

Automatyzacja pomiarów współrzędnościowych organów roboczych maszyn urabiających z wykorzystaniem skanowania 3D

Piotr Cheluszka

Politechnika Śląska, Wydział Górnictwa i Geologii, Instytut Mechanizacji Górnictwa, ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice

Streszczenie: Maszyny urabiające należą do podstawowej grupy maszyn roboczych stosowanych w górnictwie podziemnym i powierzchniowym. W przypadku maszyn urabiających na zasadzie skrawania proces urabiania realizowany jest za pomocą organów roboczych wyposażonych w wymienne narzędzia, np. noże osadzone w uchwytach nożowych. Noże te rozmieszczone i ustawione są w przestrzeni w ustalony na etapie projektowania sposób, dostosowany do właściwości urabianego ośrodka skalnego. Pomiary współrzędnościowe sprowadzają się do wyznaczenia sześciu parametrów dla każdego z noży. Ze względu na sposób rozmieszczenia, pomiar bezpośredni tych parametrów nie jest możliwy. Metody pośrednie polegają na pomiarze wielkości wchodzących do definicji funkcji modelujących pomiar. W takim przypadku wygodnym rozwiązaniem zadania metrologicznego, szczególnie pod kątem automatyzacji procesu, jest wykorzystanie metod optycznych, na przykład skanera światła strukturalnego. Metoda ta wymaga zbudowania, dla każdego uchwytu nożowego oraz związanego z nim noża, modelu pomiaru. W przypadku dużej liczby noży jest to proces czaso- i pracochłonnym. Możliwość automatyzacji procesu pomiarowego przedstawiono na przykładzie głowicy urabiającej wysięgnikowych kombajnów chodnikowych, stosowanych do drążenia wyrobisk korytarzowych i tuneli. Omówiono przetwarzanie uzyskanych w trakcie pomiaru danych w celu wyznaczenia zestawu wartości parametrów stereometrycznych opisujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni poszczególnych noży oraz związanych z nimi uchwytów nożowych. Wykorzystano do tego funkcjonalność oprogramowania GOM Inspect Professional umożliwiającą budowanie strategii pomiaru za pomocą skryptów w języku Python.

Słowa kluczowe: maszyna urabiająca, organ roboczy, stereometria, skanowanie 3D, pomiary, automatyzacja, język programowania Python

1. Wprowadzenie

Maszyny urabiające służą do mechanizacji jednego z głównych procesów składających się na technologie górnicze, jakim jest urabianie skały. Podstawowym sposobem urabiania mechanicznego jest skrawanie za pomocą noży. Organy robocze maszyn urabiających wyposażone są w tym przypadku w przyspawane do ich poboczniczy uchwyty nożowe, w których osadzone są wymienne narzędzia (noże) (rys. 1). Organy te cechują się złożoną stereometrią. Liczba oraz spo-

sób rozmieszczenia i ustawienia noży na ich poboczniczy dostosowane muszą być do warunków realizacji procesu urabiania (urabialności skał) zapewniając możliwość osiągnięcia jak największej efektywności pracy maszyny urabiającej. Stąd, organy robocze tego rodzaju maszyn wyposażone są niejednokrotnie w dużą liczbę noży. Przykładowo, głowice urabiające wysięgnikowych kombajnów chodnikowych (rys. 2) wyposażone mogą być nawet w 90 noży [1]. Każdy z noży osadzony jest w uchwycie nożowym umieszczonym w ściśle określonym miejscu poboczniczy organu, w ściśle określony sposób. Pomiar współrzędnościowy organów roboczych maszyn urabiających polega na wyznaczeniu dla każdego noża oraz związanego z nim uchwytu nożowego wartości sześciu parametrów [2]:

- współrzędnych w układzie walcowym: r_i , z_i oraz ϑ_i (dla $i = 1, \dots, N$) opisujących położenie wierzchołka ostrza i -tego noża (punktu S_i) – rys. 3a,
- kątów: δ_i , ϵ_i oraz Θ_i determinujących ustawienie w przestrzeni osi i -tego noża oraz płaszczyzny symetrii związanego z nim uchwytu nożowego (płaszczyzny przekroju uchwytu nożowego pokazanej na rys. 1) – rys. 3b.

Autor korespondujący:

Piotr Cheluszka, Piotr.Cheluszka@polsl.pl

Artykuł recenzowany

nadesłany 01.06.2016 r., przyjęty do druku 25.08.2016 r.



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

Wartości parametrów stereometrycznych określone są w układzie współrzędnych XYZ związanym z pobocznicą organu roboczego maszyny urabiającej. Oś Z tego układu pokrywa się z osią obrotu organu roboczego, zaś osie: X i Y leżą w płaszczyźnie jego podstawy. W przypadku organu roboczego wyposażonego w N noży końcowy wynik pomiaru będzie miał postać macierzy $N \times 6$ utworzonej z estymat parametrów charakteryzujących rozmieszczenie i ustawienie poszczególnych noży wraz z odpowiadającą im niepewnością rozszerzoną pomiaru:

$$\begin{bmatrix} z_1 \pm U(z_1) & r_1 \pm U(r_1) & \vartheta_1 \pm U(\vartheta_1) & \delta_1 \pm U(\delta_1) & \varepsilon_1 \pm U(\varepsilon_1) & \Theta_1 \pm U(\Theta_1) \\ z_2 \pm U(z_2) & r_2 \pm U(r_2) & \vartheta_2 \pm U(\vartheta_2) & \delta_2 \pm U(\delta_2) & \varepsilon_2 \pm U(\varepsilon_2) & \Theta_2 \pm U(\Theta_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_N \pm U(z_N) & r_N \pm U(r_N) & \vartheta_N \pm U(\vartheta_N) & \delta_N \pm U(\delta_N) & \varepsilon_N \pm U(\varepsilon_N) & \Theta_N \pm U(\Theta_N) \end{bmatrix}$$

gdzie: N – liczba noży na pobocznicy organu roboczego objętego pomiarem, $z_i, r_i, \vartheta_i, \delta_i, \varepsilon_i, \Theta_i$ – estymaty parametrów opisujących rozmieszczenie i ustawienie w przestrzeni i -tego noża oraz związanego z nim uchwytu nożowego (dla $i = 1, \dots, N$), $U(\)$ – niepewność rozszerzona pomiaru parametru zawartego w nawiasie.

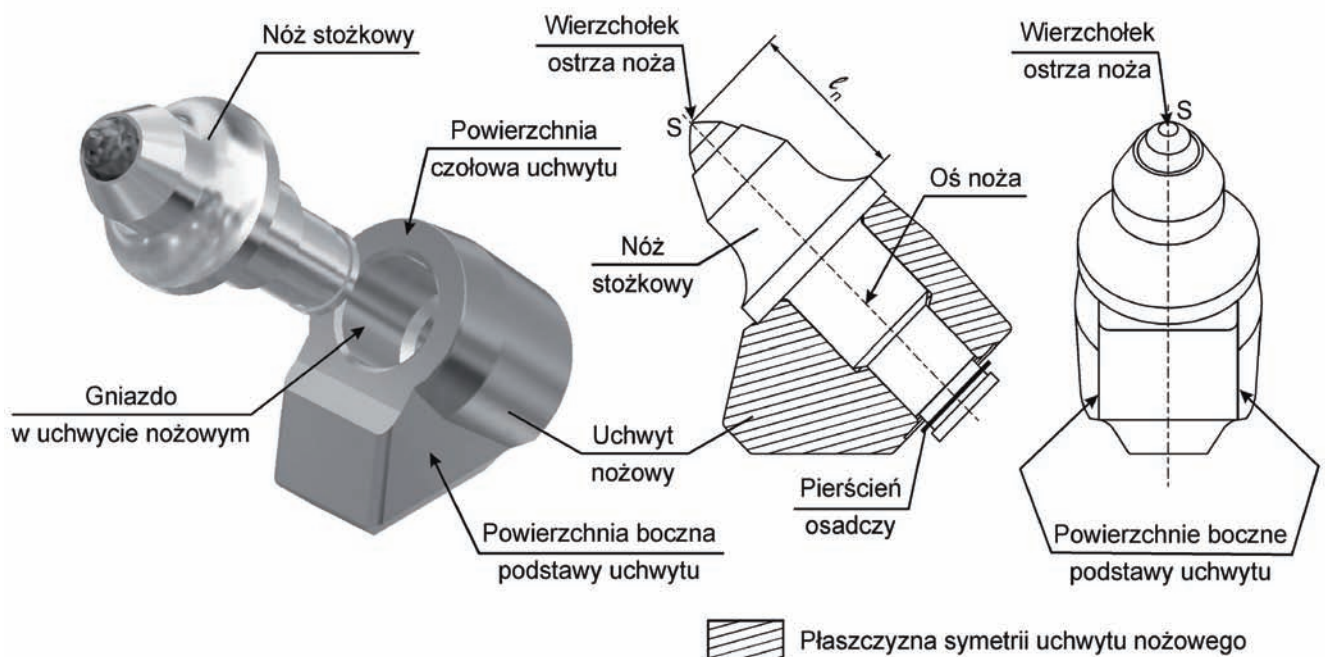
Bezpośredni pomiar tych parametrów, w szczególności zaś kątów definiujących przestrzenne ustawienie noży oraz uchwytów nożowych jest trudny. Dogodnym sposobem realizacji tego rodzaju pomiarów jest wykorzystanie metod pośrednich, w których wyznaczenie wartości poszukiwanych parametrów dokonywane jest w oparciu o wyniki pomiaru pewnych łatwo mierzalnych wielkości geometrycznych. Realizowany on może być na wiele różnych sposobów – metodami stykowymi lub bezstykowymi [2]. W niniejszym artykule omawiana jest metoda bezstykowa, aktywna – z wykorzystaniem skanera pracującego w technice światła strukturalnego. Metoda ta umożliwia pozyskanie szczegółowych informacji o kształcie, wymiarach skanowanego obiektu oraz cechach jego powierzchni (fakturze). Wadą tej metody jest nadmiarowość danych, z których należy

wyodrębnić informacje niezbędne do wyznaczenia wartości poszukiwanych wielkości. Zaletą metody jest możliwość automatyzacji procesu pomiarowego, zarówno na etapie akwizycji danych pomiarowych, jak i ich komputerowego przetwarzania. Sprzyja to redukcji czasu oraz pracochłonności procedury pomiarowej.

Automatyzacja akwizycji danych pomiarowych może być zrealizowana dzięki zastosowaniu robota przemysłowego (rys. 4). Robotyzacja procesu skanowania powierzchni organów roboczych maszyn urabiających opisana została w pracy [4]. Skanowanie realizowane jest tu za pomocą skanera wykorzystującego metodę światła strukturalnego zamocowanego do ramienia robota przemysłowego. Rekonstrukcja cyfrowa powierzchni

skanowanego obiektu dokonywana jest przy różnych ustawieniach skanera przemieszczanego za pomocą robota realizującego zaprogramowane ruchy zapisane w opracowanym w tym celu programie użytkowym. Wykorzystanie robota przemysłowego do akwizycji danych pomiarowych (w postaci chmury punktów) wymaga komunikowania się oprogramowania służącego do zarządzania procesem skanowania z układem sterowania robota (w omawianym rozwiązaniu proces skanowania skanerem smartSCAN 3D-HE – prod. Breuckmann AICON 3D Systems – zarządzany jest z poziomu oprogramowania Optocat). Kolejne pozycje robota przekazywane do oprogramowania zarządzającego tym procesem wykorzystywane są na etapie dopasowywania, optymalizacji i łączenia skanów.

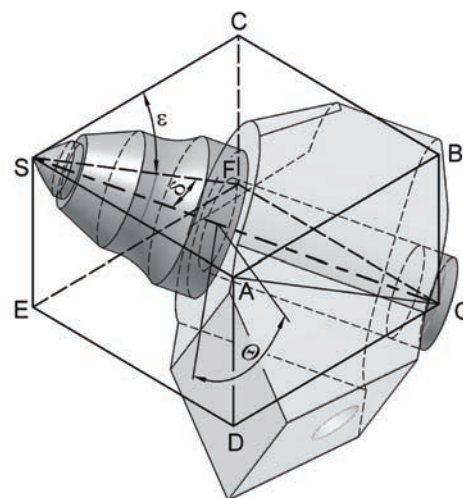
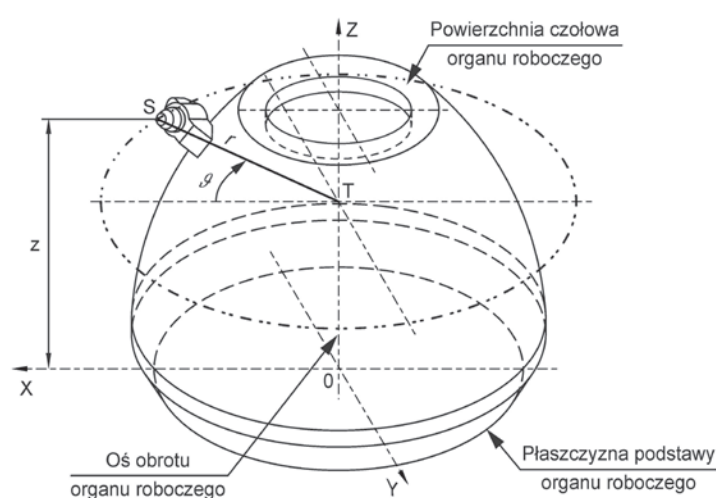
W artykule rozważono problem automatyzacji procesu przetwarzania uzyskanych podczas skanowania 3D danych pomiarowych. W oparciu o zbudowany model pomiaru dokonywana jest identyfikacja wartości parametrów wchodzących do definicji funkcji umożliwiających wyznaczenie wartości poszukiwanych parametrów stereometrycznych. Na etapie przetwarzania danych



Rys. 1. Przykładowy nóż stożkowy stosowany do urabiania skał wraz z uchwytem nożowym umożliwiającym zamocowanie noża na pobocznicy organu roboczego maszyny urabiającej
 Fig. 1. Example of conical pick with stepped shank for rock cutting with a pickbox enabling top mount of a pick on the side surface of the mining machine working unit



Rys. 2. Wysięgnikowy kombajn chodnikowy R-2000 (prod. Famur S.A.) wyposażony w poprzeczne głowice urabiające [3]
Fig. 2. R-2000 boom-type roadheader (manufactured by Famur S.A.) with transverse cutting heads [3]



Rys. 3. Sposób wymiarowania układu noży na organach roboczych maszyn urabiających: parametry opisujące rozmieszczenie noży (a) oraz kąty opisujące ich przestrzenne ustawienie (b) [2]

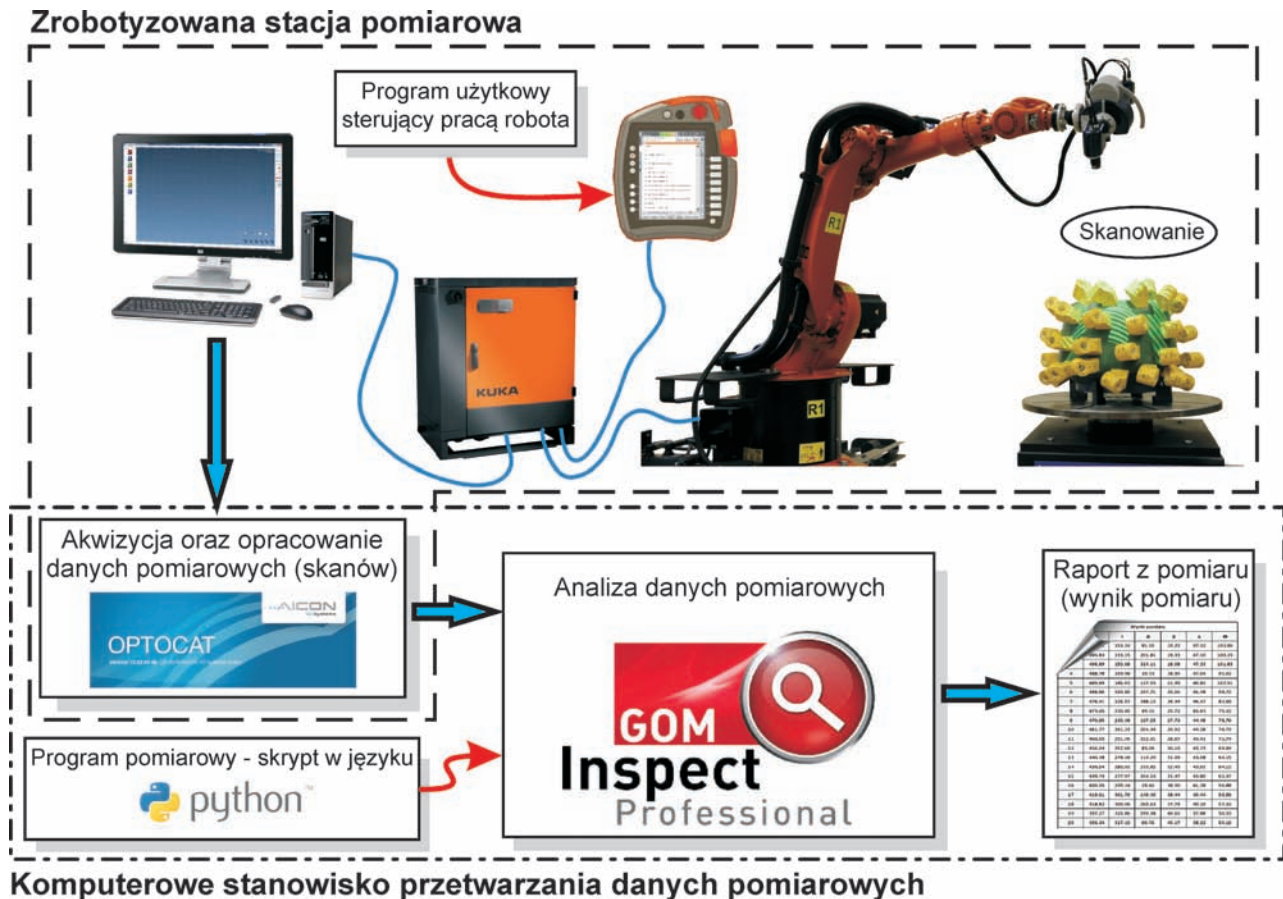
Fig. 3. Pick system dimensioning method: parameters describing the arrangement of picks (a) and angles defining their spatial positioning (b) [2]

pomiarowych wykorzystano funkcje środowiska GOM Inspect Professional. Automatyzacja tego procesu zrealizowana została z wykorzystaniem wbudowanego języka skryptowego Python. Opracowanie odpowiedniego skryptu umożliwiło półautomatyczną realizację zaprogramowanych sekwencji operacji graficznych, arytmetycznych i logicznych, które w efekcie doprowadziły do uzyskania wyniku pomiaru. Sposób realizacji tego zadania przedstawiono na przykładzie pomiaru głowicy urabiającej wysięgnikowego kombajnu chodnikowego (rys. 2). Kombajny te stosowane

są do drażenia wyrobisk korytarzowych w kopalniach podziemnych, tuneli oraz innych obiektów podziemnych w budownictwie inżynierskim.

2. Komputerowe przetwarzanie danych pomiarowych

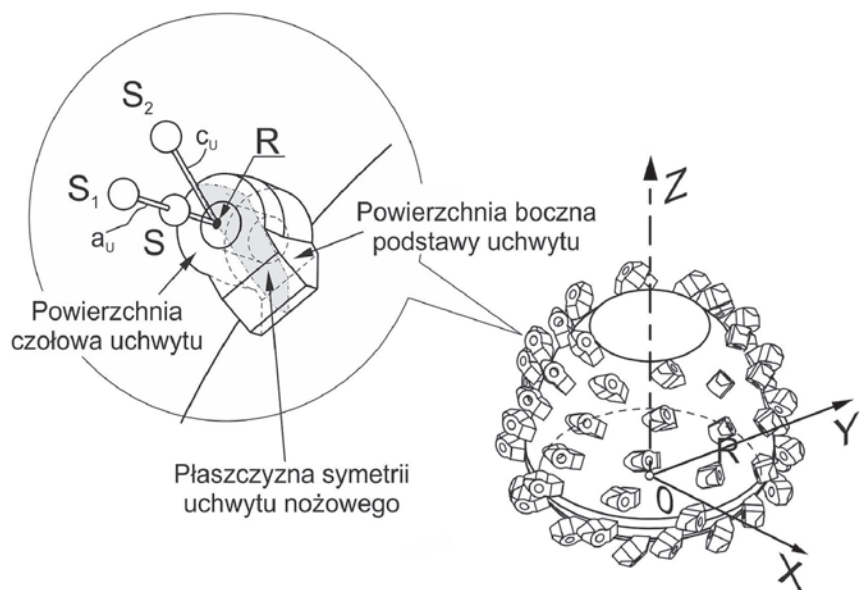
Dla potrzeb wyznaczenia wartości parametrów stereometrycznych organów roboczych maszyn urabiających niezbędne jest wyodrębnienie informacji o cechach geometrycznych uchw-



Rys. 4. Przebieg zautomatyzowanego pomiaru stereometrii organów roboczych maszyn urabiających
 Fig. 4. Progress of automated measurement of stereometry of mining machines working units

tów nożowych (umożliwiających zbudowanie modelu pomiaru) oraz poboczniczy organu roboczego dla potrzeb utworzenia układu współrzędnych, w którym parametry te są zdefiniowane. Opracowanie danych pomiarowych w celu wyznaczenia wyniku pomiaru realizowane jest za pomocą oprogramowania graficznego i metrologicznego, które umożliwia przetwarzanie chmur punktów do postaci siatek trójkątów odwzorowujących skanowane powierzchnie, a następnie ich cyfrową obróbkę.

Proces komputerowego przetwarzania danych pomiarowych zrealizowany został w dwóch etapach (rys. 4). W pierwszym z nich opracowano dane pomiarowe (chmurę punktów) w programie Optocat. Oprogramowanie to jest narzędziem dedykowanym do współpracy ze skanerami SmartSCAN, umożliwiającym obróbkę uzyskiwanych tą drogą skanów oraz ich konwersję do postaci siatki trójkątów. W środowisku tym zrealizowane zostały czynności przygotowujące dane pomiarowe do dalszego przetwarzania i analizy. Polegały one na dopasowaniu i połączeniu kolejnych skanów, oczysz-



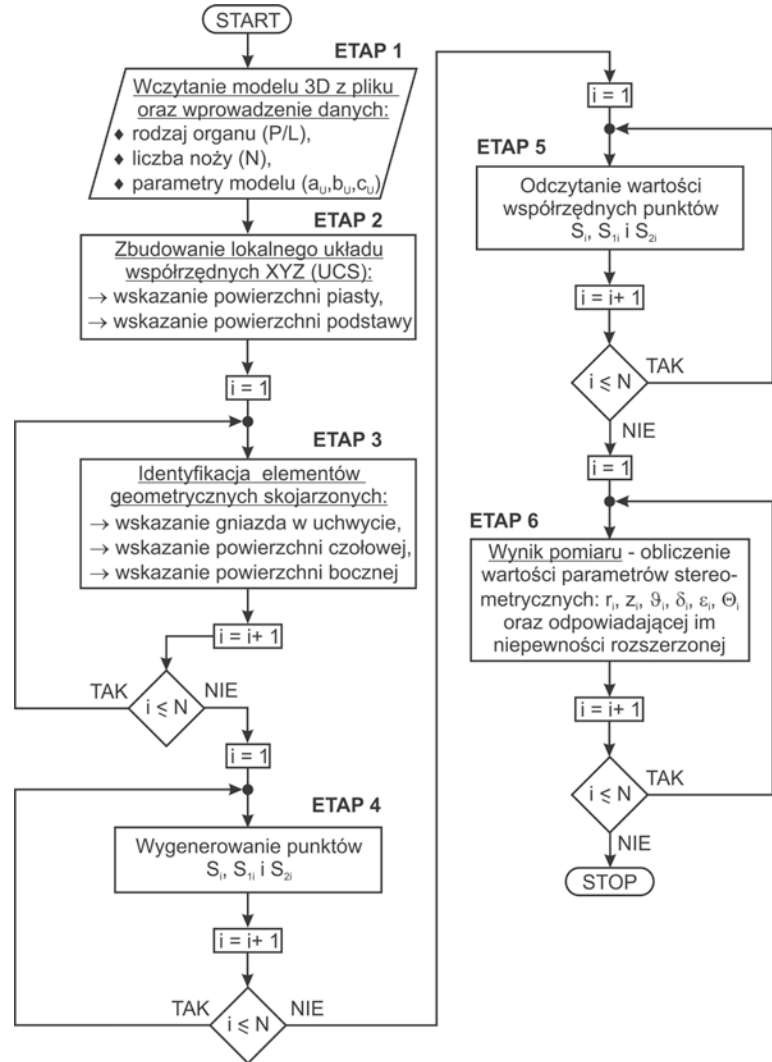
Rys. 5. Sposób rozmieszczenia charakterystycznych punktów w metodzie trzypunktowej pomiaru rozmieszczenia i ustawienia noży oraz związanych z nimi uchwytów nożowych na poboczniczy organu roboczego maszyny urabiającej
 Fig. 5. Arrangement of characteristic points in the three-point method of arrangement and positioning pickboxes on the side surface of the mining machine working unit

czeniu skanów ze zbędnych elementów tła, wygładzeniu powierzchni, usunięciu błędnych trójkątów oraz optymalizacji siatki. O ile dopasowanie oraz łączenie skanów realizowane jest automatycznie, o tyle oczyszczenie modelu 3D oraz jego optymalizacja odbywa się przy udziale operatora. Utworzona siatka trójkątów odwzorowująca powierzchnię skanowanego obiektu zapisywana jest do pliku w formacie STL umożliwiającym import danych do oprogramowania metrologicznego.

Zasadniczy etap procedury pomiarowej realizowany był w środowisku GOM Inspect Professional. Jest to oprogramowanie umożliwiające realizację złożonych strategii pomiaru obiektów 3D w celu uzyskania interesujących informacji o jego cechach geometrycznych oraz analizę ilościową w trakcie porównywania wartości cech geometrycznych uzyskanych z pomiaru z modelem CAD lub danymi pobranymi z dokumentacji technicznej [5–8]. Istotną funkcjonalnością tego oprogramowania w wersji Professional z punktu widzenia automatyzacji procesu pomiarowego jest wbudowany interpreter języka programowania Python. Umożliwia on tworzenie programów metrologicznych w formie skryptów. Wyposażony jest on, obok standardowych bibliotek programistycznych, w dedykowane biblioteki zawierające zestaw instrukcji sterujących programem GOM Inspect, z poziomu którego jest wywoływany. Możliwe jest dzięki temu automatyczne, wielokrotnie powtarzane wykonywanie zaprogramowanych sekwencji operacji, co w przypadku ręcznej obsługi programu jest niejednokrotnie zadaniem żmudnym i pracochłonnym. Z problemem takim mamy do czynienia podczas pomiarów współrzędnościowych organów roboczych maszyn urabiających, w przypadku których dla kolejnych uchwytów nożowych objętych pomiarem wykonywana jest sekwencja operacji na wirtualnym modelu mierzonego obiektu. Celem tych działań jest zbudowanie, dla każdego z nich, modelu pomiaru. W oparciu o ten model wyznaczane są wartości parametrów opisujących rozmieszczenie i ustawienie noża oraz związanego z nim uchwytu nożowego.

Dla potrzeb pomiaru wartości parametrów stereometrycznych dla poszczególnych noży oraz związanych z nimi uchwytów nożowych wykorzystano metodę trzypunktową opisaną m.in. w pracy [9]. W celu jednoznacznego określenia położenia oraz orientacji przestrzennej układu nóż–uchwyt nożowy, wystarczające jest określenie położenia trzech charakterystycznych punktów uchwytu nożowego w lokalnym układzie współrzędnych XYZ (rys. 5):

- punktu S – odwzorowującego położenie wierzchołka ostrza noża związanego z rozpatrywanym uchwytem nożowym,
- punktu S_1 – leżącego na przedłużeniu osi podłużnej noża (pokrywającej się z osią gniazda w uchwycie nożowym),



Rys. 6. Algorytm procedury półautomatycznego przetwarzania danych pomiarowych w środowisku GOM Inspect Professional

Fig. 6. Algorithm of procedure of semi-automatic measuring data processing in GOM Inspect Professional environment

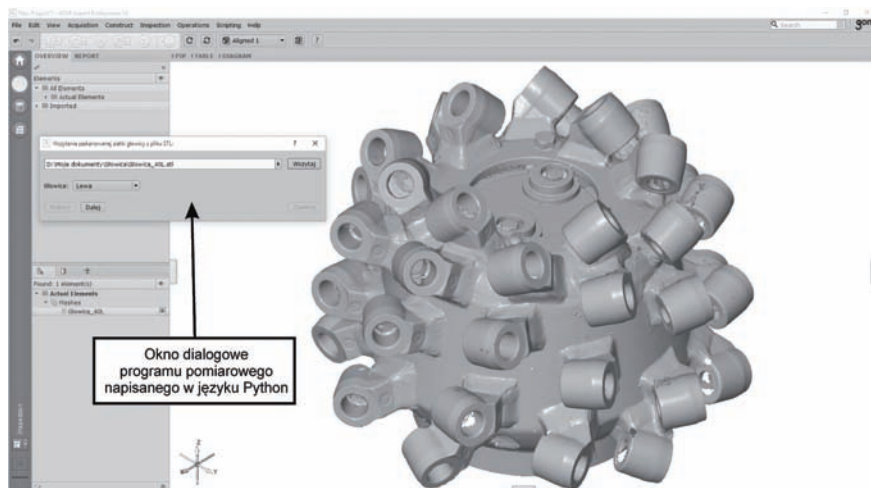
– punktu S_2 – leżącego na prostej prostopadłej do osi podłużnej noża w płaszczyźnie symetrii uchwytu nożowego.

Punkt S oddalony jest od powierzchni czołowej uchwytu nożowego (punktu R) o wielkość b_U równą wysunięciu noża z uchwytu nożowego l_n (rys. 1). W celu identyfikacji położenia tego punktu niezbędna jest zatem znajomość geometrii noży przewidzianych dla organu roboczego maszyny urabiającej objętego pomiarem. Położenie punktów: S_1 i S_2 wynika z kolei z założonej długości odcinków: $\overline{SS_1} = a_U$ i $\overline{S_2R} = c_U$ (dla potrzeb realizacji pomiaru przyjęto: $a_U = c_U = 125$ mm).

Estymaty parametrów opisujących rozmieszczenie i ustawienie noży oraz związanych z nimi uchwytów nożowych na poboczny organ roboczego maszyny urabiającej, dla których realizowany jest pomiar są funkcją współrzędnych przestrzennych punktów: S_i , S_{1i} oraz S_{2i} , wygenerowanych dla rozpatrywanych uchwytów nożowych (dla $i = 1, \dots, N$):

$$\{z_i, r_i, \vartheta_i, \delta_i, \varepsilon_i, \Theta_i\} = f(x_{S_i}, y_{S_i}, z_{S_i}, x_{S_{1i}}, y_{S_{1i}}, z_{S_{1i}}, x_{S_{2i}}, y_{S_{2i}}, z_{S_{2i}})$$

gdzie: x_{S_i} , y_{S_i} , z_{S_i} , ... – współrzędne punktów: S_i , S_{1i} oraz S_{2i} w układzie odniesienia XYZ.



Rys. 7. Program pomiarowy napisany w języku Python – Etap 1 – wczytanie zeskanowanej siatki z pliku STL do środowiska GOM Inspect
 Fig. 7. Measuring programme created in Python language – Phase 1 – the scanned net is downloaded from STL file to GOM Inspect environment

Model matematyczny pomiaru tworzy zbiór relacji wiążących poszukiwane parametry stereometryczne ze współrzędnymi zdefiniowanymi w wyżej opisany sposób punktów. Ponieważ parametry te zależą od dziewięciu wielkości wejściowych, niepewności ich pomiaru, które wraz z estymatami wielkości mierzonych tworzą wynik pomiaru, szacowane są w oparciu o prawo propagacji niepewności, na podstawie wariancji dla funkcji wielu zmiennych losowych [10]. Jak wykazały wcześniej prowadzone w tym zakresie badania, wielkości wchodzące do definicji funkcji modelujących pomiar (współrzędne punktów: S , S_1 i S_2) są skorelowane. Siła korelacji poszczególnych parametrów jest przy tym różna. Bardzo wysoką lub prawie pełną korelację (większą od 0,8) wykazują współrzędne tych punktów mierzone w jednakowym kierunku. Wartości współczynników korelacji obliczane są w trakcie realizacji omawianego zadania metrologicznego na podstawie wartości współrzędnych wyżej wymienionych punktów odczytanych w programie GOM Inspect, dla wszystkich uchwytów nożowych objętych pomiarem.

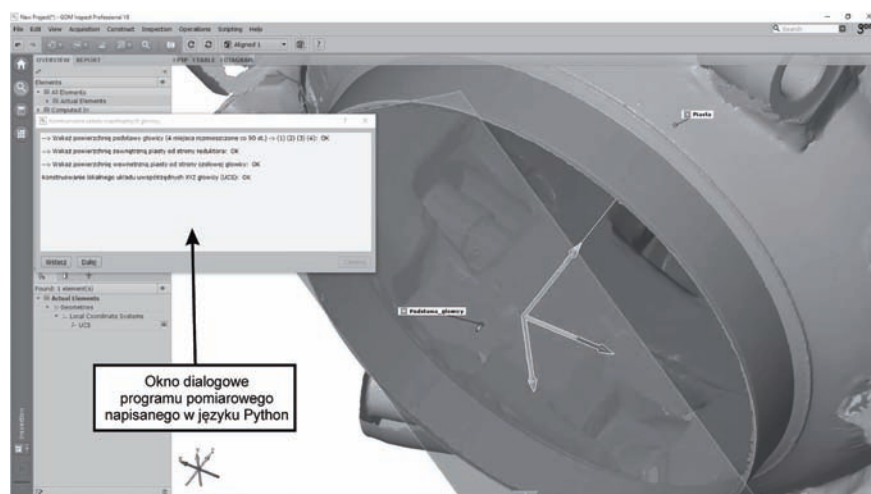
3. Procedura półautomatycznego pomiaru parametrów stereometrycznych organu roboczego maszyny urabiającej w środowisku GOM Inspect

Jedną z funkcjonalności oprogramowania GOM Inspect jest możliwość automatycznej klasyfikacji kształtu powierzchni opracowywanego modelu 3D oraz identyfikacji wartości parametrów figur płaskich lub brył dopasowanych do wyodrębnionych powierzchni

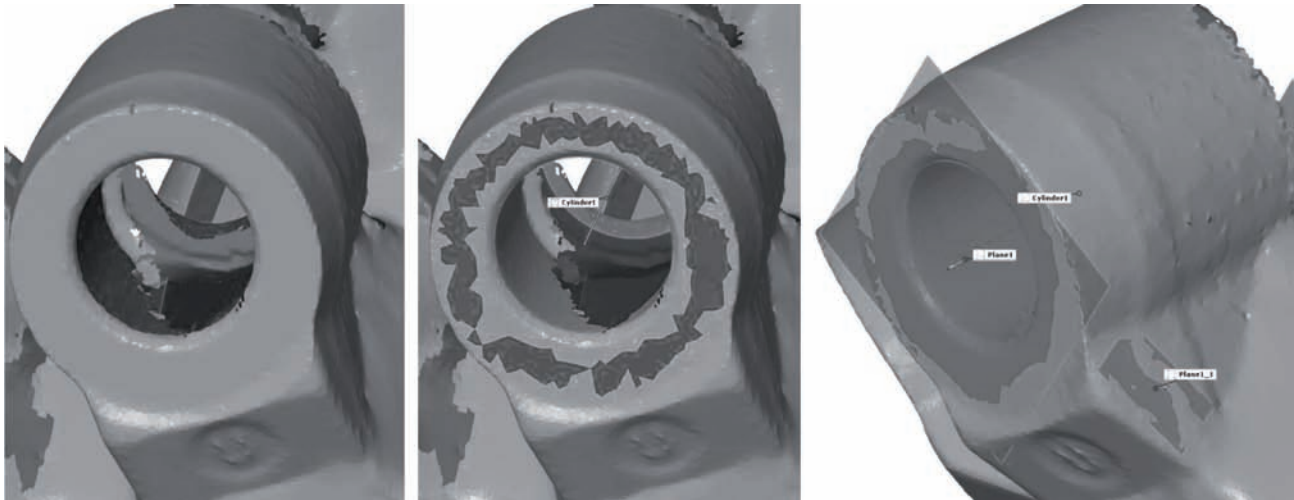
(takich jak: okrąg, wielobok, płaszczyzna, cylinder, stożek, kula). Ze względu na skomplikowany kształt siatki odwzorowującej zeskanowaną powierzchnię organów roboczych maszyn urabiających, w której wydzielić można niezliczoną liczbę powierzchni elementarnych zrezygnowano z takiego podejścia. Stwierdzono bowiem, iż automatyczna analiza kształtu uzyskanej podczas skanowania powierzchni jest procesem bardzo czasochłonnym i nie daje oczekiwanych rezultatów. Dlatego zdecydowano, że proces dopasowywania elementów geometrycznych stanowiący podstawę dla budowy modelu pomiaru realizowany będzie w trybie półautomatycznym – przy udziale operatora. Zadaniem operatora jest przy tym jedynie wskazywanie charakterystycznych powierzchni zgodnie z komunikatami wyświetlanymi w oknach dialogowych programu pomiarowego. Przeprowadzone testy wykazały, że rozwiązanie

to pozwala na istotne skrócenie czasu analizy danych pomiarowych, przy czym pracochłonność czynności wykonywanych ręcznie nie jest zbyt wielka.

Opracowany program pomiarowy w języku Python, uruchamiany w środowisku GOM Inspect (rys. 4), podzielony został na sześć funkcjonalnych etapów (rys. 6). Po uruchomieniu skryptu w środowisku GOM Inspect Professional inicjowana jest procedura przetwarzania danych pomiarowych. Skrypt ten otwiera okna dialogowe pozwalające na interaktywną realizację kolejnych etapów procesu pomiarowego. Rozpoczyna się on od zaimportowania siatki trójkątów odwzorowujących powierzchnię zeskanowanego organu roboczego maszyny urabiającej z pliku STL uzyskanego z programu Optocat (ETAP 1) – rys. 7. Na tym



Rys. 8. Etap 2 programu pomiarowego – zbudowanie lokalnego układu współrzędnych XYZ (kolorem zielonym oznaczone są wygenerowane elementy geometryczne wykorzystane do skonstruowania układu współrzędnych)
 Fig. 8. Phase 2 of measuring programme – local system of coordinates XYZ is created (geometrical elements used for building the system of coordinates are marked green)



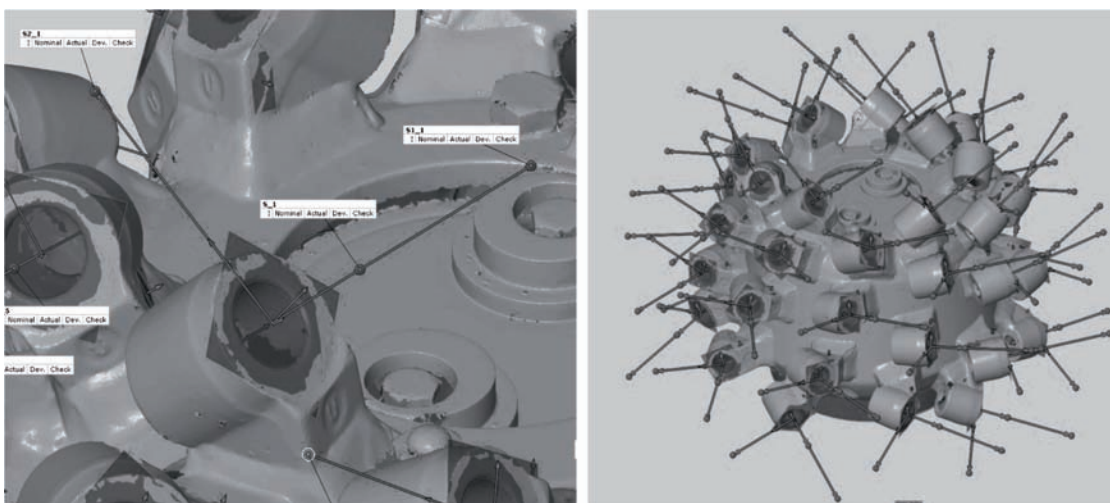
Rys. 9. Etap 3 programu pomiarowego – dopasowanie do uchwytów nożowych elementów geometrycznych skojarzonych: a) walca opisanego na powierzchni gniazda w uchwycie nożowym, b) płaszczyzny dopasowanej do powierzchni czołowej uchwytu, c) efekt końcowy (kolorem czerwonym oznaczone są powierzchnie rozpoznane przez program GOM Inspect, kolorem zielonym – dopasowane do tych powierzchni elementy geometryczne)

Fig. 9. Phase 3 of measuring programme – the matched geometrical elements are fitted into the pickbox: a) a cylinder circumscribed on a pickbox socket surface, b) plane fitted to the pickbox face, c) final result (the surfaces recognised by GOM Inspect programme are marked red, geometrical elements of the defined class matched to such surfaces are marked green)

etapie dokonywany jest również wybór rodzaju organu roboczego (prawy lub lewy), gdyż zależy od niego matematyczny opis transformacji niektórych parametrów stereometrycznych.

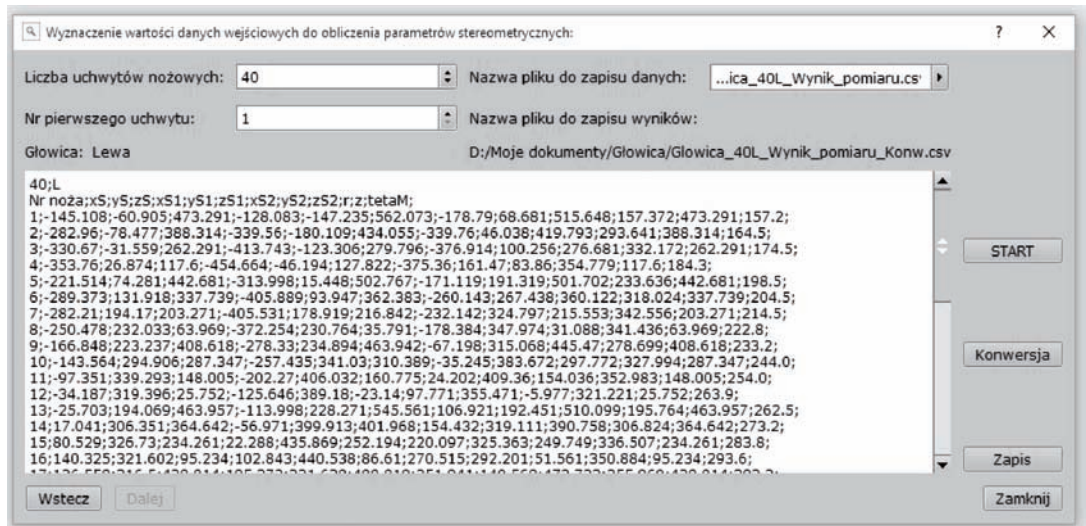
W następnym etapie (rys. 6 – ETAP 2) zbudowany zostaje układ współrzędnych XYZ związany z pobocznicą (kadłubem) organu roboczego. W układzie tym wyznaczane będą później wartości poszukiwanych parametrów stereometrycznych. Układ współrzędnych XYZ utworzony zostaje na bazie dwóch elementów geometrycznych skojarzonych (zastępczych) – walca (ozn. „Piasta”) o osi zgodnej z osią obrotu rozpatrywanego organu (osią Z) oraz płaszczyzny jego podstawy (ozn. „Pod-

stawa”). W tym celu wskazywane są przez operatora dokonującego pomiar dwie powierzchnie cylindryczne o osi zgodnej z osią Z – od strony płaszczyzny podstawy organu oraz od strony jego powierzchni czołowej (patrz rys. 3a). W wyniku wywołania instrukcji *gom.script.primitive.create_fitting_cylinder()* z metodą *minimum_circumscribed* program GOM Inspect generuje wałek odniesienia opisany najmniejszy (MCCY) [11]. Po wskazaniu w kilku miejscach powierzchni podstawy następuje automatyczne dopasowanie płaszczyzny – instrukcja *gom.script.primitive.create_fitting_plane()* z metodą *best_fit* – płaszczyzna odniesienia najmniejszych kwadratów (LSPL)



Rys. 10. Etap 4 programu pomiarowego – wygenerowanie punktów S , S_1 i S_2 : a) rozmieszczenie punktów dla wybranego uchwytu nożowego, b) efekt końcowy – punkty wygenerowane dla wszystkich uchwytów nożowych głowicy urabiającej objętej pomiarem

Fig. 10. Phase 4 of measuring programme – generation of points S , S_1 i S_2 : a) arrangement of points for the selected pickbox, b) final result – points generated for all pickboxes of cutting head subject to measurements



Rys. 11. Etap 5 programu pomiarowego – pomiar wartości współrzędnych punktów pomiarowych: S , S_1 i S_2 dla poszczególnych uchwytów nożowych

Fig. 11. Phase 5 of measuring programme – values of coordinates of measuring points are measured: S , S_1 and S_2 for particular pickboxes

[12]. Na podstawie wyżej wymienionych elementów geometrycznych program automatycznie buduje kartezjański układ współrzędnych XYZ (ozn. „UCS”) w wyniku wywołania instrukcji *gom.script.cs.create_by_geometric_elements()* – rys. 8.

Kolejnym etapem realizowanym przy udziale operatora jest proces dopasowywania określonych elementów geometrycznych skojarzonych do uchwytów nożowych objętych pomiarem (rys. 6 – ETAP 3). Model matematyczny pomiaru zbudowany jest w oparciu o trzy elementy skojarzone: walec opisany na powierzchni gniazda uchwytu nożowego, płaszczyznę odwzorowującą powierzchnię czołową uchwytu oraz płaszczyznę dopasowaną do powierzchni bocznej podstawy uchwytu (por. rys. 1). Po wprowadzeniu liczby uchwytów nożowych (N), dla których realizowany będzie pomiar, dla kolejnych uchwytów generowane są wymienione elementy – po uprzednim wskazaniu przez operatora odpowiedniej powierzchni. Na rys. 9 pokazano kolejne etapy tej procedury. Kolorem czerwonym zaznaczone są rozpoznane przez program GOM Inspect obszary, na bazie których budowane są poszczególne elementy geometryczne według założonej metody dopasowania. Na zielono oznaczone są dopasowane elementy geometryczne, będące efektem realizacji tego procesu. Generowanie poszczególnych elementów geometrycznych skojarzonych dokonywane jest automatycznie w wyniku wywołania następujących instrukcji [13]:

- walec dopasowywany jest do powierzchni gniazda w uchwycie nożowym (ozn. „CylinderNR”) za pomocą instrukcji *gom.script.primitive.create_fitting_cylinder()*,
- płaszczyzny dopasowywane są do powierzchni czołowej (ozn. „PlaneNR”) oraz powierzchni bocznej podstawy uchwytu (ozn. „PlaneNR_1”) z wykorzystaniem instrukcji *gom.script.primitive.create_fitting_plane()*, gdzie NR oznacza numer bieżący uchwytu nożowego.

Jako metodę dopasowywania wymienionych elementów zastosowano: „*minimum_circumscribed*” (walec odniesienia opisany najmniejszy) – w przypadku walca oraz „*best_fit*” (płaszczyzna odniesienia najmniejszych kwadratów) – w przypadku obu płaszczyzn.

Po wygenerowaniu dla każdego uchwytu nożowego objętego pomiarem wymienionych elementów geometrycznych skojarzonych program przechodzi do konstruowania punktów: S_i , S_{1i} i S_{2i}

(dla $i = 1, \dots, N$). Procedura ta realizowana jest w następujących krokach (rys. 6 – ETAP 4):

- 1) wyznaczenie położenia punktu R_i będącego punktem przecięcia osi walca odwzorowującego powierzchnię gniazda w uchwycie nożowym z jego płaszczyzną czołową – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_point_by_line_intersection()*,
- 2) wygenerowanie punktu S_i uzyskanego w wyniku przesunięcia o wielkość b_v punktu R_i w kierunku osi walca odwzorowującego powierzchnię gniazda w uchwycie nożowym – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_offset_point()*,
- 3) wygenerowanie punktu S_{1i} uzyskanego w wyniku przesunięcia o wielkość a_v punktu S_i w kierunku osi walca odwzorowującego powierzchnię gniazda w uchwycie nożowym – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_offset_point()*,
- 4) skonstruowanie osi noża (prostej RS_i) – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_line_by_2_points()*,
- 5) skonstruowanie prostej prostopadłej do powierzchni bocznej podstawy uchwytu poprowadzonej z punktu R_i (ozn. „PBU $_i$ ”) – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_perpendicular_line()*,
- 6) skonstruowanie prostej w płaszczyźnie symetrii uchwytu nożowego poprowadzonej z punktu R_i (ozn. „PS $_i$ ”) – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_line_by_cross_product()*,
- 7) wygenerowanie punktu S_{2i} uzyskanego w wyniku przesunięcia o wielkość c_v punktu R_i w kierunku prostej PS_i – wywołanie instrukcji: *gom.script.primitive.create_offset_point()*.

Efekt realizacji wyżej opisanej procedury pokazano na rys. 10.

Po wygenerowaniu dla każdego uchwytu nożowego, dla którego realizowany ma być pomiar, punktów S , S_1 i S_2 odczytywane są następnie ich współrzędne w układzie odniesienia UCS (ETAP 5). Realizowane jest to za pomocą instrukcji *gom.script.inspection.check_position()*. Dostęp do wartości współrzędnych w kierunku poszczególnych osi kartezjańskiego układu współrzędnych, w którym dokonywana

jest inspekcja, możliwy jest w wyniku zastosowania instrukcji: `gom.app.project.inspection[NAZWA.Pos].get(PARAM)`. Argument `NAZWA` stanowi oznaczenie punktu, którego współrzędna ma być odczytana. Argument `PARAM` stanowi z kolei odwołanie do osi układu współrzędnych (przykładowo, współrzędna w kierunku osi X zostanie odczytana, gdy argument `PARAM='result_gdat_direction_x.measured_value'`). Wartości współrzędnych punktów pomiarowych dla poszczególnych uchwytów nożowych wyświetlane są w kolejnym oknie dialogowym programu pomiarowego (rys. 11). Są one zapisywane w pliku tekstowym w formacie zgodnym z danymi programu MS Excel (*.csv).

Ostatnim etapem procedury pomiarowej (rys. 6 – ETAP 6) jest obliczenie wyniku pomiaru. W oparciu o matematyczny model pomiaru wyznaczane są estymaty parametrów stereometrycznych organu roboczego maszyny urabiającej wraz z odpowiadającymi im wartościami niepewności rozszerzonej $U()$. Wyniki pomiaru w formie tabelaryzowanej zapisywane są do pliku tekstowego, co daje możliwość ich dołączenia do raportu z pomiarów.

4. Podsumowanie

Dla potrzeb automatyzacji przetwarzania danych pomiarowych uzyskanych w trakcie skanowania organów roboczych maszyn urabiających wykorzystano możliwości, jakie daje środowisko GOM Inspect Professional w zakresie programowanego dostępu do jego funkcjonalności. W środowisku tym zaimplementowany został interpreter języka programowania Python. Możliwe jest dzięki temu sterowanie pracą tego programu za pomocą własnoręcznie opracowywanych programów pomiarowych w formie skryptów uruchamianych z poziomu tej aplikacji. W przypadku rozpatrywanych w niniejszym artykule organów roboczych pozwala to na szybkie wykonywanie wielokrotnie powtarzanych, żmudnych czynności mających na celu uzyskanie wyniku pomiaru (zestawu wartości parametrów stereometrycznych, opisujących układ noży objętego pomiarem organu). Ze względu na skomplikowany kształt mierzonego obiektu stwierdzono, że z punktu widzenia redukcji czasu przetwarzania danych pomiarowych korzystnym rozwiązaniem jest praca w trybie półautomatycznym. Udział operatora sprowadza się głównie do wskazywania, w odpowiedzi na żądanie programu, określonych powierzchni, do których program dopasowuje automatycznie elementy geometryczne skojarzone oraz konstruuje elementy, na których bazuje model pomiaru. Po odczytaniu wartości cech geometrycznych zgodnie z przyjętą strategią pomiaru program przetwarza je automatycznie do postaci wyniku pomiaru.

Opracowane rozwiązanie przetestowano w laboratorium Instytutu Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w trakcie pomiarów współrzędnościowych głowic urabiających wysięgnikowych kombajnów chodnikowych na zrobotyzowanej stacji pomiarowej wyposażonej w skaner wykorzystujący metodę światła strukturalnego. Ze względu na to, że skanowane były głowice urabiające o zbliżonych wymiarach gabarytowych (różniące się stereometrią) możliwe było zastosowanie tego samego programu użytkowego sterującego pracą robota. Wykorzystanie programu pomiarowego napisanego w języku Python na etapie przetwarzania danych pomiarowych wydatnie przyspieszyło realizację procedury pomiarowej oraz przyczyniło się do znacznego zmniejszenia pracochłonności tej fazy pomiaru. Opracowane narzędzie ma intuicyjny charakter oraz jest proste w obsłudze, co sprawa-

wia, że może być obsługiwane przez operatorów o różnym poziomie umiejętności.

Podziękowanie

Praca zrealizowana w ramach projektu *Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych* dofinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (umowa nr PBS3/B2/15/2015).

Bibliografia

1. Gehring K.H., Reumüller B., *Hard rock cutting with roadheaders – the ICUTROC approach*, Proc. 5th NARMS and the 17th TAC Conference: Mining and tunneling innovation and opportunity, Toronto, 07–10 July 2002, 1637–1648.
2. Cheluszka P., *Metrologia organów roboczych górniczych maszyn urabiających*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2012.
3. [<https://www.famur.com>] – Famur.
4. Cheluszka P., Nocoń M., *Zrobotyzowana technologia digitalizacji organów roboczych kombajnów górniczych dla potrzeb kontroli jakości ich wytwarzania*, „Górnictwo Odkrywkowe”, Vol. 56, Nr 6, 2015, 11–23.
5. Diehr F., *Mobile scanning without limits – new perspectives with optical 3D metrology*, „VDWF im Dialog”, 2/2011, 19–21.
6. Juras B., Szewczyk D., Śladek J., *The use of optical scanner in measurements of complex shape objects*. “Advances in Science and Technology – Research Journal”, Vol. 7, No. 19, 2013, 48–54, DOI: 10.5604/20804075.1062360.
7. Marciniec A., Budzik G., Dziubek T., *Automated measurement of bevel gears of the aircraft gearbox using GOM*, “Journal of KONES Powertrain and Transport”, Vol. 18, No. 4, 2011, 259–264.
8. [<http://www.gom.com/pl/oprogramowania-3d/gom-inspect.html>] – Oprogramowanie GOM Inspect.
9. Cheluszka P., *A method of measuring the stereometric parameters of working units of mining machines equipped with conical picks*, “Archives of Mining Sciences”, Vol. 55, No. 4, 2010, 747–760.
10. Arendarski J., *Niepewność pomiarów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
11. PN-EN ISO 12180-1:2012: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Walcowość – Część 1: Terminologia i parametry kształtu walcowego.
12. PN-EN ISO 12781-1:2011: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) – Płaskość – Część 1: Terminologia i parametry płaskości.
13. [<https://support.gom.com/label/KNOWLEDGE/scripting>] – GOM Service Area.

Automation of Coordinate Measurements of Mining Machines Working Units with 3D Scanning

Abstract: Mining machines belong to the key group of working machines used in underground and surface mining. In case of machines mining by way of cutting, the process is carried out with working units fitted with a specific number of replaceable tools in the form of picks mounted in pickboxes. The picks are arranged and positioned in space in a way defined at the stage of design, adapted to the properties of the rock being excavated. The stereometry of such working units is measured by determining the values of six parameters for each of the picks. Such parameters cannot be measured directly due to the way they are arranged. Measurements are carried out with indirect methods where values are measured which form part of a definition of measurement modelling functions. The use of optical methods, for example a structured light scanner, is a convenient solution to carry out the considered metrological task, especially in view of the automation of this process. For this, however, a measurement model enabling to determine the values of the magnitudes searched for has to be built for each pickbox and for the related pick. This is a time- and work-intensive process in case of a large number of picks, though. The options of the measurement process automation are presented with the example of a cutting head of boom-type roadheaders employed for drilling dog headings and tunnels. The focus was put on the stage of processing the measuring data obtained in the measurement process to establish a set of stereometry parameters values describing the arrangement and position of individual picks and related pickboxes in space. For this purpose, a feature of GOM Inspect Professional software was used enabling to build a measurement strategy based on scripts created in Python language.

Keywords: mining machine, working unit, stereometry, 3D scanning, measurements, automation, Python programming language

dr hab. inż. Piotr Cheluszka, prof. nzw. w Pol. Śl.

Piotr.Cheluszka@polsl.pl

Profesor nadzwyczajny w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Specjalista w zakresie maszyn górniczych i systemów technologicznych. Zajmuje się zagadnieniami związanymi z mechanizacją drążenia wyrobisk korytarzowych kombajnami chodnikowymi oraz urabianiem węgla kombajnami ścianowymi. Zajmuje się optymalizacją konstrukcji, pomiarami stereometrii oraz robotyzacją technologii wytwarzania organów roboczych górniczych maszyn urabiających. Jest twórcą oryginalnych modeli matematycznych oraz programów komputerowych do symulacji przebiegu procesu urabiania skał, obciążeń dynamicznych w układach napędowych oraz komputerowego wspomaganie projektowania i wytwarzania organów roboczych górniczych maszyn urabiających. Niektóre rozwiązania będące efektem realizowanych prac badawczych, których jest współautorem zostały nagrodzone medalami prestiżowych wystaw innowacji w kraju i za granicą, m.in. w Warszawie, Seulu, Kuala Lumpur, Moskwie, Zagrzebiu i Norymberdze. Jest współautorem m.in.: 25 patentów, 3 podręczników akademickich, 2 monografii, 94 artykułów w periodykach krajowych i zagranicznych oraz ponad 100 referatów wygłoszonych na konferencjach krajowych i zagranicznych.

