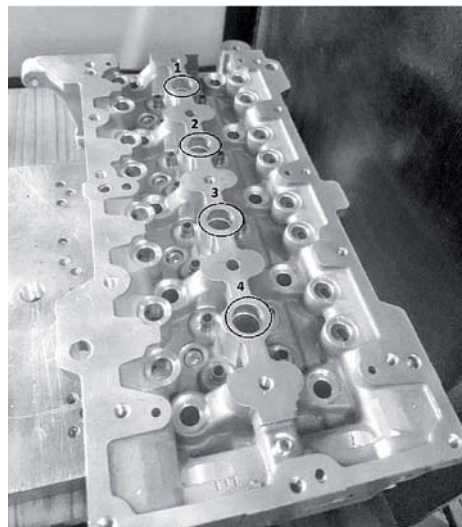
Średni wynik szacowania średnicy otworu wykonanego w przedmiocie, uzyskany metodą nieliniową GRG wyniósł 50,0045 mm przy niepewności pomiarowej rozszerzonej na poziomie 0,0048 mm dla współczynnika rozszerzenia k wynoszącego 3.

W celu weryfikacji wyników uzyskanych metodą nieliniową GRG, wykonano dodatkowe obliczenia. Do wyznaczenia położenia środka okręgu i jego promienia zastosowano wzór stosowany w geometrii analitycznej wymagający znajomości współrzędnych trzech punktów leżących na tym okręgu [10]. Obliczenia promienia alternatywnym sposobem dały wyniki oscylujące wokół wartości 50,0065 mm.

Zaletami metody weryfikującej jest jej prostota i możliwość stosowania bez konieczności skomplikowanych obliczeń. Niestety metoda nie daje możliwość odrzucenia błędnie zmierzonych punktów pomiarowych.

5.3. Pomiar otworów w głowicy silnika spalinyowego

Opisaną metodę zastosowano do pomiaru rzeczywistych wyrobów wytwarzanych przez przemysł maszynowy sektora motoryzacyjnego. W pracy [11] przeprowadzono pomiar rzeczywistego wyrobu będącego obrobionym, aluminiowym odlewem głowicy cylindrów czterocylindrowego silnika spalinyowego. Mierzone otwory (1-4) stanowią gniazda montażu świec żarowych (rys. 11).



Rys. 11. Wygląd wyrobu z zaznaczonymi otworami podlegającymi pomiarowi
Fig. 11. View of engine cylinder head with marked holes

W tabeli 1 przedstawiono wyniki przeprowadzonych pomiarów dla środka i średnicy każdego z czterech mierzonych otworów.

Tabela 1. Wyniki pomiarów otworów głowicy silnika spalinyowego
Table 1. Holes measurement results

	Wartość zmierzonej średnicy [mm]	Współrzędne środka	
		X_c	Y_c
Otwór 1	18,878	10,110	-0,487
Otwór 2	18,805	87,192	-0,386
Otwór 3	18,834	164,261	-0,325
Otwór 4	18,853	241,243	-0,181

6. Podsumowanie

Opisana metoda może posłużyć do inspekcji otworów wykonanych w przedmiotach w warunkach warsztatowych. Dzięki sparymetryzowaniu zmiennych podczas wywołania procedury wyszukiwania krawędzi otworu, program może mierzyć średnice o różnej wielkości. Jedynym uwarunkowaniem jest kwestia wielkości przedmiotu mierzonego uwzględniająca wielkość przestrzeni roboczej manipulatora. Badania pozwalają weryfikować, czy wykonany otwór podlegający inspekcji pozostaje w zadanej tolerancji wykonania, oraz czy np. zarys otworu nie jest owalny lub ma inny kształt odbiegający od okręgu.

Zastosowana metoda GRG umożliwia wyeliminowanie z uzyskanej chmury błędnych punktów pomiarowych. Metoda zapewnia uzyskanie niepewności pomiarowej standardowej typu A na poziomie 0,0014 mm, co daje wartość zadowalającą dla warunków pomiarów warsztatowych przy pomiarach przedmiotów wykonanych w tolerancji $\pm 0,05$ mm.

Automatyzacja pomiaru dzięki zastosowaniu bezstykowego czujnika pomiarowego sprawia, że pomiar jest bezpieczniejszy dla manipulatora i przedmiotu mierzonego. W przypadku, gdyby przedmiot mierzony przypadkowo znalazł się w innej orientacji niż założona, istnieje mniejsze ryzyko kolizji czujnika z przedmiotem.

Wadami zastosowania metody GRG jest skomplikowany tok obliczeń, ponadto należy znać pewne przybliżone parametry takie jak środek okręgu czy jego średnica. Po jednokrotnym wykonaniu obliczeń nadal obserwuje się różnice między promieniem będącym pierwiastkiem z równania (9) a promieniem obliczonym z zależności (14). Przyjmując odpowiednią tolerancję odległości między długościami tych promieni można wyeliminować błędy nadmierne, a następnie wykonać obliczenia kolejny raz, przybliżając się do poprawnego rozwiązania.

Jak wykazały badania, możliwe jest oszacowanie wielkości przesunięcia D_i stanowiącego błąd systematyczny o rozkładzie prostokątnym. Wprowadzenie do algorytmu sterującego pracą robota poprawki wynikającej z przesunięcia D_i kompensuje negatywny efekt opóźnienia wystąpienia przerwania na dokładność pomiarów.

Artykuł został zrealizowany w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji ATH w ramach prac związanych z badaniami

nad niepewnością pomiarów realizowanych za pomocą inspekcyjnego robota przemysłowego.

Bibliografia

1. Stryczek R., Dutka P., *The analysis of signal disruptions from an optical triangulation measurement sensor*, "Measurement Automation Monitoring", Vol. 62, No. 2, 2016, 62–65.
2. Dutka P., *Metoda wyznaczenia TCP narzędzia dla triangulacyjnej głowicy pomiarowej współpracującej z robotem przemysłowym*, „Pomiary Automatyka Robotyka”, R. 20, Nr 3, 2016, 65–70, DOI: 10.14313/PAR_221/65.
3. KEYENCE, *High-speed, high-accuracy laser displacement sensor*, LK-G5000 Series, user's manual (2010).
4. KUKA Roboter GmbH, *Trainer Guide, Use and Programming of Industrial Robots*, V1, en.pdf, training guide (2013).
5. KUKA Roboter GmbH, e6c77545-9030-49b1-93f5-4d17c92173aa_Spez_KR_AGILUS_sixx_en.pdf, Product specification (2014).
6. Kuts V., Tahemaa T., Otto T., Sarkans M., Lend H., *Robot manipulator usage for measurement in production areas*, "Journal of Machine Engineering", Vol. 16, No. 1, 2016, 57–67.
7. Sidzina M., Wróbel I., *Wykorzystanie robota przemysłowego do precyzyjnego skanowania tłoczników*, „Pomiary Automatyka Kontrola”, Vol. 56, Nr 3, 2010, 272–274.
8. <http://www.solver.com/excel-solver-grg-nonlinear-solving-method-stopping-conditions.html>, online 09.12.2016.
9. Stadnicki J., *Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 2006.
10. <http://www.algorytm.org/geometria-obliczeniowa/okrag-przechodzacy-przez-dane-trzy-punkty.html>, online 12.01.2017.
11. Mrowiec M., *Badanie niepewności pomiarów średnicy otworów i czopów, wykonane laserem pomiarowym zainstalowanym na robocie przemysłowym*, praca dyplomowa niepublikowana, archiwum ATH, 2017.

Coordinate Method of Contactless Measurement and Evaluation of Center and Radius of a Hole in Workshop Conditions

Abstract: The paper presents coordinate method of contactless measurement and evaluation of center and radius of a hole. The measurement process was done in workshop conditions by industrial robot with mounted triangulation distance sensor on robot arm. Estimation of measurement data was done using MS Excel spreadsheet program and using Generalized Reduce Gradient method (GRG method) offered by MS Solver analysis tool. The calibration method and setting down systematic error was shown. Furthermore, the components of signal time lag in measurement chain were identifying. The presented method was illustrated by measurement of glow plug holes in cylinder head of diesel engine.

Keywords: multipoint coordinate measurement, measurement uncertainty, Generalized Reduce Gradient method (GRG method)

mgr inż. Piotr Dutka

wolfow@poczta.onet.pl

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Informatyki Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Obecnie doktorant na kierunku Budowa i Eksploatacja Maszyn ATH. Zaawansowany staż pracy w służbach Utrzymania Ruchu w branży Automotive. Zainteresowania zawodowe to zrobotyzowane stanowiska produkcyjne, sterowniki PLC, systemy wizyjne.



inż. Maciej Mrowiec

macc1511@gmail.com

Ukończył studia na kierunku Automatyka i Robotyka na Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej. Obecnie kontynuuje studia na kierunku Mechanika i Budowa Maszyn. Aktualne zainteresowania naukowe to pomiary bezstykowe i badania niepewności pomiaru.

