

**Maciej Kowalski, Michał Kowalski, Radosław Paszkiewicz,
Wiesław Kuczko, Radosław Wichniarek, Przemysław Zawadzki ¹⁾**

AUTOMATYZACJA PROCESU SKANOWANIA NA PODSTAWIE DANYCH POZYSKANYCH Z POMIARÓW FOTOGRAMETRYCZNYCH

Streszczenie: W pracy przedstawiona jest ogólna koncepcja automatyzacji procesu skanowania 3d wykorzystującego technologię projekcji światła strukturalnego. Danymi wejściowymi jest reprezentująca badany obiekt chmura punktów, pozyskana w wyniku pomiarów fotogrametrycznych. Uzyskany w ten sposób model jest analizowany przez specjalnie przygotowaną aplikację, w wyniku czego automatycznie wyznaczone zostają poszczególne pozycje robota przemysłowego z zamontowanym skanerem. Praca zawiera wyniki pomiarów fragmentu karoserii samochodu osobowego z wykorzystaniem skanera Atos, systemu fotogrametrycznego Tritop oraz robota przemysłowego Kuka.

Słowa kluczowe: skanowanie 3d, automatyzacja, fotogrametria, programowanie robotów, inżynieria odwrotna.

WSTĘP

Obecnie dzięki stale wzrastającemu zapotrzebowaniu na odtwarzanie komputerowych modeli istniejących już wyrobów dynamicznie rozwijają się techniki inżynierii odwrotnej [2] (ang. reverse engineering). Ich celem jest dokładne poznanie cech, wymiarów i sposobu działania badanego urządzenia. Techniki te wykorzystywane są gdy niedostępna jest dokumentacja płaska lub cyfrowa reprezentacja obiektu, który uległ uszkodzeniu lub zużyciu. Inną sferą działań konstrukcyjnych, gdzie inżynieria odwrotna ma znaczące zastosowanie jest design. W tym przypadku postać geometryczno-wymiarowa przyszłego wyrobu jest bardzo trudna do jednoznacznego określenia i opisanie. Dzieje się tak na przykład w procesie projektowania wyrobów w ujęciu ergonomicznym, czy np. kształtowania nadwozi samochodowych. Fizyczny model wyrobu zostaje określony bez użycia standardowych elementów geometrycznych, często przez artystę lub plastyka. Zapis konstrukcji takiego elementu za pomocą dokumentacji płaskiej jest trudny i zazwyczaj mało czytelny. Również utworzenie modelu trójwymiarowego jest pracochłonne i wymaga dużych kwalifikacji. Najlepszym w takim przypadku rozwiązaniem jest digitalizacja wyrobu przy wykorzystaniu narzędzi inżynierii odwrotnej.

¹ Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej, Zakład Zarządzania Produkcją, Laboratorium Wirtualnego Projektowania.

Najprostszą metodą odtworzenia obiektu jest dokonanie jego pomiarów przy użyciu ręcznych bądź zautomatyzowanych narzędzi pomiarowych, a następnie na podstawie tych danych utworzenie reprezentacji cyfrowej zazwyczaj w postaci modelu bryłowego lub powierzchniowego CAD 3D.

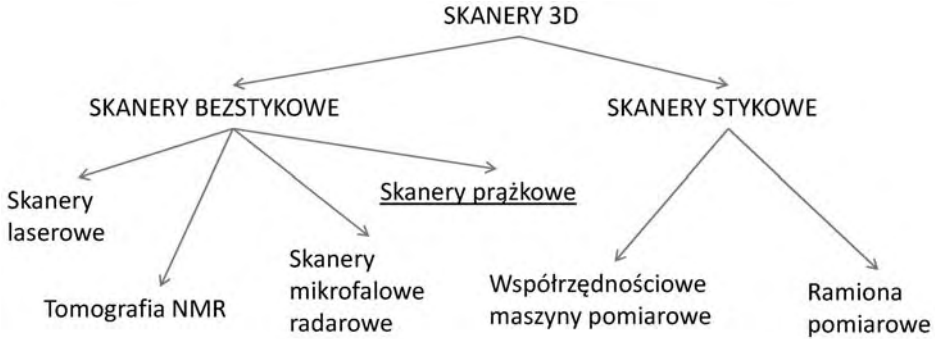
W przypadku, kiedy kształt obiektu jest zbyt skomplikowany, a zwykle pomiary nie dostarczają niezbędnej ilości danych pozwalających na budowę modelu stosuje się skanowanie 3D. Obecnie do odtwarzania kształtu obiektów bliskiego zasięgu stosuje się skanowanie optyczne wykorzystujące światło strukturalne oraz skanowanie laserowe [3, 4]. Są to metody bardzo precyzyjne, których dokładność sięga 0,02 mm, ale również czasochłonne (pomimo krótkiego czasu pojedynczego pomiaru nie przekraczającego kilku sekund). W przypadku skanowania dużych obiektów, takich jak nadwozia samochodowe występuje konieczność wykonania wielu pomiarów z różnych ujęć, co w efekcie wydłuża cały proces nawet do kilku godzin. W celu skrócenia czasu potrzebnego operatorowi skanera na oszacowanie położenia, z którego ma zostać wykonany kolejny pomiar autorzy zaproponowali opisaną w niniejszej pracy automatyzację procesu skanowania. Idea nowego rozwiązania opiera się o opracowany specjalnie na potrzeby projektu, algorytm pozwalający na wygenerowanie współrzędnych poszczególnych ustawień skanera, niezbędnych do prawidłowego odtworzenia badanego obiektu. Za bezpośrednią realizację poszczególnych położen odpowiada robot przemysłowy. Obecnie na rynku dostępne są gotowe systemy, w których skaner sprzęgnięty jest z robotem. Jednak służą one tylko jako systemy współrzędnościowe, które na podstawie dostępnego modelu CAD wyznaczają położenia skanera w przestrzeni, a następnie porównują model otrzymany w wyniku skanowania do modelu CAD tworząc kolorową mapę odchyłek. Zaproponowane przez autorów rozwiązanie oprócz wyznaczania pozycji skanera dla obiektów o znanej geometrii pozwala przede wszystkim na automatyzację procesu skanowania obiektów, których reprezentacja w formacie CAD jest niedostępna.

PODSTAWOWE INFORMACJE O TECHNICIE INŻYNIERII ODWROTNEJ (REVERSE ENGINEERING)

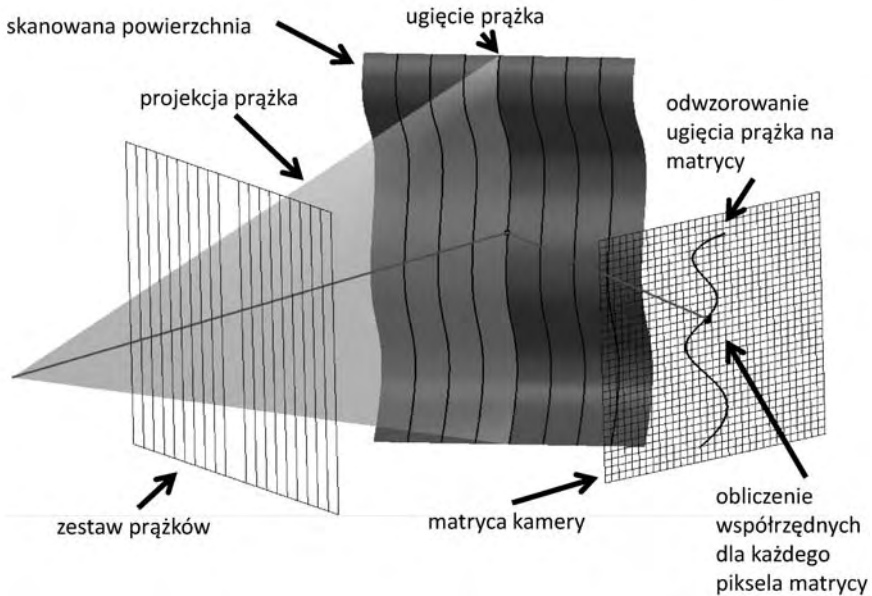
Skanowanie 3D jest techniką polegającą na odwzorowywaniu kształtu obiektu rzeczywistego i zapisywaniu go w postaci cyfrowej. Istnieje wiele metod skanowania, których podział przedstawiony został na rysunku nr 1.

Jednym z najczęściej wykorzystywanych typów skanerów w inżynierii odwrotnej są skanery optyczne oparte na projekcji światła strukturalnego tzw. skanery prążkowe. Projektor skanera dokonuje projekcji zestawu prążków o znanej gęstości na badany obiekt. Linie proste ulegają następnie zniekształceniu adekwatnemu do wielkości deformacji powierzchni obiektu, a obraz ten jest rejestrowany na matrycach kamer. Wykorzystując dane wejściowe (struktura światła, obraz zarejestrowany przez kamerę, jej parametry kalibracyjne, kąt pomiędzy kierunkiem projekcji, a kierunkiem odczytu) oraz równania matematyczne obli-

czane są współrzędne dla każdego piksela kamery. Wynikiem pojedynczego pomiaru jest chmura punktów których liczba zależy bezpośrednio od rozdzielczości stosowanych kamer. Zasadę działania skanera prążkowego przedstawia rysunek 2.



Rys. 1. Podział skanerów trójwymiarowych
Fig. 1. List of 3-dimensional scanners



Rys. 2. Zasada działania skanera prążkowego
Fig. 2. Principle of 3-dimensional scanners operation

W przypadku pomiaru dużych obiektów w celu zapewnienia wąskiej tolerancji skanowanie trójwymiarowe wspomagane jest pomiarami fotogrametrycznymi. Fotogrametria inżynierska w procesach reverse engineering pozwala na uzyskanie chmury punktów referencyjnych, będącej reprezentacją badanego obiektu na

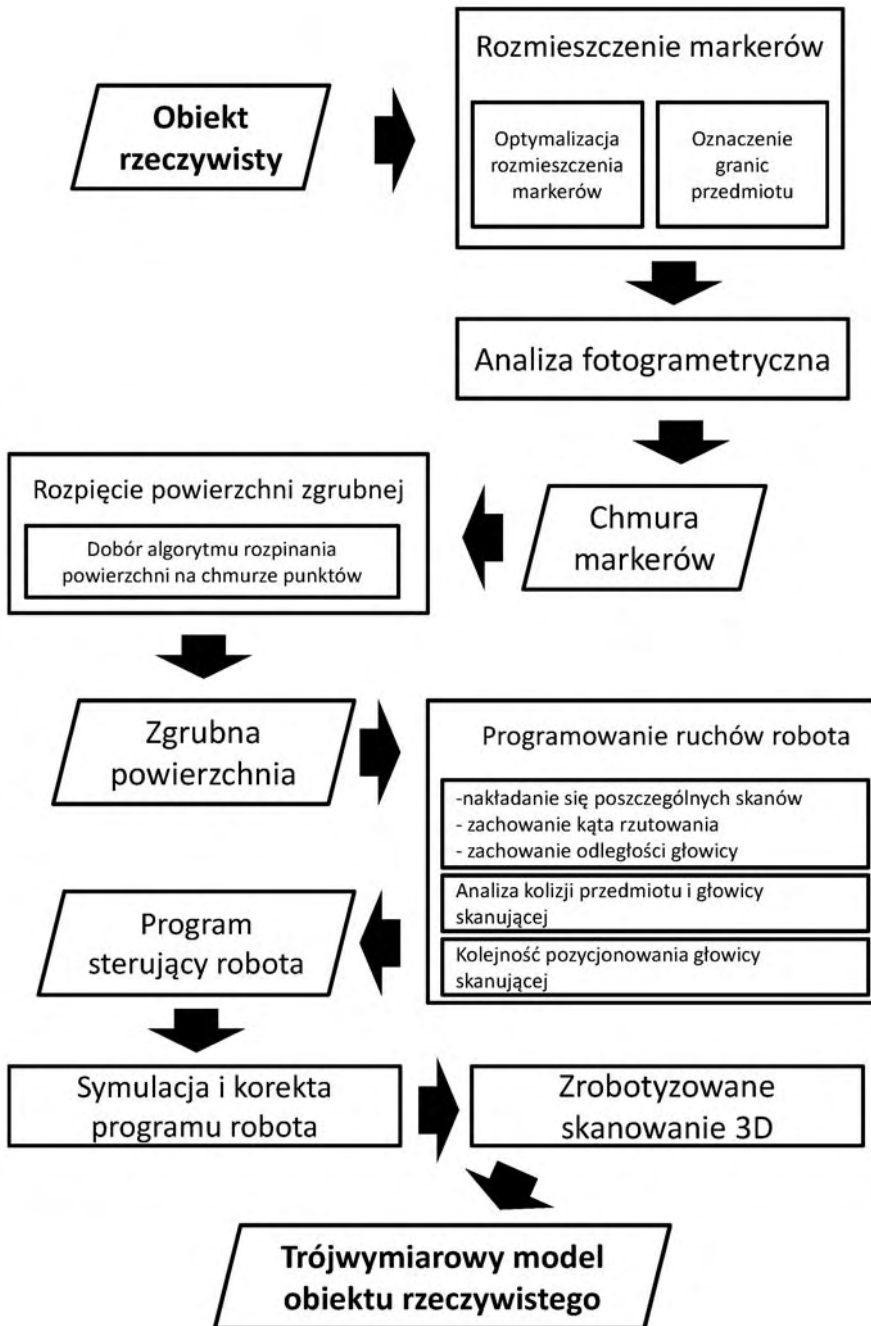
podstawie odpowiednio wykonanych zdjęć. Do przeprowadzenia analizy fotogrametrycznej niezbędny jest sprzęt fotograficzny - w zależności od wymagań wykorzystuje się kamery metryczne (fototeodolity) lub niemetryczne (wiele systemów fotogrametrycznych daje możliwość skalibrowania standardowych aparatów cyfrowych) oraz odpowiednie oprogramowanie.

W fotogrametrii bliskiego zasięgu wykorzystuje się specjalne znaczniki, których część umieszcza się na badanym obiekcie (markery), a część rozmieszcza się w jego pobliżu (znaczniki kodowe), co pozwala na wzajemną orientację wykonanych zdjęć. Ponadto na fotografowanej scenie muszą znaleźć się pręty skalujące, na podstawie których otrzymana chmura punktów będzie przeskalowana do rzeczywistej wielkości. Tak przygotowanemu obiektowi wykonuje się serię zdjęć z różnych położeń aparatu, które następnie zostają poddane analizie i automatycznie scena zostaje zrekonstruowana. Chmura punktów referencyjnych będąca reprezentacją markerów importowana jest następnie do oprogramowania skanera, co zapobiega powstawaniu błędów związanych z dopasowywaniem do siebie kolejnych „skanów”. W przypadku wykorzystywanego przez autorów skanera Atos firmy GOM, maksymalna wielkość mierzonego obiektu nie powinna przekraczać trzykrotnej wielkości pola pomiarowego wynoszącego 500x500mm. W przypadku wykorzystania pomiarów fotogrametrycznych skanowanie można przeprowadzać bez utraty dokładności nawet dla obiektów kilkunastometrowych. W przypadku zaproponowanej automatyzacji dane pozyskane tą drogą wykorzystywane są dodatkowo do tworzenia zgrubnego modelu badanego obiektu [1], na podstawie którego autorska aplikacja generuje kolejne pożądane położenia skanera w przestrzeni dla poszczególnych obszarów skanowania.

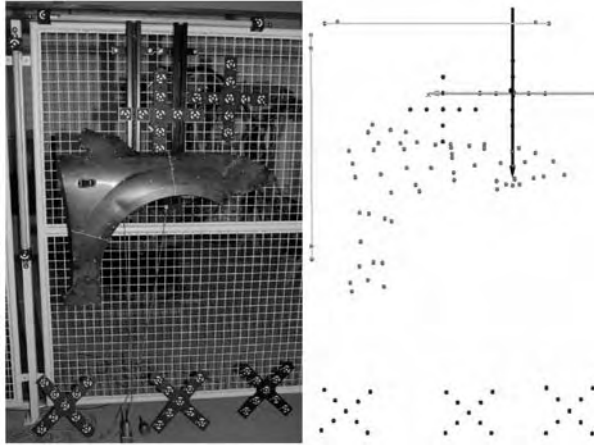
ANALIZA PROCESU ZAUTOMATYZOWANEGO SKANOWANIA

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano robota przemysłowego Kuka KR30 wyposażonego w zaprojektowany i wykonany na potrzeby projektu specjalny uchwyt do montażu skanera optycznego Gom Atos, fotogrametryczny system pomiarowy Gom Tritop oraz stworzone przez autorów oprogramowanie. Algorytm metody programowania robotów przemysłowych na podstawie danych z fotogrametrii przedstawia rys. 3.

Pierwszym etapem jest przygotowanie obiektu do pomiaru systemem Tritop. Na obiekcie rozmieszczane są znaczniki (tzw. markery) tak, aby rozpięta na chmurze punktów siatka trójkątów tworząca zgrubny model odpowiadała w maksymalny możliwy sposób obiektowi rzeczywistemu, obrazując jednocześnie miejsca charakterystyczne takie jak kieszenie czy kominki. Dodatkowo obiekty przezroczyste lub silnie refleksyjne wymagają zmatowienia przy pomocy kredy w aerozolu, ze względu na wymogi późniejszego procesu skanowania. Tak przygotowany obiekt umieszcza się na fotografowanej scenie, na której znajdują się również pręty skalujące oraz krzyże kalibracyjne (rys. 4a).



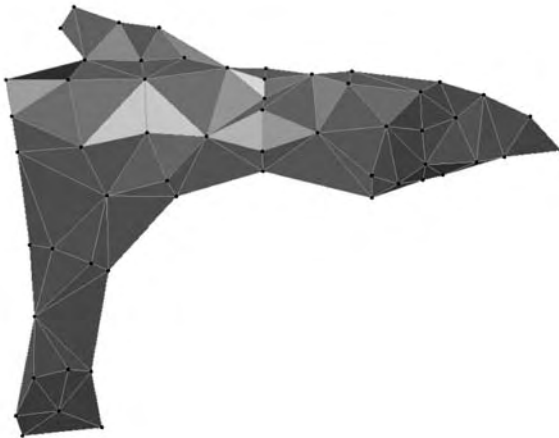
Rys. 3. Analiza procesu zautomatyzowanego skanowania
 Fig. 3. Analysis of automated scanning process



Rys. 4. Przygotowana do pomiaru oraz b) uzyskana scena

Fig. 4. a) Set to measurement and b) acquired stage

Każdy z krzyży posiada zestaw znaczków kodowych umożliwiających wzajemną orientację zdjęć, ponadto jeden z nich wyznacza początek globalnego układu współrzędnych. Kolejnym krokiem jest wykonanie zdjęć, które w trybie online przesyłane są za pomocą lokalnej sieci radiowej do komputera. Zostają one kolejno poddawane analizie obrazowej, której wynikiem jest chmura punktów referencyjnych odzwierciedlająca markery znajdujące się na obiekcie (rys. 4b). Na rys. 4b widoczne są również odwzorowane krzyże kalibracyjne wraz z lokalnym układem współrzędnych oraz pręty skalujące dobrane wielkością do badanego obiektu. Punkty w formacie REF przenoszone są do oprogramowania skanera, natomiast format IGS importowany jest do programu Catia V5, gdzie rozpinana jest siatka trójkątów zapisywana dalej w formacie STL. Na rysunku 5 przedstawiono zgrubny model błotnika z widocznymi punktami referencyjnymi.



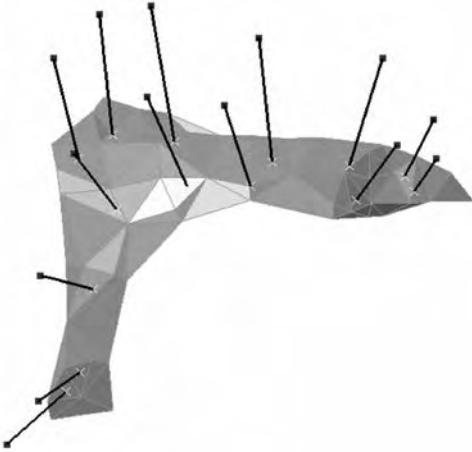
Rys. 5. Wstępny model błotnika w postaci siatki TIN

Fig. 5. Rough fender model in TIN net format

Reprezentacja powierzchni w formacie STL daje możliwość analizy informacji w nim zawartych – współrzędnych punktów wierzchołkowych, na których rozpięte są trójkąty oraz dane dotyczące wektorów normalnych do każdego trójkąta określających pozytyw oraz negatyw powierzchni. Plik STL wczytywany jest następnie do stworzonej przez autorów aplikacji. Język w jakim został napisany program wymusza stosowanie w tablicy tylko jednego typu zmiennej – liczbowej, dlatego automatycznie po wczytaniu zostają usunięte z pliku wszystkie wyrażenia tekstowe oraz puste wiersze, a dane w wierszach zostają oddzielone znakiem średnika. Pierwszym etapem algorytmu jest podzielenie całego obiektu na mniejsze wycinki, których wielkość wynika bezpośrednio z wielkości pola pomiarowego skanera. Pole pomiarowe jest powierzchnią, jednak należy też uwzględnić głębokość ostrości skanera, dlatego przyjęto założenie, że wyszukiwane będą trójkąty zawierające się w objętości będącej sześcianem o definiowalnym wymiarze „a”. Położenie pierwszego sześcianu określane jest na podstawie punktu o najmniejszych wartościach współrzędnych osiowych X, Y, Z. Sześcian budowany jest w taki sposób, że wartość „a” długości jego boku jest dodawana kolejno w dodatnich kierunkach osi X, Y, Z. Po zdefiniowaniu długości boku sześcianu oraz jego położenia w przestrzeni tworzy się filtr, który spośród danych uzyskanych z pliku STL wyszukuje wszystkie trójkąty występujące w zadanej przestrzeni. W sytuacji gdy tylko fragment trójkąta znajdzie się w obszarze sześcianu, trójkąt ten traktowany jest jako występujący w tym przedziale. Następnym etapem jest obliczenie dla wybranych trójkątów pól powierzchni, które posłużą do wyznaczenia współczynnika ważenia. Współczynnik ten określa, jaką część badanego wycinka zajmuje konkretny trójkąt.

Wektor normalny trójkąta o dużym polu jest brany pod uwagę (podczas wyznaczania średniego wektora kierunkowego rozpatrywanego fragmentu) w większym stopniu niż wektor normalny trójkąta o mniejszym polu. Następnie obliczane są środki poszczególnych trójkątów i wyznaczany jest wektor zastępczy wypadkowy dla całego badanego wycinka. Wektor wyznaczany jest na podstawie uśrednienia wartości wektorów normalnych trójkątów, biorąc jednak pod uwagę ważność poszczególnych wektorów, wyrażoną za pomocą wcześniej wyznaczonego współczynnika ważenia. Ponadto każdy z wektorów normalnych trójkątów musi znajdować się pod odpowiednim kątem w stosunku do uśrednionego wektora normalnego badanej powierzchni. Wynika to z faktu, że skaner posiada określony maksymalny „kąt patrzenia” na powierzchnię pozwalający na poprawne jej zeskanowanie. Dlatego po przyjęciu dopuszczalnego kąta sprawdzana jest wartość kąta zawarta pomiędzy uśrednionym wektorem normalnym, a wektorem normalnym każdego kolejnego trójkąta. Jeśli warunek nie jest spełniony, obliczany jest procentowy udział pól powierzchni kolejnych trójkątów w odniesieniu do powierzchni rozpatrywanego fragmentu bryły. Jeśli udział nie przekracza 2% wówczas można go pominąć, w przeciwnym przypadku trójkąt zapisywany jest razem z innymi nie spełniającymi warunku trójkątami z pozostałych obszarów w osobnym pliku. Dane te są osobno wczytywane do aplika-

cji, aby powtórzyć obliczenia. Wyznaczone w taki sposób parametry w połączeniu z położeniami wyznaczonymi podczas pierwszego cyklu obliczeń dostarczają kompletną informację dotyczącą wymaganych położen skanera. Ostatnim krokiem jest określenie odległości skanera od powierzchni, poprzez wstawienie na wygenerowanej osi „patrzenia” skanera punktu we wcześniej zdefiniowanej odległości „l” będącej optymalną odległością zapewniającą poprawne skanowanie. W analogiczny sposób wyznaczane są położenia skanera dla kolejnych fragmentów (wycinków) badanego obiektu. Na rysunku 6 przedstawiono obliczone przez algorytm położenia skanera dla skanowanego błotnika.

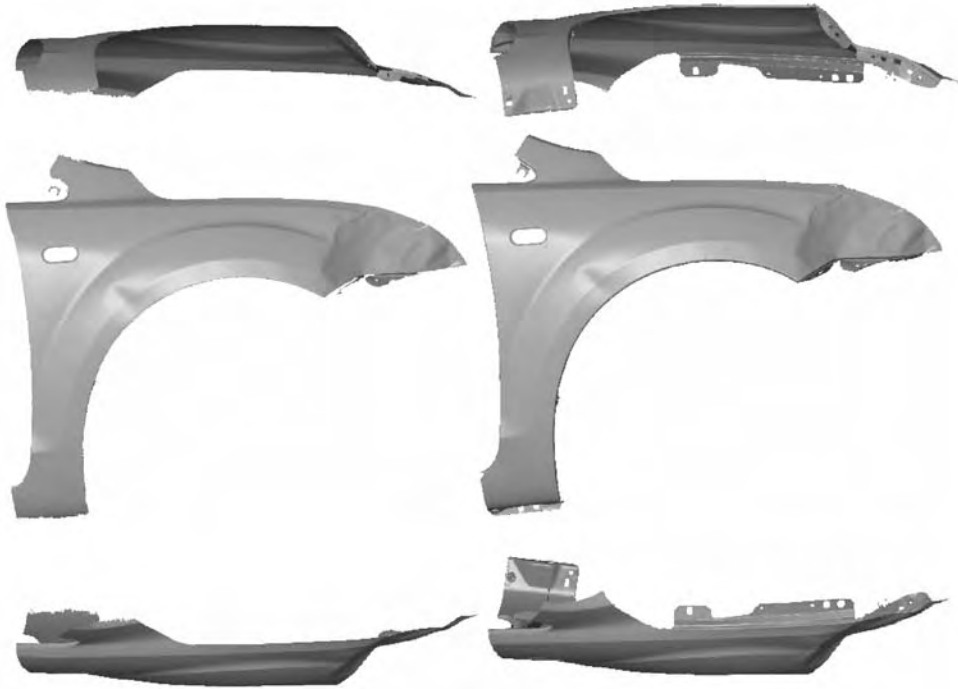


Rys. 6. Wygenerowane przez aplikację położenia skanera w przestrzeni

Fig. 6. Scanner spatial positions generated with computer software

Zadaniem robota przemysłowego Kuka KR30 jest przemieszczenie skanera do kolejnych wyznaczonych położen. Aby robot mógł spełnić to zadanie należy powiązać jego globalny układ współrzędnych z lokalnym układem wyznaczonym przez krzyż kalibracyjny. Przed przystąpieniem do skanowania, konieczna jest kalibracja tego układu, czyli wyznaczenie jego położenia i orientacji w globalnym układzie robota. Wykonuje się to poprzez wskazanie początku układu lokalnego oraz jego osi X i Y. W tym celu ustawia się robota za pomocą sterowania manualnego w taki sposób, aby wybrany, charakterystyczny, punkt efektora pokrywał się z punktami układu lokalnego. W przypadku skanowania z wykorzystaniem robota metoda ta jest wystarczająco dokładna. Należy również zdefiniować narzędzie – skaner. Początek układu narzędzia znajduje się na przecięciu osi optycznej projektora oraz płaszczyzny czołowej skanera. Punkty wygenerowane przez aplikację zostają następnie wczytane do środowiska Matlab, gdzie z wykorzystaniem macierzy transformacji jednorodnej zostają przeliczone do postaci współrzędnych charakterystycznych dla sterownika robota. W przypadku robota Kuka ramka opisująca ustawienie narzędzia (chwytaka) zawiera wektor położenia X, Y, Z oraz kąty obrotu A, B, C wokół poszczególnych osi. Po uzyskaniu przez skaner zadanego położenia użytkownik wywoływał

zdalnie proces wykonania pojedynczego ujęcia skanera, natomiast przejazd do kolejnej pozycji wyzwalany był ze skryptu uruchomianego w Matlabie. Dla przedstawionego na rysunku 7a błotnika wykonanych zostało 14 pojedynczych pomiarów.



Rys. 7. Model 3D błotnika zeskanowany : a) z wykorzystaniem proponowanej metody, b) w sposób standardowy

Fig. 7. 3D fender model a) acquired with described method, b) acquired with standard method

WNIOSKI

Wynikiem skanowania jest trójwymiarowy model błotnika w postaci siatki trójkątów (rys. 7a). Na rys. 7b przedstawiono model otrzymany w procesie skanowania z wykorzystaniem skanera zamontowanego na statywie.

Widoczne są brakujące fragmenty powierzchni w miejscach trudnodostępnych. Braki wynikają z ograniczeń metody:

- wielkość przedmiotu skanowanego zależna jest od przestrzeni pracy robota. Dla obiektów wielkogabarytowych możliwe jest przestawianie obiektu względem robota z zachowaniem globalnego układu współrzędnych w stałym miejscu i ponowne przeprowadzenie obliczeń w aplikacji.

- konieczność ręcznego przeprowadzenia dodatkowych ujęć skanera dla trudnodostępnych fragmentów obiektu takich jak wnęki, kominki czy szczeliny, jednak dzięki ponownym obliczeniom przeprowadzanym dla trójkątów nie spełniających zadanych warunków braku w modelu zostały zminimalizowane.

Niewątpliwie jednak największą zaletą tej metody jest skrócenie całkowitego procesu skanowania wynikające przede wszystkim ze skrócenia czasu potrzebnego operatorowi na przemieszczanie skanera do kolejnych pozycji. Zeskanowanie błotnika z wykorzystaniem skanera zamontowanego na statywie zajęło około godziny pracy operatora, natomiast skanowanie z wykorzystaniem robota skróciło ten czas do około 10 minut. Przygotowanie skanera oraz obiektu do procesu w obu przypadkach posiada taką samą pracochłonność (naniesienie na obiekt markerów i matowienie, dobranie odpowiedniego pola pomiarowego, kalibracja skanera). W zaproponowanej przez autorów metodzie dodatkowo należy wykonać pomiar fotogrametryczny, który dzięki analizowaniu kolejnych zdjęć na bieżąco po przesłaniu do systemu trwa bardzo krótko (dla błotnika poniżej 10 min), a w przypadku dużych obiektów również w metodzie „klasycznej” jest niezbędny. Ponadto samo rozpięcie na chmurze punktów powierzchni i jej analiza w przedstawionej aplikacji nie jest czasochłonna. Najdłużej trwa przygotowanie robota – zdefiniowanie początku globalnego układu współrzędnych oraz narzędzia w postaci skanera, jednak tą czynność wykonuje się tylko raz dla danego ustawienia krzyża, który ten układ wyznacza. Autorzy obecnie pracują nad rozwinięciem zaproponowanej metody – wykorzystaniu stołu obrotowego, który umożliwi przeprowadzenie pełnego skanowania dla obiektów średniej wielkości i rozszerzy w ten sposób jej funkcjonalność.

PIŚMIENNICTWO

1. Górski F., Kuczko W., Wichniarek R., Zawadzki P., Application of close range photogrammetry in reverse engineering, Proceedings of the 7th International Conference of DAAAM Baltic, Industrial Engineering, 2010 Tallinn, Estonia.
2. Wyleżoł M.: Inżynieria odwrotna w doskonaleniu konstrukcji. Modelowanie Inżynierskie. Gliwice 2006, nr 32, s. 485-490.
3. Kamiński W., Bojanowski K., Dumański A., Mroczkowski K., Trystuła J., Ocena możliwości wykorzystania skanera laserowego Scanstation firmy Leica w badaniu deformacji obiektów budowlanych, Czasopismo Techniczne Środowisko, 2/2008, s. 139-147.
4. Oczóś K., Cena I., Rapid inspection – metody pomiarowo-kontrolne adekwatne do rapid-technologii, Mechanik, 3/2008, s. 165-176.

AUTOMATION OF THE THREE-DIMENSIONAL SCANNING PROCESS BASED ON DATA OBTAINED FROM THE PHOTOGRAMMETRIC MEASUREMENT

Summary:

Paper presents the general concept of automation of the 3D scanning process based on structured light projection. The input data is a cloud of points representing the test object acquired through photogrammetry measurements. On the basis of these activities basic CAD model is developed and then analyzed by author application. This allows to automatic determination of different positions of the robot with a mounted scanner.

The work contains results of measurements of automobile body portion using Atos scanner, Tritop photogrammetric system and Kuka KR30 industrial robot.

Keywords: 3d scanning, automation, photogrammetry, robot programming, reverse engineering.