

**Prof. PRz dr hab. inż. Grzegorz BUDZIK^b, Prof. PRz dr hab. inż. Jan BUREK^a,
dr inż. Tomasz DZIUBEK^b, dr inż. Olimpia MARKOWSKA^c, mgr inż. Paweł TUREK^a**

^a Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Techniki Wytwarzania i Automatykacji
Rzeszow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, Dept. of Manufacturing Techniques and Automation

^b Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Konstrukcji Maszyn
Rzeszow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, Dept. of Mechanical Engineering

^c Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Katedra Odlewnictwa i Spawalnictwa
Rzeszow University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Aeronautics, Dept. of Casting and Welding

REKONSTRUKCJA GEOMETRII ŻUCHWY I KORONY ZĘBA PRZY UŻYCIU OPTYCZNYCH SYSTEMÓW POMIAROWYCH

Streszczenie

Wstęp i cel: W pracy przedstawiono metody digitalizacji powierzchni biomodeli przy użyciu optycznych systemów pomiarowych. Celem pracy było określenie dokładności odwzorowania geometrii żuchwy i korony zęba.

Materiał i metody: Zastosowano trzy systemy optyczne wykorzystujące głębie ostrości, triangulację laserową oraz metodę projekcji prążków.

Wyniki: W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono iż najbardziej odpowiednią pod kątem pomiaru tak skomplikowanych powierzchni jakimi są żuchwa i korona zęba jest metoda projekcji prążków

Wniosek: Nowoczesne optyczne systemy pomiarowe pozwalają w sposób szybki i dokładny digitalizować powierzchnie swobodne. Stanowią one alternatywę dla stykowych systemów pomiarowych

Słowa kluczowe: Głębina ostrości, model biomedyczny, optyczne systemy, triangulacja, rekonstrukcja, projekcja prążków

(Otrzymano: 10.03.2014; Zrecenzowano: 15.10.2014; Zaakceptowano: 31.11.2014)

MANDIBLE AND TOOTH CROWN SURFACE RECONSTRUCTION WITH OPTICAL SYSTEM MEASUREMENTS

Abstract

Introduction and aim: The thesis presents method of biomodel surface reconstruction with optical system measurements. The aim is to choose the best method for reconstruction mandible and tooth crown geometry.

Material and methods: It demonstrates three optical system measurements with used laser triangulation, structure light and focus variation methods.

Results: The best method for optical measurements mandible and tooth crown geometry is structure light

Conclusion: Optical system measurements enables to digitalization accurately model complex shapes like biomodels. This systems became competitive for tactile system measurements.

Keywords: Focus variation, biomodel, optical system, triangulation, reconstruction, structure light.

(Received: 10.03.2014; Revised: 15.10.2014; Accepted: 31.11.2014)

1. Wprowadzenie

Inżynieria odwrotna (*ang. Reverse Engineering, RE*) jest to proces, który umożliwia odtworzenie już istniejącego obiektu. Stosowana jest w celu poznania zasad konstrukcyjnych przedmiotu oraz co się z tym wiąże rekonstrukcji jego geometrii, a często również zasady działania. Dzięki wykorzystaniu metod inżynierii odwrotnej, możliwe jest na podstawie istniejącego obiektu, nie posiadającego dokumentacji technologicznej, konstrukcyjnej czy materiałowej, odtworzenie tych informacji. RE nierzadko uzupełnia też tradycyjny proces wytwarzania danego produktu. Dzieje się tak głównie w przypadkach, kiedy nie chodzi o innowacyjność ale o istniejące już i sprawdzone rozwiązania [4].

Zadaniem inżynierii odwrotnej jest przekształcenie istniejącego modelu na jego postać cyfrową, a to z kolei stanowi podstawę do dalszych prac konstruktorów, analiz komputerowych czy porównań tego obiektu z modelem cyfrowym. Model cyfrowy jest też wykorzystywany w szeroko stosowanych technologiach wytwarzania wspomaganego komputerowo. Bardzo często znajduje też zastosowanie w medycynie np.: przy rekonstrukcjach wewnętrznych obiektów anatomicznych czy projektowaniu implantów [2], [3], [6].

Reasumując proces inżynierii odwrotnej (rekonstrukcyjnej) polega na zastosowaniu wszelkiego typu metod pomiarowych (stykowych lub optycznych), których celem jest zdigitalizowanie obiektu fizycznego, następnie jego obróbkę i wytworzenie dostępnymi na rynku metodami wytwarzania (Rys.1).



Rys. 1. Etapy inżynierii rekonstrukcyjnej

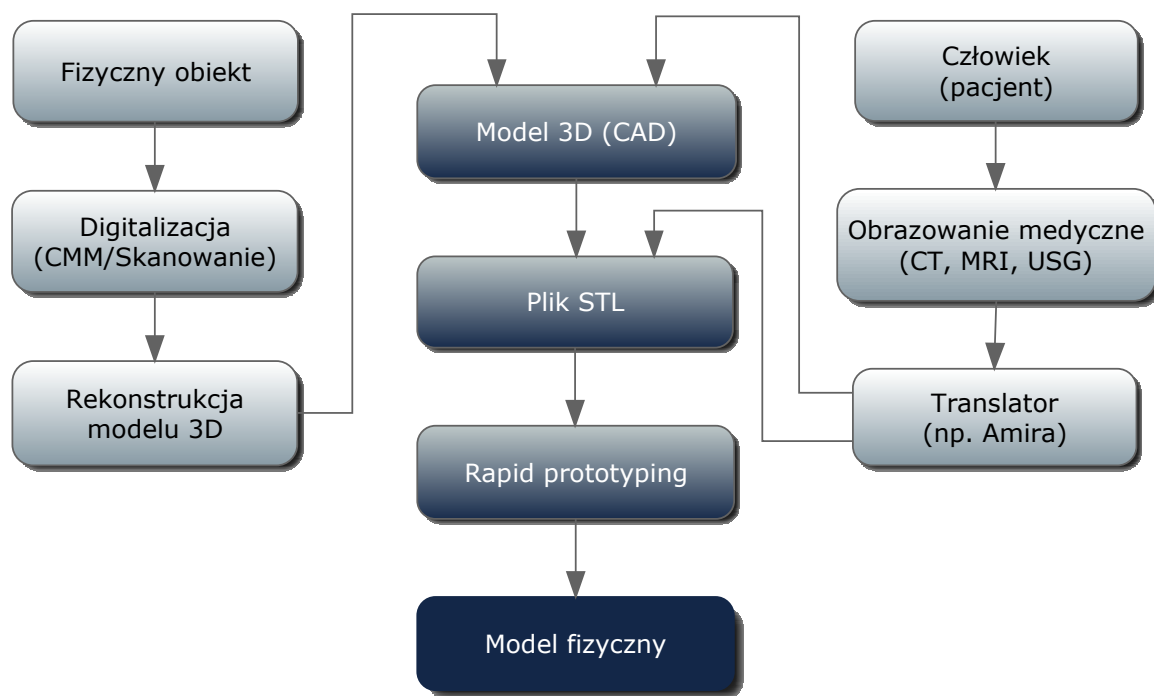
Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 1. Stages of the reverse engineering

Source: Elaboration of the Authors

W projektowaniu modeli biomedycznych można wyróżnić dwie odrębne metody ich przygotowania. Pierwszy sposób polega na wykonaniu modeli przy użyciu systemów pomiarowych optycznych lub stykowych (np. skaner laserowy, maszyna współrzędnościowa). Druga metoda polega na przygotowaniu modeli w specjalnych programach rekonstrukcyjnych, które umożliwiają sczytywanie danych DICOM, powstałych podczas procesu pomiarowego przy użyciu min. tomografu komputerowego [7], [8].

Programy te pozwalają na stworzenie trójwymiarowych obiektów ze zbioru obrazów 2D. W obu przypadkach można zapisać gotowy model w formacie STL, który jest rozpoznawalny przez urządzenia *Rapid Prototyping*. Etapy projektowania modeli biomedycznych przedstawia rysunek 2.



Rys. 2. Etapy projektowania modeli biomedycznych

Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 2. Stages of design biomodels

Source: Elaboration of the Authors

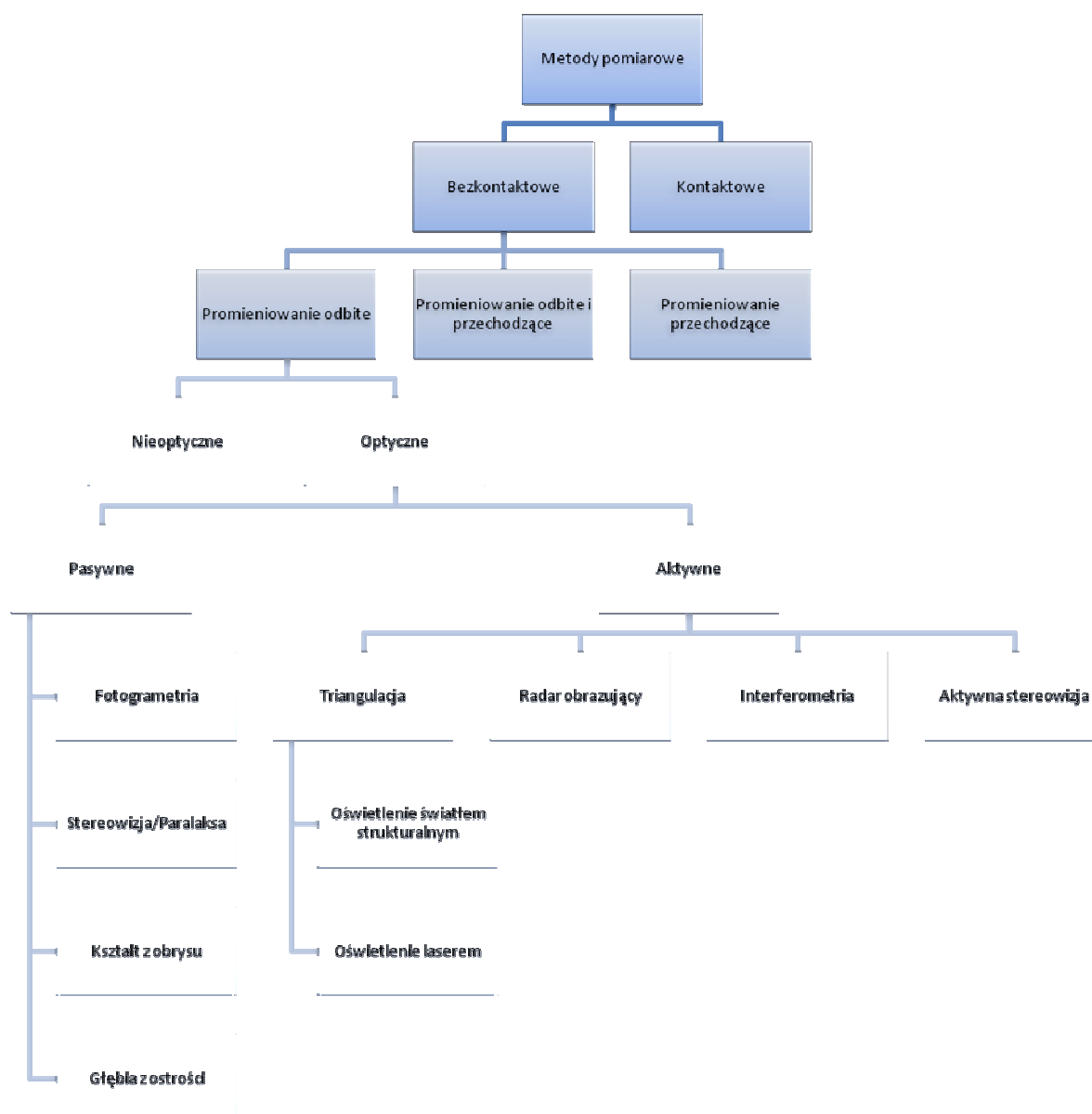
W przedstawionym artykule zostaną podjęte prace nad scharakteryzowaniem etapu pierwszego, związanego z digitalizacją danych w odniesieniu do optycznych metod pomiarowych.

2. Optyczne metody digitalizacji

Powierzchnia złożona składa się z powierzchni swobodnych, które można opisać funkcją matematyczną oraz powierzchni prostych takich jak np.: wycinek płaszczyzny, sfery, walca, stożka. Przykładem takich powierzchni może być kropla wody, powierzchnia falującego jeziora czy chociażby powierzchnia twarzy lub żuchwy człowieka. Proces akwizycji danych polega na zastosowaniu odpowiednich urządzeń, które pozwalają uzyskać informacje o geometrii danego modelu fizycznego. Dane te mają zazwyczaj postać współrzędnych (x, y, z) reprezentujących położenie punktów znajdujących się na powierzchni obiektu. Są one odniesione do lokalnego układu współrzędnych.

W przypadku obrazowania medycznego danymi wyjściowymi mogą być również obrazy 2D. Ze względu na stan przedmiotu po procesie digitalizacji oraz na rodzaj oddziaływania urządzenia pomiarowego z danym obiektem stosowane są też inne podziały metod pomiarowych, które zostały przedstawione na rysunku 3.

Optyczne metody pomiaru kształtu stanowią narzędzie opisu powierzchni obiektów trójwymiarowych, zapewniające wysoką rozdzielczość oraz zmienną czułość i zakres pomiarowy. Różne techniki mogą zostać użyte do pomiaru odległości oraz trójwymiarowej mikro- i makrostruktury badanego obiektu.



Rys. 3. Metody digitalizacji geometrii

Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 3. Methods of surface digitalization

Source: Elaboration of the Authors

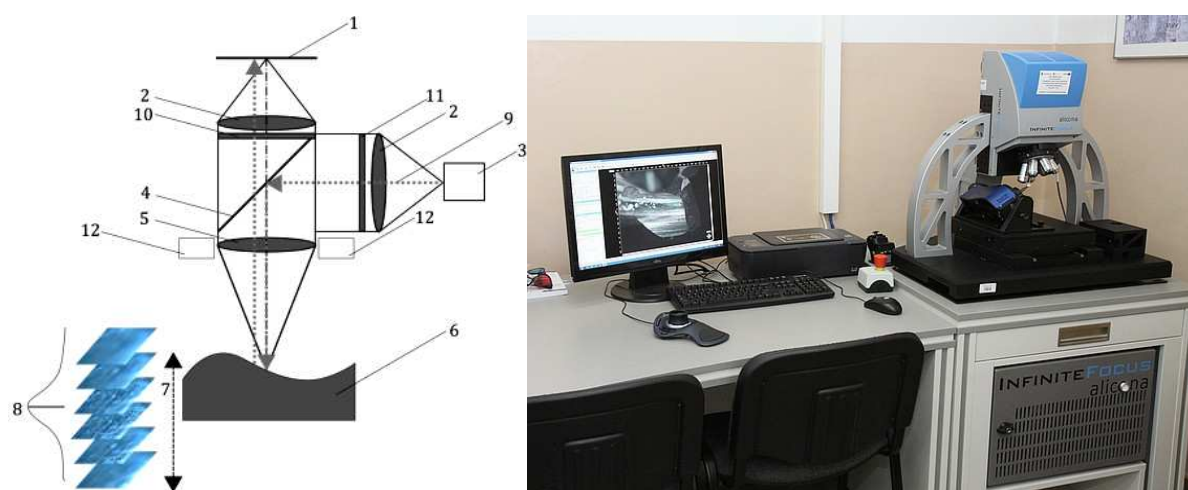
2.1. Głębia ostrości

Focus variation to innowacyjna i niezależna technika przyjęta do bieżącego projektu nowej normy ISO 25178 w celu standaryzacji optycznych urządzeń pomiarowych. Ta nowa norma po raz pierwszy obejmuje obok dotykowych również optyczne metody postępowania jak również definicję parametrów w celu obszernej charakterystyki powierzchni.

Niska głębia ostrości optyki jest stosowana do ekstrahowania informacji o głębokości powierzchni. W tym celu dokonywany jest pomiar zmiany ostrości, zależnej od topografii powierzchni. Podstawowymi elementami wchodzącymi w skład całego urządzenia są (Rys. 4):

- system optyczny do wykrywania zmiany głębokości i kontroli ostrości,
- źródła oświetlenia,
- sensor CCD,
- system napędów.

Analizowany element jest oświetlany modulowanym światłem białym. Oświetlenie współosiowe jest osiągnięte poprzez skierowanie światła do optyki i zogniskowanie go przez obiektyw na próbce za pomocą półprzezroczystego zwierciadła. Światło jest odbijane przez próbkę, a obraz jest rzutowany za pomocą precyzyjnej optyki na cyfrowy czujnik. W zależności od wybranego obiektywu istnieje możliwość realizacji różnych rozdzielczości lateralnie lub pionowo. Forma otrzymanego obrazu jest zbliżona do konwencjonalnej mikroskopii świetlnej, ponieważ wykazuje jedynie niewielką głębię ostrości.



Rys. 4. Schemat typowego układu wykorzystującego głębie ostrości wraz ze stanowiskiem pomiarowym: 1 - sensor CCD, 2 - soczewki, 3 - źródło światła białego, 4 - półprzezroczyste zwierciadło, 5 - obiektyw, 6 - próbka, 7 - skan pionowy realizowany przez system napędów, 8 - krzywa ogniskowania, 9 - wiązka światła, 10 - kontroler, 11 - polaryzator, 12 - oświetlenie pierścieniowe
Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 4. Schematic diagram of a typical measurement device based on focus variation: 1 - Sensor CCD, 2 - lenses, 3 - white light source, 4 - beam splitter, 5 - objective, 6 - specimen, 7 - vertical scan, 8 - focus curve, 9 - light beam, 10 - analyzer, 11 - polarizer, 12 - ring light
Source: Elaboration of the Authors

Następnie następuje zmiana odległości między próbką a obiektywem przy stałym rejestrowaniu obrazów. Dla każdej pozycji głębokości są odzwierciedlane ostro lub nieostro – w zależności od struktury 3D – różne obszary próbki. Zasadnicze znaczenie ma tutaj poprawne ustawienie modulowanego oświetlenia i pionowego przesuwu, realizowane za pomocą rozwiniętej technologii *SmartFlash® Alicona*.

Ostatecznie, dla każdej pozycji obiektu jest wyliczana odzwierciedlona ostrość. Następnie, w celu wyliczenia głębokości jest stosowana wariacja wartości ostrości. W ten sposób jest uzyskiwany szczegółowy widok 3D powierzchni. Zakres skanowania w kierunku pionowym wynosi od 3,2 mm do 22 mm natomiast rozdzielczość pionowa zależy od wybranego obiektywu i może osiągnąć wartość nawet 10 nm.

Obszar pomiaru w płaszczyźnie x-y dla pojedynczego skanu zależy również od wybranego obiektywu i wynosi od $0,14\text{mm} \times 0,1\text{mm}$ do $5\text{mm} \times 4\text{mm}$ (w przypadku specjalnych algorytmów można ten obszar rozszerzyć do $100\text{mm} \times 100\text{mm}$) [5].

2.2. Skanowanie laserowe

Triangulacja laserowa jest jedną z najlepiej znanych technik pomiaru obiektów 3D. Aby zmierzyć odległość od obiektu tą metodą, potrzebne jest kierunkowe źródło światła i kamera video. W układach triangulacji laserowej badana powierzchnia skanowana jest wiązką lasera, podczas gdy położenie (x,y) obrazu plamki lasera rejestrowane jest przez kamerę CCD. Wiązka światła laserowego jest odchylana przez lustro w stronę skanowanego modelu. Następnie jest ona rozpraszana na powierzchni obiektu i rejestrowana przez znacznie oddaloną kamerę. Obiektyw i detektor CCD są płaskie, z czego wynika, że pozycja piksela rozproszonego światła zależy od kąta β . Znając ogniskową f obiektywu można określić kąt β , pod którym pada rozproszone światło. Jeśli znany jest dodatkowo kąt δ to można obliczyć współrzędne punktu w przestrzeni.

Metoda ta znajduje zastosowanie przy pomiarach o małym zasięgu, ponieważ dokładność jest odwrotnie proporcjonalna do odległości lasera od przedmiotu [1]. Metoda optyczna liniowa jest rozszerzeniem triangulacji laserowej punktowej. Cechą charakterystyczną tej metody jest jednorazowe wykonywanie serii pomiarów liniowych na powierzchni skanowanego modelu (Rys. 5). Dzięki temu można jednocześnie zmierzyć całą linię na powierzchni obiektu. Stosuje się tutaj detektor w postaci matrycy CCD oraz laser, który zamiast punktów generuje linię na powierzchni obiektu. Skanery laserowe pracujące tą metodą, wykorzystuje się do pomiaru obiektów o kubaturze do 17 m^3 . Oferują one szczegółowość do $0,2\text{ mm}$ z prędkością do 81.920 punktów na sekundę i dokładnością między $0,16\text{ mm}$ a $0,37\text{ mm}$ w zależności od odległości skanowanego elementu od urządzenia.



Rys. 5. Zasada pomiaru przy użyciu skanera laserowego wraz ze stanowiskiem pomiarowym

Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 5. Schematic diagram of a typical measurement device based on laser triangulation

Source: Elaboration of the Authors

Podstawowymi wadami tych metod jest ograniczona liczba punktów, które mogą być analizowane w przypadku w pełni zautomatyzowanej obróbki danych i długi czas przetwarzania ich przetwarzania.

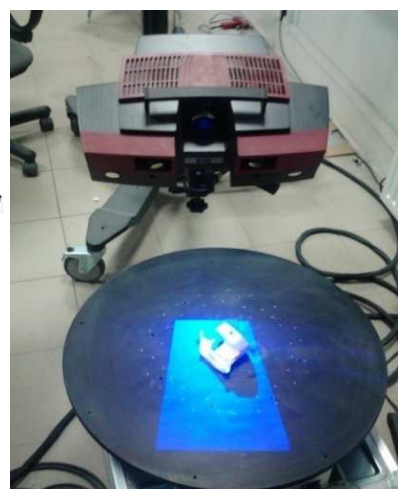
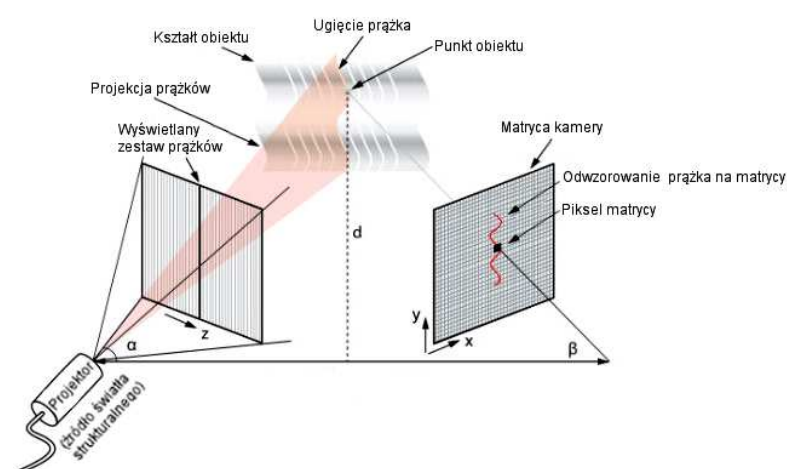
Dużo większą grupę optycznych metod pomiaru kształtu stanowią metody polowe. Ich podstawową zaletą jest fakt, że dostarczają one informację o kształcie obiektu z całego pola widzenia jednocześnie. Metody zaliczane do tej generacji opierają swoje działanie na analizie intensywności zdeformowanych obrazów prążkowych, projektowanych na powierzchnię obiektu podlegającego badaniu. Projektowane obrazy prążkowe mogą być tworzone różnymi technikami, jak np. projektowanie obrazu siatki lub prążków interferencyjnych. Zmiany wysokości i deformacje powierzchni elementu mierzonego wprowadzają zaburzenia wzoru prążkowego o znanym kształcie, który jest następnie porównywany z oryginalnym (bądź strukturą wygenerowaną syntetycznie).

2.3. Oświetlenie światłem strukturalnym

W przypadku metod polowych informację o całej powierzchni mierzonego przedmiotu można uzyskać na podstawie pomiarów metodami bazującymi na projekcji prążków (Rys. 6). Należą one do grupy metod wykorzystujących oświetlenie strukturalne, czyli takich, w których na powierzchnię obiektu mierzonego projektowany jest określony raster (lub ich sekwencja). Warunkiem poprawnego pomiaru jest dobra widoczność prążków na powierzchni obiektu (obiekty o powierzchni nie rozpraszającej lub przezroczyste mogą być mierzone po pokryciu specjalnymi warstwami typu „anti-reflex”).

Przechwytywanie przez skaner informacji o położeniu punktów w przestrzeni opiera się na zasadzie triangulacji czyli na obliczeniu miejsca przecięcia się w przestrzeni płaszczyzny utworzonej przez prążek światła strukturalnego i półprostej wychodzącej ze środka piksela matrycy kamery. Obraz rastra odkształconego na powierzchni obiektu jest poddawany analizie komputerowej, w wyniku której uzyskuje się mapę wysokości. Różnią się one między sobą pod względem liczby obrazów przetwarzanych podczas obliczeń. Istnieją metody pozwalające na określenie kształtu obiektu nawet na podstawie analizy jednego obrazu. Cechują się one jednak mniejszą dokładnością pomiaru i można je stosować do mniejszej liczby (klas) obiektów niż techniki wykorzystujące większą liczbę obrazów.

Skanery pomiarowe 3D pracujące tą metodą oferują szczegółowość do 0,01 mm z prędkością skanowania około 1.000.000 punktów na sekundę i dokładnością do 0,007 mm przy skanowaniu powierzchni o wymiarach 0,5 m × 0,5 m. Tą metodą pomiaru 3D można uzyskać większą szczegółowość i dokładność metryczną, która idealnie sprawdza się w cyfrowej rekonstrukcji skomplikowanych powierzchni biomodeli.



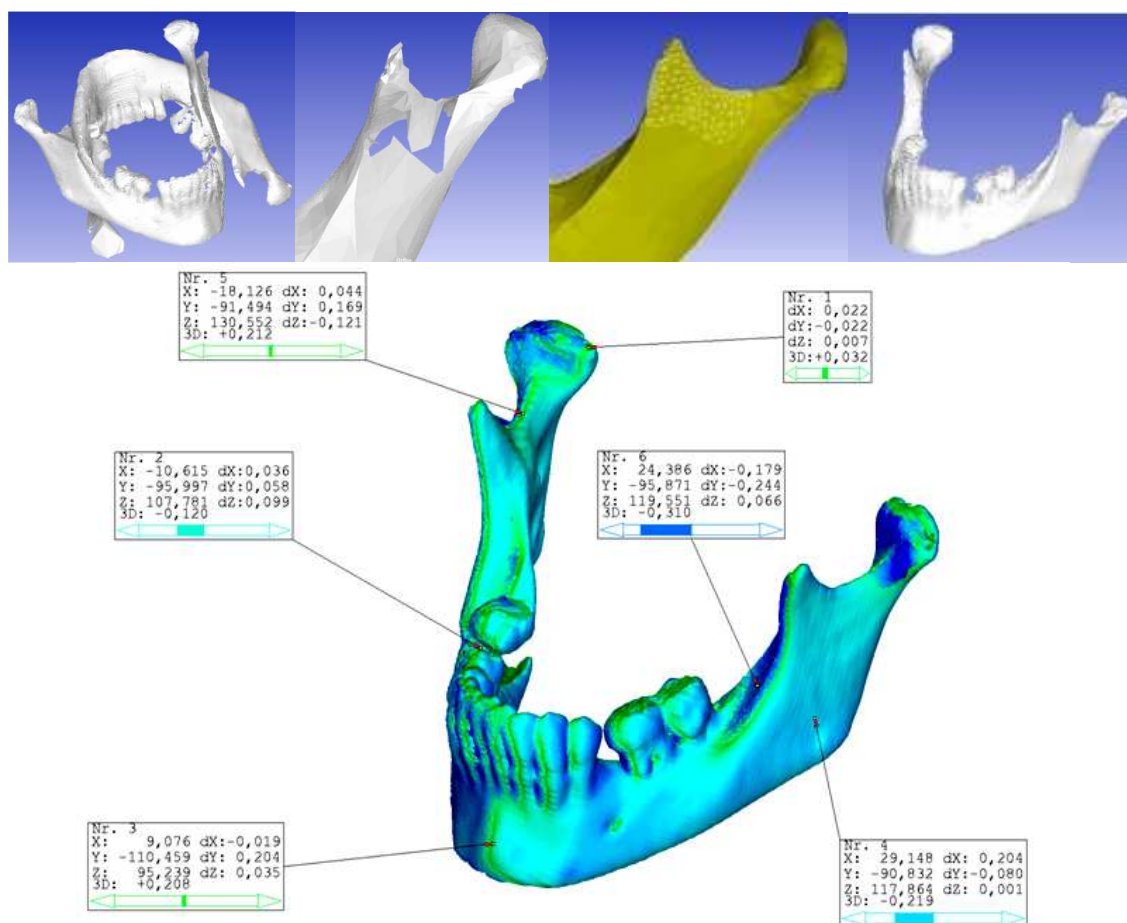
Rys. 6. Zasada pomiaru skanerem wykorzystującym światło strukturalne wraz ze stanowiskiem pomiarowym
 Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 6. Schematic diagram of a typical measurement device based on structure light
 Source: Elaboration of the Authors

Do przeprowadzenia analizy dokładności zrekonstruowania powierzchni swobodnej, wykorzystano model korony i trzonu zęba oraz żuchwy, wykonanych przy użyciu techniki *Rapid Prototyping* - (metoda FDM).

3. Przeprowadzone badania

W celu digitalizacji żuchwy wykorzystano dostępne w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatyzacji ramię pomiarowe METRIS MCA 2 wyposażone skaner laserowy MMD×100. Idea działania tego skanera, oparta jest na triangulacji laserowej. Metoda ta jest jedną z najlepiej znanych technik pomiaru obiektów 3D. Niepewność pomiaru 1σ przy użyciu MMD×100 według testów producenta wynosi $15\mu\text{m}$. Metoda ta znajduje zastosowanie przy pomiarach o małym zasięgu, ponieważ dokładność jest odwrotnie proporcjonalna do odległości lasera od przedmiotu. Do analiz poddano jedynie digitalizację żuchwy, gdyż efekt odwzorowania powierzchni korony i trzonu zęba był bardzo słaby. Proces skanowania modelu przebiegał dwuetapowo. W pierwszym etapie zeskanowano górną powierzchnię modelu, natomiast w etapie drugim obrócono szczękę w celu zeskanowania części dolnej [3]. Pomiar przeprowadzono z rozdzielczością $0,5\text{mm} \times 0,5\text{mm}$. Finalny efekt digitalizacji został przedstawiony na rysunku 7. Uzyskana powierzchnia zawierała obszary niedoskanowane, które w procesie edycji danych uzupełniono.



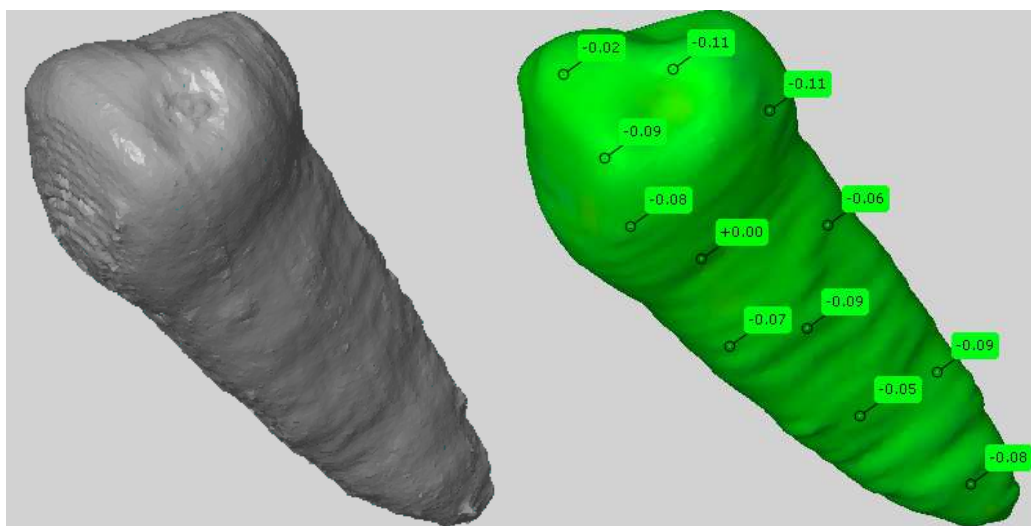
Rys. 7. Edycja obszarów i efekt końcowy digitalizacji przy użyciu skanera laserowego [3]

Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 7. Edition area and final effect of digitalization based on laser triangulation [3]

Source: Elaboration of the Authors

W przypadku pomiaru geometrii korony i trzonu zęba metodą *Focus Variation* używającą głębi ostrości, wykorzystano obiektyw o powiększeniu 2,5 \times . Przy ustawieniach tego obiektywu, zakres rozdzielczości może się wahać w pionie od 132,51 μm do 2,3 μm , a w poziomie od 58,71 μm do 6,92 μm . Tak jak i przy użyciu skanera laserowego proces przeprowadzono dwuetapowo aby móc w pełni odwzorować skanowaną geometrię. Ze względu na długi pomiar korony i trzonu zęba, nie przeprowadzono pomiaru geometrii żuchwy [2]. Efekt końcowy pomiaru geometrii przedstawiono na rysunku 8.



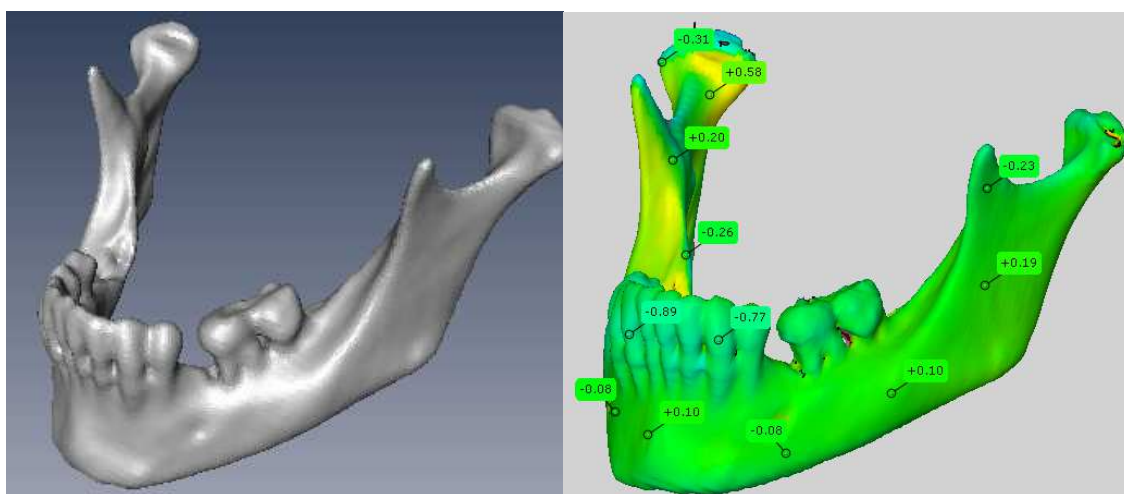
Rys. 8. Efekt końcowy digitalizacji przy użyciu urządzenia Alicona

Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 8. Final effect of digitalization based on focus variation

Source: Elaboration of the Authors

Digitalizację metodą światła strukturalnego przeprowadzono przy użyciu systemu optycznego GOM (*ang. Geometrical Optical Measurements*) znajdującego się w Katedrze Konstrukcji Maszyn na Politechnice Rzeszowskiej. W wyniku zastosowania tego systemu, wykonano serię pomiarów z różnych kierunków, stosując stolik obrotowy sterowany numerycznie [6]. Oprogramowanie systemu skanującego pozwoliło na łączenie obrazów skanowanych w celu uzyskania całej powierzchni korony i trzonu zęba oraz żuchwy.



Rys. 9. Efekt końcowy digitalizacji żuchwy przy użyciu systemu optycznego GOM

Źródło: Opracowanie Autorów

Fig. 9. Final effect of digitalization based on structure light

Source: Elaboration of the Authors

4. Wnioski końcowe

Przeprowadzono analizę dokładności uzyskanej geometrii w procesie digitalizacji danych przy użyciu trzech optycznych systemów pomiarowych. W pierwszej kolejności przeprowadzono pomiar przy użyciu systemu bazującym na świetle strukturalnym. Pomiar jest w pełni zautomatyzowany. W skład systemu wchodzi stół obrotowy oraz statyw na którym znajduje się system pomiarowy. W wyniku digitalizacji uzyskano w stosunkowo szybkim czasie i w bardzo dobrej jakości geometrię korony i trzonu zęba oraz żuchwy. Pomiar przy użyciu metody wykorzystującej głębie ostrości również jest bardzo dokładny ale czasochłonny. Wynikiem czego wykonano tylko digitalizację korony i trzonu zęba. Bezpośrednio nie uzyskano całej geometrii. Należało po wykonaniu pomiarze zestawić trzy części skanowanej geometrii w całość.

Skanowanie laserowe umożliwiło pomiar jedynie żuchwy, gdyż uzyskana powierzchnia korony i trzonu zęba nie nadawała się do analizy ze względu na bardzo słabą jakość. Błędy pomiarowe powstałe na etapie digitalizacji, wynikają z ręcznego przemieszczania skanera laserowego po powierzchni skanowanej. Nie było możliwe uzyskanie na podstawie jednego skanowania całej geometrii, więc przeprowadzono pomiar dwuetapowo.

W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono iż najbardziej odpowiednią pod kątem pomiaru tak skomplikowanej powierzchni swobodnych jest metoda bazująca na projekcji prążków. Nowoczesne optyczne systemy pomiarowe pozwalają w sposób szybki i dokładny digitalizować powierzchnie swobodne. Stanowią one alternatywę dla stykowych systemów pomiarowych.

Literatura

- [1] Bradshaw B.: *Non-Contact Surface Geometry Measurement Techniques*. Trinity College, Dublin, 1998/1999.
- [2] Burek J, Bazan A, Płodzień M, Turek P.: *Optyczna metoda rekonstrukcji geometrii koron zębów-Focus Variation*. PAK 10/2013.
- [3] Burek J., Turek P.: *Dokładność kształtu modelu szczęki dolnej wykonanego metodą technologii przyrostowej*. Mechanik, 5-6/2012.
- [4] Chlebus E.: *Mechatronika: Szybkie Prototypowanie*. 2008.
- [5] Danzl R., Helmler F., Scherer S.: *Focus Variation – a Robust Technology for High Resolution Optical 3D Surface Metrology*. Journal of Mechanical Engineering, s. 245-256, 2011.
- [6] Markowska O., Budzik G.: *The analysis of the accuracy of bone defects implants in the numerical and physical reconstruction process*. Kraków 2012.
- [7] Nather A.: *Bone grafts and bone substitutes*. World Scientific Publishing, 2005.
- [8] Wróbel I.: *Inżynieria odwrotna jako metoda tworzenia cyfrowych modeli przedmiotów o skomplikowanych kształtach*, Mechanik 3/2010.