

## Three-dimensional imaging in maxillofacial and plastic surgery

### Trójwymiarowe obrazowanie w chirurgii szczękowo-twarzowej i chirurgii plastycznej

Katarzyna Bogusiak<sup>1</sup>, Marek Kociński<sup>2</sup>, Andrzej Materka<sup>2</sup>,  
Piotr Arkuszewski<sup>1</sup>, Aleksander Przygoński<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Klinika Chirurgii Szczękowo-Twarzowej i Onkologicznej, Uniwersytet Medyczny w Łodzi, Polska  
Cranio-Maxillofacial Surgery Clinic, Medical University of Lodz, Poland  
Head: dr A. Neskromna-Jędrzejczyk

<sup>2</sup> Instytut Elektroniki, Politechnika Łódzka, Polska  
Institute of Electronics, Lodz University of Technology, Poland  
Head: prof. dr hab. inż. P. Strumillo

#### Abstract

Recent advances in technology have made three-dimensional imaging and analysis possible. Different three-dimensional technologies such as 3-D cephalometry, morphoanalysis, moiré topography, multislice CT-assisted imaging, cone beam CT and MRI scanning, 3-D laser scanning and photographic modalities have been developed. None of these imaging techniques can alone capture and represent the true relationship between facial skeleton, soft tissue and dentition. Only image fusion models of different imaging techniques can create a 3-D virtual head displaying all of these elements. On the basis of such accurate 3-D face/head reconstruction a realistic prediction model of soft and hard tissues changes can be created.

#### Streszczenie

Najnowsze osiągnięcia technologiczne sprawiły, że możliwe jest zarówno obrazowanie, jak i jego analiza w technologii trójwymiarowej. Opracowano różne jej typy, takie jak cefalometria 3D, analiza morfologiczna obrazu fotograficznego i radiologicznego, topografia mory, wielorzędowa tomografia komputerowa (CT), tomografia wiązki stożkowej (CBCT) oraz skanowanie MRI, skanowanie laserowe 3D, a także różnorakie metody robienia zdjęć. Jednak żadna z tych technik obrazowania nie może indywidualnie uchwycić i przedstawić prawdziwego związku pomiędzy twarzoczaszką, tkanką miękką a uzębieniem. Jedynie fuzja modeli obrazów z różnych technik obrazowania może pozwolić stworzyć wirtualny trójwymiarowy model głowy, przy jednoczesnym uwidocznieniu wszystkich wymienionych elementów. Na podstawie tak dokładnej trójwymiarowej rekonstrukcji twarzy/głowy można stworzyć realistyczny model predykcyjny zmian następujących w tkankach miękkich i tkankach twardych.

#### KEYWORDS:

maxillofacial surgery, 3-D imaging, 3-D model, 3-D reconstruction, face

#### HASŁA INDEKSOWE:

chirurgia szczękowo-twarzowa, obrazowanie 3D, model 3D, rekonstrukcja 3D, twarz

#### Introduction

For the past decades, plastic, maxillofacial surgeons and orthodontists used photographs and conventional radiographs for treatment planning. These methods determined current understanding

#### Wprowadzenie

Przez ostatnie dziesięciolecia chirurdzy plastyczni oraz chirurdzy szczękowo-twarzowi, a także ortodonci, wykorzystywali zdjęcia i konwencjonalną radiografię jako podstawę służącą

of facial aesthetics and proportion. Various ratios and measurements obtained from the profile and frontal view that characterize aesthetically desired face proportion have been described.<sup>1,2</sup> Despite the passage of time, pre-operative and post-operative cephalometric analysis of hard tissues, basing on cephalograms and photographs, is still frequently performed. These techniques limit the quantitative assessment of hard and soft tissue changes solely to the midsagittal plane. Only linear distances, angles and areas can be measured.<sup>3,4</sup> Such assessment is also connected with bias arising from representing three-dimensional (3-D) objects (anatomical structures of the head/face) on a two-dimensional (2-D) image. Despite such shortcomings, many 2-D surgical treatment planning computer programs, based on both bone and soft tissue analysis, have been developed. Evaluation concerning the three-dimensional anatomy of the patient has traditionally been limited to physical examination and to the analysis of dental study plaster models. Due to recent advancement in technology three-dimensional imaging and analysis is possible. Emerging 3-D methods of anatomical structure acquisition include three-dimensional cephalometry, morphoanalysis, moiré topography, computer tomography-assisted 3-D imaging, 3-D ultrasonography, 3-D laser scanning and stereophotogrammetry. Lately, methods based on image fusion of different imaging techniques have been extensively developed, being especially valuable in orthognathic surgery and orthodontics. New software systems offer new possibilities for surgeons and orthodontists to plan, perform and assess the treatment outcomes. Potential clinical utilities of reviewed methods are presented in Table 1.<sup>5-19</sup>

The above-mentioned applications necessitate sufficient accuracy in reliable representation of anatomical structures of the head/face and the neck. Some studies validating the reproducibility of identifying landmarks of 3-D imaging proved that the accuracy is relatively high and its values range from 0.2 to 1 mm (depending on the applied method).<sup>3,20-25</sup> Due to the fact that these techniques are fairly new, the normative data of craniofacial structures including hard and soft tissues are

do planowania leczenia. Metody te umożliwiły obecny sposób rozumienia proporcji oraz estetyki twarzy. Opisano również różnorakie stosunki oraz pomiary pozyskane dzięki widokowi z boku oraz z przodu, które charakteryzują proporcje twarzy pożądane pod względem estetycznym.<sup>1,2</sup> Pomimo upływu czasu, nadal niezwykle często wykonuje się przedzabiegową i pozabiegową analizę cefalometryczną tkanek twardych, bazując na cefalogramach i zdjęciach. Techniki te ograniczają ilościową ocenę zmian w tkankach twardych i tkankach miękkich wyłącznie do płaszczyzny środkowej. Możliwe jest zmierzenie jedynie odległości liniowych, kątów, a także powierzchni.<sup>3,4</sup> Tego rodzaju ocena wiąże się również ze stronniczością wynikającą z trójwymiarowego (3D) przedstawiania obiektów (struktur anatomicznych głowy/twarzy) na dwuwymiarowym (2D) obrazie. Pomimo tak poważnych braków, powstało wiele programów komputerowych umożliwiających planowanie leczenia chirurgicznego na poziomie 2D, bazujących na analizie obejmującej kość i tkankę miękką. Ocena dotycząca trójwymiarowej anatomii pacjenta była tradycyjnie ograniczona do badania fizykalnego, jak również do analizy gipsowych diagnostycznych modeli dentystycznych. Dzięki ostatnim osiągnięciom w zakresie technologii możliwe jest zarówno obrazowanie, jak i analiza trójwymiarowa. Nowo powstałe trójwymiarowe metody obrazowania struktury anatomicznej obejmują cefalometrię 3D, analizę morfologiczną obrazu fotograficznego i radiologicznego, topografię mory, obrazowanie 3D wspierane tomografią komputerową, ultrasonografię 3D, skanowanie laserowe 3D oraz stereofotogrametrię. W ostatnim czasie widać niezwykle rozwój metod opierających się na fuzji obrazów z różnych technik obrazowania, co jest szczególnie cenione zwłaszcza w chirurgii ortognatycznej, a także w ortodoncji. Nowe oprogramowania oferują nowe możliwości zarówno chirurgom, jak i ortodontom, dając im pole do planowania, przeprowadzania, a także oceniania wyników leczenia. Potencjalna użyteczność kliniczna metod objętych przeglądem została przedstawiona w tabeli 1.<sup>5-19</sup>

Wymienione aplikacje wymagają właściwej dokładności w zakresie wiarygodnego odzwier-

**Table 1.** Potential clinical applications of three-dimensional imaging techniques

Authors	Method used	Clinical application	Study design
<i>Ferrario et al.</i> <sup>5</sup>	Stereophotogrammetry	Assessment of appearance of changes related to growth	Mesh diagram analysis of 3-D coordinates of 50 soft tissue landmarks. Study group: 591 people (351M and 240F; 6-40 years old)
<i>Akazaki et al.</i> <sup>6</sup>	3-D laser scanning	Assessment of appearance of changes related to aging	3-D morphometric analysis of depth and width of skin wrinkles. Study group: 101 women (20-80 years old)
<i>Nute and Moss</i> <sup>7</sup>	3-D laser scanning	Assessment of gender and age-related dimorphism of appearance	3-D coordinates of soft tissue landmarks. Study group: 132 children (5-10 years old)
<i>Giovanoli et al.</i> <sup>8</sup>	3-D video analysis system	Assessment of facial expressions of emotions	Study group: 24 people (22-70 years old)
<i>Gur et al.</i> <sup>9</sup>	3-D video analysis, stereophotogrammetry (4 digital cameras and a camcorder)	Assessment of facial expressions of emotion	Digital database of 3-D photographs of actors displaying facial expressions of different emotions and intensity levels for use in neurocognitive studies. Study group: 139 people (70M and 69F)
<i>Okada</i> <sup>10</sup>	3-D laser scanning	Assessment of facial expressions	Quantitative measurements of angles and areas associated with function of mimetic muscles during facial expressions. Study group: 7 healthy volunteers and 3 patients with nerve palsy
<i>Khambay et al.</i> <sup>11</sup>	Fusion method, stereophotogrammetry and 3-D spiral CT	Monitoring and assessment of surgery outcome	Assessment of soft tissue changes after orthognathic surgery
<i>Ferrario et al.</i> <sup>12</sup>	Stereophotogrammetry	Monitoring and assessment of surgery outcome	Different methods of images superimposition were compared. Assessment of soft tissue changes after orthognathic surgery. Study group: 20 patients (14M, 6F), 8-26 years old
<i>Moss et al.</i> <sup>13</sup>	3-D laser scanning	Monitoring and assessment of surgery outcome	Assessment of soft tissue changes related to bone remodeling after tooth extraction in comparison with non-treatment group. Study group: 16 non-extraction and 18 extraction patients
<i>Ferrario et al.</i> <sup>14-17</sup>	Stereophotogrammetry	Monitoring and assessment of surgery outcome	Quantitative 3-D assessment (on the basis of calculating specific distances, areas, volumes with a set of certain landmarks) of soft tissue facial asymmetry in adult patients after cleft lip and palate surgery
<i>Ji et al.</i> <sup>18</sup>	3-D laser scanning	Planning of facial reconstruction	Planning a reconstruction of burn defect with flap surgery. One patient with scar contracture of the face
<i>Xia et al.</i> <sup>19</sup>	CT – assisted 3-D imaging	Surgery planning	3-D virtual reality surgical planning and simulation of orthognathic surgery with visualization of osteotomy and soft tissue changes

M – male, F – female.

limited. Nevertheless, there are some studies that provide some standards and norms.<sup>5,26</sup>

## **Methods of three-dimensional imaging**

### **2.1 Three-dimensional cephalometry**

This technique is based on two standardized cephalograms performed in lateral (LAT) and posteroanterior (PA) projection. From a set of 2-D rentgenographic images an analysis of 3-D form can be performed.<sup>27</sup> A set of reconstructed 3-D landmarks could be presented by means of a wire frame.<sup>27</sup> Many modifications have been applied and several computer programs have been developed since the very first introduction of this method.<sup>27-31</sup> The main advantage of this method is that it has an available normative database and involves low radiation dose. Unfortunately, locating the same landmarks is still difficult. Moreover, hard and soft tissues assessment is limited to the midsagittal plane.

### **2.2 Morphoanalysis**

This method of three-dimensional head reconstruction is based on superimposition of photographs on radiographs. The position of the patient's head is standardized according to three Cartesian reference planes. Two stereo pairs of videocameras, one stereo pair at each side of the patient's face, are used. This allows precise measurement of anatomical landmarks. Nonetheless, high cost of equipment is seen as a great disadvantage of this method.<sup>4</sup>

### **2.3 Moiré topography**

This optical method for three-dimensional quantitation utilizes moiré pattern that appears after distortion of projecting a straight-line grid on the facial surface. This moiré fringe pattern can be detected by a camera or video camera and coordinates of any point on the face can be obtained. In 3-D head modeling, laser grating is applied to the face, and computer program can detect moiré fringes and use them to create a 3-D model.<sup>32</sup> This method is useful in obtaining digital 3-D dental model from dental plaster cast.<sup>33</sup> Unfortunately, this method is not sufficient as far as detecting sharp features is concerned, and

ciędlania struktur anatomicznych głowy/twarzy oraz szyi. Niektóre z badań oceniających odtwarzalność pod kątem identyfikacji punktów odniesienia obrazowania 3D dowiodły, że dokładność jest stosunkowo duża, a jej wartość waha się od 0,2 do 1mm (w zależności od zastosowanej metody).<sup>3,20-25</sup> Normatywne dane w zakresie struktur twarzowo-czaszkowych obejmujące tkanki twarde i miękkie są ograniczone, ponieważ techniki te są jeszcze stosunkowo nowe. Mimo wszystko, istnieją pewne badania, które dają określone standardy i normy.<sup>5,26</sup>

## **Metody obrazowania trójwymiarowego**

### **2.1. Cefalometria trójwymiarowa**

Powyższa technika opiera się na dwóch znormalizowanych cefalogramach wykonanych w projekcji bocznej (LAT) i tylnoprzodniej (PA). Na podstawie zestawu obrazów rentgenograficznych 2D można przeprowadzić analizę formy 3D.<sup>27</sup> Zestaw odtworzonych punktów odniesienia 3D można przedstawić w formie drucianej siatki.<sup>27</sup> Od czasu pojawienia się tej metody wprowadzono wiele modyfikacji, jak również opracowano sporą liczbę programów komputerowych jej dotyczących.<sup>27-31</sup> Główną przewagą tej metody jest fakt, iż oferuje ona dostęp do normatywnej bazy danych, co więcej, wiąże się z niską dawką promieniowania. Niestety, umiejscowienie tych samych punktów odniesienia jest nadal trudne. Ponadto, ocena twardych i miękkich tkanek ogranicza się do płaszczyzny środkowej.

### **2.2. Analiza morfologiczna obrazu fotograficznego i radiologicznego**

Ta metoda trójwymiarowej rekonstrukcji głowy bazuje na nałożeniu fotografii na radiogramy. Pozycja głowy pacjenta jest znormalizowana zgodnie z trzema referencyjnymi płaszczyznami kartezjańskimi. Wykorzystuje się tutaj dwie pary wideokamer stereo, po każdej stronie twarzy pacjenta znajduje się jedna para kamer. Pozwala to na precyzyjne zmierzenie anatomicznych punktów odniesienia. Niemniej jednak, wysoki koszt sprzętu stanowi sporą niedogodność tej metody.<sup>4</sup>

it does not include information concerning 3-D bone structure. This technique is also vulnerable to changes in head positioning. Moreover, survey preparation is time consuming.<sup>34</sup>

#### 2.4 Three-dimensional ultrasonography

Three-dimensional ultrasonography is a useful technique in tissue imaging, however currently has a limited application in orthognathic and facial plastic surgery. Soft tissue facial scanning is performed with a special probe that comes into contact with the skin, which is covered with a special gel. Although this technique is not expensive and is safe for the patient, it has too many disadvantages to be used routinely. Three-dimensional ultrasonography gives no information about the texture of the surface, the survey is time consuming and the acquired data can be confounded by surface compression.<sup>35</sup>

#### 2.5 Three-dimensional laser scanning

This method is based on projecting known patterns of light to infer an object's shape. A laser beam reflected from the facial surface is distorted in a way which corresponds to facial topography. This reflection is registered by a digital camera. Many systems utilizing methods based on projection of a bright spot of light, a stripe of light (these techniques are called serial methods – they need to scan the whole object to get the whole shape) have been developed, not to mention methods using a 2-D pattern of light that can be projected to cover the scene (parallel light stripes, colored stripes, a grid of dots). Diversity of available scanning systems includes those with a fixed light source (the scanned object needs to be rotated), systems with a set of fixed light sources, as well as systems with rotated light sources.<sup>36</sup> There are also systems that facilitate scanning an object from any direction, due to a set of cameras detecting the laser light and electromagnetic sensors detecting the orientation and position of the device in relation to the scanned object. Three-dimensional laser scanning is a very useful and accurate method not only for capturing the soft tissue, but also for visualizing the dentition. Three-dimensional dental model is obtained after

#### 2.3. Topografia mory

Ta optyczna metoda kwantyfikacji trójwymiarowej wykorzystuje wzorzec prążków mory, który pojawia się po zniekształceniu siatki z linii prostych wyświetlanej na powierzchni twarzy pacjenta. Ten wzorzec odkształcenia prążków mory można wykryć za pomocą aparatu lub kamery video i można uzyskać współrzędne każdego punktu na powierzchni twarzy. Jeśli chodzi o trójwymiarowe modelowanie głowy, na twarz nakłada się siatkę laserową, a program komputerowy może wykryć zniekształcenia prążków mory i wykorzystać je do stworzenia modelu trójwymiarowego.<sup>32</sup> Metoda ta okazuje się skuteczna w zakresie uzyskiwania cyfrowego stomatologicznego modelu 3D ze stomatologicznego odlewu gipsowego.<sup>33</sup> Niestety, metoda ta jest niewystarczająca, jeśli chodzi o wykrywanie punktów szczytowych, jak również nie zawiera informacji dotyczących struktury kostnej 3D. Technika ta jest także podatna na zmiany w zakresie ułożenia głowy. Co więcej, przygotowanie projektu jest niezwykle czasochłonne.<sup>34</sup>

#### 2.4. Ultrasonografia trójwymiarowa

Ultrasonografia trójwymiarowa jest techniką przydatną w zakresie obrazowania tkanki, niemniej jednak, obecnie ma ona ograniczone zastosowanie w chirurgii ortognatycznej i chirurgii plastycznej twarzy. Skanowanie tkanki miękkiej w obrębie twarzy wykonuje się za pomocą specjalnej sondy, która ma styczność ze skórą, pokrytą specjalnym żelem. Mimo, iż technika ta nie należy do drogich, a także jest bezpieczna dla pacjenta, charakteryzuje się zbyt dużą liczbą niedogodności, aby mogła być wykorzystywana w rutynowy sposób. Trójwymiarowa ultrasonografia nie daje żadnych informacji na temat faktury powierzchni, przygotowanie jej jest niezwykle czasochłonne, a uzyskane dane może zakłócić kompresja powierzchni.<sup>35</sup>

#### 2.5. Skanowanie laserowe 3D

Metoda ta opiera się na wyświetlaniu znanych wzorów światła, które pozwalają wywnioskować kształt danego obiektu. Wiązka laserowa odbija się od powierzchni twarzy i zniekształca się w sposób odpowiadający topografii twarzy. Właśnie to odbi-

scanning dental plaster cast or a wax bite.<sup>37,38</sup> Obtaining such a 3-D model requires preparation of the plaster cast. Some researchers, however, designed a method that does not require destruction of dental casts.<sup>39</sup> With the use of laser scanning there is also a possibility to obtain digital dental model by direct intraoral scanning of the patient's teeth in occlusion with the help of an intraoral scanning device and a dedicated spray. Although this modification facilitates obtaining digital dentition model without plaster cast or impression, it is inconvenient when used in everyday practice. Limitation on the wide use of this technique in soft tissue imaging is connected with long acquisition time (even up to 30s), depending on the laser scanner that is being used, and this increases the risk of movement confounders. Moreover, to achieve colored facial texture an expensive set with multiple laser beams is needed. This method is sensitive to light and the presence of metal objects.

### 2.6 Stereophotogrammetry (3-D photography)

This is an optical method, which gives the opportunity to use photographs to estimate the three-dimensional coordinates of points on the object. It requires taking at least two photographs from different positions. Then, common landmarks are identified on each image. Since the position of cameras and their focal length in relation to the object is known due to triangulation, it is also possible to determine the location of points. To obtain a more accurate 3-D model more than two cameras can be used. 3-D stereophotogrammetry is a reliable and valuable tool with no side effects for the patient. Other advantages include relatively low costs of the method and quick capture speed. This method enables not only the creation of a model based on 3-D coordinates, but it also provides realistic colour and texture data for computer-generated 3-D shape.<sup>40</sup>

### 2.7 Three-dimensional video imaging

This technique is similar to stereophotogrammetry; the only difference lies in the fact that video cameras are used instead of cameras.<sup>41</sup>

cie zostaje zarejestrowane przez kamerę cyfrową. Opracowano wiele systemów wykorzystujących metody opierające się na wyświetlaniu jasnej plamki świetlnej, wiązki światła (techniki te nazywane są metodami seryjnymi – konieczne jest przeskanowanie całego obiektu, aby uzyskać całkowity kształt), nie wspominając o metodach wykorzystujących dwuwymiarowy wzór świetlny, który można wyświetlić pokrywając całą powierzchnię (równoległe wiązki światła, kolorowe wiązki, raster punktowy). Różnorodnie dostępne obecnie systemy skanowania obejmują systemy ze stałym źródłem światła (skanowany obiekt musi być obracany), systemy składające się z zestawu stałych źródeł światła, jak również systemy z obrotowym źródłem światła.<sup>36</sup> Istnieją również systemy, które ułatwiają skanowanie obiektów z każdej strony, gdyż są wyposażone w zestaw kamer wykrywających światło lasera, jak również czujniki elektromagnetyczne wykrywające ustawienie i pozycję urządzenia w stosunku do skanowanego obiektu. Trójwymiarowe skanowanie laserowe jest niezwykle przydatną i bardzo dokładną metodą służącą nie tylko do odzwierciedlenia tkanki miękkiej, ale również do wizualizacji całego uzębienia. Trójwymiarowy model stomatologiczny uzyskuje się po skanowaniu odlewu stomatologicznego lub odcisku z wosku.<sup>37,38</sup> Uzyskanie takiego modelu 3D wymaga przygotowania odlewu gipsowego. Niemniej jednak, niektórzy badacze odkryli metodę, która nie wymaga niszczenia odlewów stomatologicznych.<sup>39</sup> Za pomocą skanowania laserowego można również uzyskać cyfrowy model stomatologiczny dzięki skanowaniu uzębienia pacjenta podczas zgryzu wewnątrz jamy ustnej, co z kolei jest możliwe dzięki wykorzystaniu specjalnego urządzenia skanującego wnętrze jamy ustnej oraz odpowiedniego aerozolu. Mimo, iż powyższa modyfikacja ułatwia uzyskanie cyfrowego modelu uzębienia bez konieczności wykonywania odlewu lub odcisku, jest stosunkowo niewygodna podczas wykonywania codziennej praktyki. Ograniczenia związane z powszechnym użyciem tej techniki w zakresie obrazowania tkanki miękkiej wiążą się z długim czasem pobierania danych (nawet do 30s), w zależności od użytego skanera, a to zwiększa ryzyko przesunięcia się potencjalnych czynników zakłócających. Co więcej, aby uzyskać barwną struk-

## 2.8 Computed tomography-assisted three-dimensional imaging

Sequential axial CT scans can be reconstructed to produce life-size head model. Many approaches for creating facial skeleton reconstructions have been applied. Three-dimensional milled model, stereolithographic model and two-stage resin model have been proposed.<sup>42-50</sup> Although such facial skeleton models allow three-dimensional assessment of anatomical structures and deformities, next to performing model surgery, they do not provide the possibility to visualize and simulate soft tissue changes.<sup>51-55</sup> On the basis of two-dimensional cross-sectional CT scans 3-D digital reconstruction of facial skeleton can be also performed.

The quality of images acquired with computed tomography is high, but the position of image acquisition is horizontal, and this affects the face proportion and natural shape of soft tissues. Moreover, this method is expensive and requires high radiation dose, which is connected with the appearance of streak artifacts.<sup>56</sup> Some authors used this method not only to obtain a 3-D skeleton model but also to create a dental model after scanning dental impressions.<sup>38</sup>

## 2.9 Cone-beam computed tomography (CBCT)

In comparison with multislice CT, this technique utilizes a lower dose of ionizing radiation, it is cheaper and much more accessible. Position of image acquisition is vertical and the head and soft tissues can be captured in a neutral position. This method is used to visualize skeleton and dentition. Digital dental cast can be obtained in two different methods with the use of CBCT. The first one is based on scanning dental plaster cast or dental impression and is connected with pouring the cast.<sup>38,57</sup> The second one is based on rendering a 3-D dental model from DICOM images of the patient. This method is vulnerable to metal artifacts.<sup>57,58</sup>

## 2.10 Magnetic resonance imaging (MRI)

This method is safe (no ionizing radiation) and accurate in imaging soft tissues. High cost, horizontal position of image acquisition and

ture twarży, konieczne jest użycie drogiego zestawu z wielokrotnymi wiązkami laserowymi. Metoda ta jest wrażliwa na jasne i metalowe przedmioty znajdujące się w miejscu wykonywania procedury.

## 2.6. Stereofotogrametria (zdjęcia 3D)

Jest to metoda optyczna, która daje możliwość wykorzystania zdjęć do oszacowania trójwymiarowych współrzędnych punktów w badanym obiekcie. Metoda ta wymaga wykonania co najmniej dwóch zdjęć z dwóch różnych pozycji. Następnie, na każdym obrazie rozpoznaje się wspólne punkty odniesienia. Ponieważ pozycja aparatów i ich ogniskowych w stosunku do badanego obiektu jest znana dzięki triangulacji, możliwe jest również określenie umiejscowienia poszczególnych punktów. Aby uzyskać dokładny model 3D, można wykorzystać więcej niż 2 aparaty. Stereofotogrametria 3D to wiarygodne i wartościowe narzędzie, które nie wiąże się z żadnymi efektami ubocznymi dla pacjenta. Inne korzyści wynikające z tej metody to stosunkowo niski koszt i szybkość przechwytywania danych. Powyższa metoda daje możliwość nie tylko stworzenia modelu opartego na współrzędnych 3D, ale również przedstawia rzeczywiste dane dotyczące koloru oraz struktury trójwymiarowego kształtu wygenerowanego komputerowo.<sup>40</sup>

## 2.7. Obrazowanie 3D

Technika ta jest podobna do stereofotogrametrii; jedyną różnicą polega na tym, że zamiast aparatów fotograficznych wykorzystuje się tutaj kamery video.<sup>41</sup>

## 2.8. Obrazowanie trójwymiarowe wspierane tomografią komputerową

Obrazy sekwencyjnej osiowej tomografii komputerowej można rekonstruować, aby opracować komputerowy model głowy naturalnej wielkości. Zastosowano wiele prób w celu stworzenia rekonstrukcji twarzoczaszki. Opracowano frezowany model trójwymiarowy, model stereolitograficzny oraz model z żywicy nowolakowej.<sup>42-50</sup> Mimo, iż tego rodzaju modele twarzoczaszki pozwalają na trójwymiarową ocenę struktur anatomicznych oraz deformacji anatomicznych, a nawet umożli-

long acquisition time (the risk of movement artifacts) makes it impractical for regular application in facial plastic surgery, orthodontic and orthognathic treatment planning. Moreover, the bone data are not accurate enough for skeletal reconstruction.<sup>59-61</sup>

The above-mentioned methods rely on image-based approaches in 3-D face reconstruction. There are also methods utilizing a model-based idea.

### 2.11 Model-based face reconstruction

These techniques use models of human face with some characteristic features that can be deformed to align specific facial shapes and expressions. Most such methods of 3-D facial imaging are based on Candide Model – a parametrized facemask that contains 113 vertices and 184 triangles on the human face.<sup>62</sup>

### 2.12 Image fusion models

Lately, for more accurate head model reconstruction image fusion techniques have been extensively developed. This approach is especially valuable in orthognathic and orthodontic field, as it facilitates accurate analysis of three important components of the patient's face influenced by the treatment. Such a 3-D fusion head model is realistic, accurate and represents the true relationship between facial skeleton, soft tissue and dentition. Different matching methods are used to fuse 3-D data, and different sets of imaging methods are used to reconstruct the final 3-D head model. Possible fusion models are presented in Table 2.<sup>4,11,20,27,29,,38,53,57,63-80</sup>

wiąją przeprowadzenie zabiegu na danym modelu, nie dają jednak możliwości dokonania wizualizacji i symulacji zmian zachodzących w tkankach miękkich.<sup>51-55</sup> Trójwymiarową, cyfrową rekonstrukcję twarzoczaszki można również przeprowadzić w oparciu na dwuwymiarowych obrazach uzyskanych podczas skanowania w płaszczyźnie poprzecznej.

Jakość obrazów uzyskanych dzięki tomografii komputerowej jest wysoka, aczkolwiek pozycja niezbędna do uzyskania obrazu to pozycja horyzontalna, co ma wpływ na proporcje twarzy, a także naturalny kształt tkanek miękkich. Ponadto, powyższa metoda jest kosztowna i wymaga dużej dawki promieniowania, co wiąże się z kolei z pojawieniem się artefaktów liniowych.<sup>56</sup> Niektórzy autorzy wykorzystywali tę metodę nie tylko, aby uzyskać trójwymiarowy model szkieletu, ale również, aby stworzyć model stomatologiczny po zeskanowaniu wycisków stomatologicznych.<sup>38</sup>

### 2.9. Tomografia wiązki stożkowej (CBCT)

W porównaniu do wielorządowej tomografii komputerowej, technika ta wykorzystuje niższą dawkę promieniowania jonizującego, jest tańsza i o wiele bardziej dostępna. Pozycja podczas pozyskiwania obrazu to pozycja pionowa, w związku z czym głowa i tkanki miękkie mogą zostać uchwycone w pozycji neutralnej. Metoda ta jest wykorzystywana do wizualizacji szkieletu oraz uzębienia. Istnieją dwa sposoby pozyskania cyfrowych odlewów stomatologicznych przy zastosowaniu CBCT. Pierwszy z nich opiera się na skanowaniu stomatologicznego odlewu gipsowego lub wycisku stomatologicznego i wiąże się z koniecznością wykonania samego odlewu.<sup>38,57</sup> Drugi sposób bazuje na przedstawieniu trójwymiarowego modelu stomatologicznego na podstawie obrazów cyfrowych DICOM pacjenta. Metoda ta jest wrażliwa na artefakty ze strony obiektów metalowych.<sup>57,58</sup>

### 2.10. Rezonans magnetyczny (MRI)

Ta metoda jest bezpieczna (brak promieniowania jonizującego), co więcej, jest dokładna, jeśli chodzi o obrazowanie tkanek miękkich. Wysoki koszt, horyzontalna pozycja podczas pozyskiwa-



**Table 2.** Comparison of different fusion methods of 3-D imaging.

Authors	Imaging methods			Bite registration	Registration method
	Facial skeleton	Soft tissue	Dentition		
<i>Moate et al.</i> <sup>63</sup>	Lateral cephalogram	2-D photo	None	None	Point based
<b>Method description.</b> 2-D photos are superimposed on the cephalogram and virtual patient model is created.					
<b>Advantages.</b> Low dose of ionizing radiation. Easy to perform			<b>Disadvantages.</b> Purely 2-D technique.		
<i>Marchetti et al.</i> <sup>64</sup>	CT, cephalogram	None	None	None	Point based
<b>Method description.</b> 3-D model of hard and soft tissue is generated based on CT scan and cephalogram.					
<b>Advantages.</b> Accurate and realistic method.			<b>Disadvantages.</b> High dose of ionizing radiation, lack of detailed information about dentition.		
<i>Aoki et al.</i> <sup>65</sup>	Frontal and lateral cephalograms		None	None	Point based
<b>Method description.</b> 3-D model is built based on 3-D photographs and on the basis of anatomical knowledge. The change within the shape of the facial surface was predicted in 3-D. The predicted result was compared to the actual result (patient after surgery) and then evaluated.					
<b>Advantages.</b> Low dose of ionizing radiation. Easy to perform.			<b>Disadvantages.</b> Low accuracy.		
<i>Tsuji et al.</i> <sup>66</sup>	Frontal and lateral cephalograms	None	3-D laser scanning of dental cast	Plaster dental cast	Point based
<b>Method description.</b> Data concerning facial skeleton and dentition are used for intraoperative navigation system based on optical tracking system with video cameras and light-emitting diodes (two video cameras follow the 3-D coordinates of LED assemblies attached to the head, lower jaw and the handpiece).					
<b>Advantages.</b> Navigation system facilitates performing the surgery.			<b>Disadvantages.</b> Time-consuming, information concerning soft tissues limited to the midsagittal plane.		
<i>Grayson et al.</i> <sup>27</sup>	Frontal and lateral cephalograms	None	None	None	None
<b>Method description.</b> Method is based on simulation of stereophotogrammetry using only cephalogram images.					
<b>Advantages.</b> Low dose of radiation, simple and practical for quantitative or long-term serial analysis.			<b>Disadvantages.</b> Inability to represent curving form in three dimensions, soft tissues assessment limited to the midsagittal plane.		
<i>Baumrind et al.</i> <sup>29</sup>	PA and lateral cephalograms	None	3-D virtual dental cast	Plaster dental cast	
<b>Method description.</b> Different methods of superimposition are implemented. The first type of superimposition involves a tooth-by-tooth registration. The second superimposition is a 3-D analog of cephalometric superimposition 'on "best fit" of palatal anatomy' or 'on mandibular border'. Such superimpositions are based on specific biological information about the regions of growth and of relative stability within the human jaws. The third type of superimposition is designed to permit quantification of changes in the positional relationship of each jaw and its contained teeth with respect to biologically stable structures of the skull as represented by the bony base of the anterior cranial fossa.					
<b>Advantages.</b> Low dose of ionizing radiation.			<b>Disadvantages.</b> The fusion process is time consuming. This is a semi 3-D technique.		
<i>Ayoub et al.</i> <sup>4</sup>	Frontal and lateral cephalograms	Stereo pair of video cameras	None	None	Point based
<b>Method description.</b> Two stereo pairs of video cameras at each side of the patient's face allow a rapid capture of the face in three dimensions and a cephalogram almost simultaneously, enabling a more accurate superimposition of soft and hard tissues. This system can be used for precise measurement of anatomic landmarks.					
<b>Advantages.</b> Low dose of ionizing radiation.			<b>Disadvantages.</b>		

**Table 2.** cont

Authors	Imaging methods			Bite registration	Registration method
	Facial skeleton	Soft tissue	Dentition		
<i>Nakasima et al.</i> <sup>67</sup>	Frontal and lateral cephalograms	3-D photo	CT scanned dental cast	Plaster dental cast	Point based
<p><b>Method description.</b> The 3-D reconstruction of a person's head was performed by fitting the prototype standard head model with an individual one based on the data obtained from cephalograms, photos and digital dental cast. The least squares method was also used in the triangle-matching procedure.</p> <p><b>Advantages.</b> Low dose of ionizing radiation, accurate method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Registration errors caused by differences in head positioning, different facial expressions and artifacts during images acquisition.</p>					
<i>Noguchi et al.</i> <sup>68</sup>	3-D cephalometry	Laser scanning	3-D laser scan of dental cast	Plaster dental cast	Surface based
<p>A projection-matching technique is used to integrate soft tissue, skeleton and dentition data. The mandibular form is simulated by transforming a generic model to match the patient's cephalometric data.</p> <p><b>Advantages.</b> Low dose of ionizing radiation, accurate method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Registration errors caused by differences in head positioning, Different facial expressions and artifacts during images acquisition.</p>					
<i>Gateno et al.</i> <sup>69</sup>	CT	None	3-D laser /CT scanning of dental cast	Plaster dental cast	Based on the fiducial markers
<p><b>Method description.</b> Registration method is performed with the use of fiducial markers. All surgical procedures could be planned/tested on a virtual model.</p> <p><b>Advantages.</b> Good visualization of the interocclusal relationship.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Fusion process is time consuming, high dose of ionizing radiation, expensive</p>					
<i>Nkenke et al.</i> <sup>53</sup>	CT	None	3-D optical scan of dental cast and CT scan of dental cast	Plaster dental cast	Based on the fiducial markers
<p><b>Method description.</b> Two CT and 3-D optical scans of plaster cast with and without metal restoration were performed. Differences between these images were calculated. Then CT scans of the patient were acquired. Collected data were used to create 3-D simulation model.</p> <p><b>Advantages.</b> Good visualization of the interocclusal relationship.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Fusion process is time consuming, expensive, with high dose of ionizing radiation; the accuracy of optical 3-D surface scanning of dental arches is significantly reduced by metal artifacts.</p>					
<i>Schutyser et al.</i> <sup>57</sup> <i>Swennen et al.</i> <sup>70</sup>	CT	None	CT scan of dental cast	Plaster dental cast	Point based with a splint with markers
<p><b>Method description.</b> This is a double scan technique of acquisition dental occlusion. During the first CT scan patient wears the splint between upper and lower teeth. Then, the splint is positioned between plaster casts of the upper and lower jaw, and this setup is scanned. Based on markers in the 3-D splint, both data sets are fused and a combined visualization is possible.</p> <p><b>Advantages.</b> Good visualization of the interocclusal relationship.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Fusion process is time consuming, high dose of ionizing radiation, expensive.</p>					
<i>Swennen et al.</i> <sup>71</sup>	CT	None	CT scan of wax impression	wax impression/wax wafer	Point based
<p><b>Method description.</b> Virtual skull model is created on the basis of CT skeletal scans. Impressions of the upper and lower arches and the wax bite wafer are scanned using a high-resolution standardized multislice CT. Automatic rigid point-based registration is used to implement the digital virtual dental arches into the patient's skull model.</p> <p><b>Advantages.</b> High accuracy, good visualization of the interocclusal relationship</p> <p><b>Disadvantages.</b> Fusion process is time consuming, high dose of ionizing radiation, expensive.</p>					

Table 2. cont

Authors	Imaging methods			Bite registration	Registration method
	Facial skeleton	Soft tissue	Dentition		
<i>Uechi et al.</i> <sup>72</sup>	CT	None	Laser scan of dental cast	Plaster dental cast	Point based with a splint with markers
<p><b>Method description.</b> Reconstruction of 3-D skull model based on presurgical CT scan. Creation of virtual dentition models at pre- and postsurgical intercuspul positions (based on 3-D surface scans of plaster dental cast). Three steps of intermodality registration are performed to obtain final fusion model.</p> <p><b>Advantages.</b> 3-step registration provides precision, possibility of simulating orthognathic surgery in 3-dimensional space, good visualization of the interocclusal relationship.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Fusion process is time consuming, high dose of ionizing radiation, expensive.</p>					
<i>Girod et al.</i> <sup>73</sup>	CT	3-D laser scanning	None	None	Surface based
<p><b>Method description.</b> 3-D CT scans of bone structure are integrated with 3-D laser scan of soft tissue. Surgical changes in bone structure are mapped to the soft tissue model.</p> <p><b>Advantages.</b> Good visualization of the interocclusal relationship.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Fusion process is time consuming, high dose of ionizing radiation, expensive.</p>					
<i>Ayoub et al.</i> <sup>74</sup>	CT	3-D photography	None	None	Surface based
<p><b>Method description.</b> The 3-D CT scan and the photo-realistic soft-tissue surfaces were registered for superimposition with Procrustes registration method. The registration errors were relatively big around the eyebrows, eyelids and cheeks. Simultaneous recording of the face and skull may reduce this error.</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate and realistic method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> High dose of ionizing radiation, lack of detailed information about dentition.</p>					
<i>Groeve et al.</i> <sup>75</sup>	CT	3-D photography	None	None	Surface based
<p><b>Method description.</b> Skin surface is extracted from CT scan by thresholding. 3-D photograph is registered with skin surface using 3-D surface matching algorithm.</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate and realistic method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> High dose of ionizing radiation, lack of detailed information about dentition.</p>					
<i>Khambay et al.</i> <sup>11</sup>	CT	3-D photography	None	None	Surface based
<p><b>Method description.</b> The 3-D image acquired with 3-D photography and CT images were registered for superimposition by 3 different methods: Procrustes superimposition using artificial landmarks, Procrustes analysis using anatomic landmarks, and partial Procrustes analysis using anatomic landmarks and then registration completion by HICP (a modified Iterative Closest Point algorithm) using a specified region of both images.</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate and realistic method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> High dose of ionizing radiation, lack of detailed information about dentition.</p>					
<i>Olszewski et al.</i> <sup>76</sup>	CT	MRI	3-D laser scan of dental cast	Plaster dental cast	
<p><b>Method description.</b> Simulation of bone and TMJ movements can be performed. Cephalometric analysis is used to determine the 3-D reference frame for planning bone movements.</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate and realistic method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> High dose of ionizing radiation, lack of detailed information about dentition.</p>					
<i>Xin et al.</i> <sup>77</sup>	CT	3-D Stereo-photogram-metry	None	None	
<p><b>Method description.</b> 3-D head model is created based on patient's CT scans. Genetic algorithm was used to impose the image obtained from 3-D stereo-grammetry procedure on the head model.</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate and realistic method.</p> <p><b>Disadvantages.</b> High dose of ionizing radiation, lack of detailed information about dentition.</p>					

Table 2. cont

Authors	Imaging methods			Bite registration	Registration method
	Facial skeleton	Soft tissue	Dentition		
Swennen et al. <sup>78</sup>	CBCT	2D photo	CBCT scan of dental cast	Plaster dental cast	Voxel based
<p><b>Method description.</b> Triple Voxel-based rigid registration is used for "triple" cone-beam computed tomography (CBCT). The patient is scanned with a wax wafer (it keeps the correct position of head), then the patient with Triple Tray AligiNot impression is scanned and then scan of the impression is done.</p> <p><b>Advantages.</b> Lower dose of ionizing radiation. Accurate method for surgical planning.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Time consuming, registration errors caused by differences in head positioning, Different facial expressions and artifacts during image acquisition.</p>					
Barone et al. <sup>79</sup>	CBCT	Laser scanning (surface structured light scanning)	None	Plaster dental cast	Surface based
<p><b>Method description.</b> Laser scan of dental tissue and CBCT are fused to create multi-body orthodontic models.</p> <p><b>Advantages.</b> Lower dose of ionizing radiation. Accurate and photorealistic digital representation of the face.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Time consuming, registration errors caused by differences in head positioning, Different facial expressions and artifacts during image acquisition.</p>					
Jayarante et al. <sup>80</sup>	CBCT	3-D Stereo-photogram-metry	None	None	Surface based
<p><b>Method description.</b> Each of two pods of cameras contains two monochromatic and one color camera. Triangulation algorithm is used to create a 3-D photo. Then CBCT is made and both 3-D images are automatically aligned by computer software. Using reference areas (periorbital and nasolabial region) the 3-D photo is registered on CBCT scan (at first manually, then automatically).</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate and realistic method, images, low dose of radiation.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Time consuming, generates high cost, impractical in clinical use.</p>					
Maal et al. <sup>20</sup>	CBCT	3-D photo	None	None	Surface based
<p><b>Method description.</b> Different modalities of 3-D surface-matching algorithm (Iterated closest point algorithm) were tested. The registration errors were relatively large at the lateral neck, mouth and around the eyes.</p> <p><b>Advantages.</b> Lower dose of ionizing radiation. Accurate and photorealistic digital representation of the face.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Time consuming, registration errors caused by differences in head positioning, Different facial expressions and artifacts during image acquisition.</p>					
Rangel et al. <sup>38</sup>	None	3-D photo	CT scan of impression	Dental impression	Surface based
<p><b>Method description.</b> Three digital data sets are integrated: a digital dental cast, a digital 3-D photograph of the patient with cheek retractors to expose teeth in occlusion, and a digital 3-D photograph of the patient with normal facial expression with the teeth in occlusion. Special iterated closest point algorithm is used to match these data sets and to place them in the correct anatomical position.</p> <p><b>Advantages.</b> Accurate method of facial soft tissue reconstruction, possibility of objective evaluation and quantitative assessment of soft tissue changes after orthognathic surgery.</p> <p><b>Disadvantages.</b> Lack of information about facial skeleton.</p>					

## Conclusion

New 3-D surface acquisition methods and emerging software systems for data analysis are constantly being improved. Creating an accurate 3-D model of an individual patient presents new opportunities in dental, orthodontic, orthognathic and aesthetic fields. Due to the fact that many

nia obrazu, a także długi czas jego pozyskiwania (ryzyko powstania artefaktów ruchowych) sprawia, że metoda ta jest niepraktyczna w przypadku regularnego jej zastosowanie w zakresie planowania zabiegów chirurgii plastycznej twarzy, a także w planowaniu leczenia ortodontycznego oraz ortognatycznego. Co więcej, dane dotyczące kości

of these techniques are new there are limited data concerning norms and standards (normative data) related to anatomical structures. Among the reviewed methods image fusion models appear to be the most accurate and realistic tools for analysis documentation, treatment planning and follow-up in plastic, reconstructive, orthognathic surgery and orthodontic treatment. On the basis of these techniques, a realistic prediction model of soft and hard tissue changes can be created.

nie są wystarczająco dokładne, aby przeprowadzić rekonstrukcję szkieletu.<sup>59-61</sup> Metody trójwymiarowej rekonstrukcji twarzy, o których mowa powyżej opierają się na podejściu obrazowym. Istnieją również metody wykorzystujące ideę bazującą na modelu.

### **2.11. Rekonstrukcja twarzy oparta na wzorcowym modelu**

Omawiane techniki wykorzystują modele ludzkiej twarzy z pewnymi cechami charakterystycznymi, które mogą ulec deformacji w celu wyregulowania określonego kształtu i ekspresji twarzy. Większość tego rodzaju metod trójwymiarowego obrazowania twarzy opiera się na modelu twarzy typu CANDIDE – maska z parametrami, która zawiera 113 punkty oraz 184 trójkąty na ludzkiej twarzy.<sup>62</sup>

### **2.12. Modele fuzji obrazów**

W ostatnim czasie odnotowano niezwykle rozwój technik bazujących na fuzji obrazów, które pozwoliłyby na uzyskanie dokładniejszej rekonstrukcji modelu głowy. Tego rodzaju podejście jest szczególnie wartościowe w dziedzinie ortodoncji i ortognatyki, ponieważ ułatwia ono dokładną analizę trzech istotnych komponentów twarzy pacjenta, które mogą ulec zmianie pod wpływem leczenia. Tego typu trójwymiarowy, fuzyjny model głowy jest rzeczywisty, dokładny, a także przedstawia realny związek pomiędzy twarzoczaszką, tkanką miękką a uzębieniem. Do połączenia danych trójwymiarowych wykorzystuje się różne metody łączenia danych, podobnie jak w przypadku rekonstrukcji ostatecznego trójwymiarowego modelu głowy, gdzie wykorzystuje się różne zestawy metod obrazowania. Możliwe modele łączenia obrazów przedstawiono w tabeli 2.<sup>4,11,20,27,29,,38,53,57,63-80</sup>

### **Wniosek**

Nowe metody pozyskiwania powierzchni trójwymiarowych oraz opracowywane oprogramowania służące do analizy danych są ciągle ulepszane. Stworzenie dokładnego modelu 3D dla indywidualnego pacjenta daje nowe możliwości w dziedzinie stomatologii, ortodoncji, ortognatyki i es-

tetyki. Ponieważ wiele z tych technik to nowe techniki, dane dotyczące norm i standardów (dane normatywne) skupiające się na strukturach anatomicznych są bardzo ograniczone. Przegląd metod obrazowania pozwala na stwierdzenie, że modele pozyskane przy wykorzystaniu metody fuzji obrazów wydają się być najbardziej dokładnymi i realistycznymi narzędziami służącymi do analizy dokumentacji, planowania leczenia oraz kolejnych działań w zabiegach chirurgii plastycznej, rekonstrukcyjnej i ortognatycznej, a także w leczeniu ortodontycznym. Na podstawie opisanych w artykule technik można stworzyć realistyczny model predykcyjny zmian w zakresie tkanki miękkiej i tkanki twardej.

## References

1. Kokoska MS, Thomas JP: 35-mm and digital photography for the facial plastic surgeon. *Facial Plast Surg* 2000; 8: 35-44.
2. Arnett GW, McLaughlin RP: *Facial and Dental Planning for Orthodontists and Oral Surgeons*. Edinburgh: Mosby; 2004.
3. Nkenke E, Langer A, Laboureux X, Benz M, Maier T, Kramer M, et al.: Validation of in vivo assessment of facial soft-tissue volume changes and clinical application in midfacial distraction: a technical report. *Plast Reconstr Surg* 2003; 112: 367-380.
4. Ayoub AF, Wray D, Moos KF, Siebert P, Jin J, Niblett TB, et al.: Three-dimensional modeling for modern diagnosis and planning in maxillofacial surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 1996; 11: 225-233.
5. Ferrario VF, Sforza C, Serrao G, Ciusa V, Dellavia C: Growth and aging of facial soft tissues: a computerized three-dimensional mesh diagram analysis. *Clin Anat* 2003; 16: 420-433.
6. Akazaki S, Nakagawa H, Kazama H, Osanai O, Kawai M, Takema Y, et al.: Age-related changes in skin wrinkles assessed by a novel three-dimensional morphometric analysis. *Br J Dermatol* 2002; 147: 689-695.
7. Nute SJ, Moss JP: Three-dimensional facial growth studied by optical surface scanning. *J Orthod* 2000; 27: 31-38.
8. Giovanoli P, Tzou CH, Ploner M, Frey M: Three-dimensional video analysis of facial movements in healthy volunteers. *Br J Plast Surg* 2003; 56: 644-652.
9. Gur RC, Sara R, Hagendoorn M, Marom O, Hughett P, Macy L, et al.: A method for obtaining 3-dimensional facial expressions and its standardization for use in neurocognitive studies. *J Neurosci Methods* 2002; 115: 137-143.
10. Okada E: Three-dimensional facial simulations and measurements: changes of facial contour and units associated with facial expression. *J Craniofac Surg* 2001; 12: 167-174.
11. Khambay B, Nebel JC, Bowman J, Walker F, Hadley DM, Ayoub A: 3D stereophotogrammetric image superimposition onto 3D CT scan images: the future of orthognathic surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 2002; 17: 331-341.
12. Ferrario VF, Serrao G, Ciusa V, Morini M, Sforza C: Cephalometric and in vitro measurements of maxillomandibular anteroposterior discrepancies: a preliminary regression study. *Angle Orthod* 2002; 72: 579-584.
13. Moss JP, Ismail SFH, Hennessy RJ: Three-dimensional assessment of treatment outcomes on the face. *Orthod Craniofacial Res* 2003; 6: 126-131.
14. Ferrario VF, Sforza C, Dellavia C, Tartaglia GM, Colombo A, Carù A: A quantitative three-dimensional assessment of soft tissue facial

- asymmetry of cleft lip and palate patients. *J Craniofac Surg* 2003; 14: 739-746.
15. *Ferrario VF, Sforza C, Dellavia C, Vizzotto L, Carù A*: Three-dimensional nasal morphology in cleft lip and palate operated adult patients. *Ann Plast Surg* 2003; 51: 390-397.
  16. *Ferrario VF, Sforza C, Dellavia C, Tartaglia GM, Sozzi D, Carù A*: A quantitative three-dimensional assessment of abnormal variations in facial soft tissues of adult patients with cleft lip and palate. *Cleft Palate Craniofac J* 2003; 40: 544-549.
  17. *Ferrario VF, Sforza C, Tartaglia GM, Sozzi D, Carù A*: Three-dimensional lip morphometry in adults operated on for cleft lip and palate. *Plast Reconstr Surg* 2003; 111: 2149-2156.
  18. *Ji Y, Zhang F, Schwartz J, Stile F, Lineaweaver WC*: Assessment of facial tissue expansion with three-dimensional digitizer scanning. *J Craniofac Surg* 2002; 13: 687-692.
  19. *Xia J, Samman N, Yeung RW, Shen SG, Wang D, Ip HH, et al.*: Three-dimensional virtual reality surgical planning and simulation workbench for orthognathic surgery. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 2000; 15: 265-282.
  20. *Maal TJ, Plooij JM, Rangel FA, Mollemans W, Schutyser FA, Bergé SJ*: The accuracy of matching three-dimensional photographs with skin surfaces derived from cone-beam computed tomography. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2008; 37: 641-646.
  21. *McCance AM, Moss JP, Wright WR, Linney AD, James DR*: A three-dimensional soft tissue analysis of 16 skeletal class III patients following bimaxillary surgery. *Br J Oral Maxillofac Surg* 1992; 30: 221-232.
  22. *Moss JP, McCance AM, Fright WR, Linney AD, James DR*: A three-dimensional soft tissue analysis of fifteen patients with Class II, Division 1 malocclusions after bimaxillary surgery. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1994; 105: 430-437.
  23. *Ferrario VF, Sforza C, Poggio CE, Colombo A, Tartaglia G*: The relationship between facial 3-D morphometry and the perception of attractiveness in children. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 1997; 12: 145-52.
  24. *Ras F, Habets LL, van Ginkel FC, Prahl-Andersen B*: Quantification of facial morphology using stereophotogrammetry--demonstration of a new concept. *J Dent* 1996; 24: 369-374.
  25. *Ayoub A, Garrahy A, Hood C, White J, Bock M, Siebert JP, et al.*: Validation of a vision-based, three-dimensional facial imaging system. *Cleft Palate Craniofac J* 2003; 40: 523-529.
  26. *Nute SJ, Moss JP*: Three-dimensional facial growth studied by optical surface scanning. *J Orthod* 2000; 27: 31-38.
  27. *Grayson B, Cutting C, Bookstein FL, Kim H, McCarthy JG*: The three-dimensional cephalogram: theory, technique, and clinical application. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1988; 94: 327-337.
  28. *Grayson BH, McCarthy JG, Bookstein F*: Analysis of craniofacial asymmetry by multiplane cephalometry. *Am J Orthod* 1983; 84: 217-224.
  29. *Baumrind S, Moffit F, Curry S*: Three-dimension x-ray stereometry from paired coplanar images. A progress report. *Am J Orthod* 1983; 84: 313.
  30. *Baumrind S, Moffit F, Curry S*: The geometry of three-dimensional measurement from paired coplanar x-ray images. *Am J Orthod* 1983; 84: 313.
  31. *Grayson BH, LaBatto FA, Kolber AB, McCarthy JG*: Basilar multiplane cephalometric analysis. *Am J Orthod*. 1985; 88: 503-516.
  32. *Porto F, Gurgel JL, Russomano T, Farinatti Pde T*: Moiré topography: characteristics and clinical application. *Gait Posture*. 2010; 32: 422-424.
  33. *Kawai T, Natsume N, Shibata H, Yamamoto T*: Three-dimensional analysis of facial morphology using moiré stripes. Part I. Method. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1990; 19: 356-358.
  34. *Hajeer MY, Ayoub AF, Millett DT, Bock M, Siebert JP*: Three-dimensional imaging in orthognathic surgery: the clinical application of a new method. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 2002; 17: 318-330.
  35. *Hell B, Walter FA, Schreiber S, Blase H, Bielke G, Meindl S, et al.*: Three-dimensional ultrasonography in maxillofacial surgery. A new diagnostic tool. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1993; 22: 173-177.
  36. *Halazonetis DJ*: Acquisition of 3-dimensional shapes and images. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2001; 119: 556-560.
  37. *Braumann B, Keilig L, Bourauel C, Jäger A*: Three-dimensional analysis of morphological changes in the maxilla of patients with cleft lip and palate. *Cleft Palate Craniofac J* 2002; 39: 1-11.
  38. *Rangel FA, Maal TJ, Bergé SJ, van Vlijmen OJ, Plooij JM, Schutyser F, et al.*: Integration of digital dental casts in 3-dimensional facial photographs. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2008; 134: 820-826.
  39. *Mah J*: The cutting edge. *J Clin Orthod* 2003; 37:

- 101-103.
40. Heike CL, Upson K, Stuhaug E, Weinberg SM: 3D digital stereophotogrammetry: a practical guide to facial image acquisition. *Head Face Med* 2010; 6: 18.
  41. Sarver DM, Johnston MW, Matukas VJ: Video imaging for planning and counseling in orthognathic surgery. *J Oral Maxillofac Surg* 1988; 46: 939-945.
  42. Brix F, Hebbinghaus D, Meyer W: Procedures and equipment for model building in relation to orthopedic and traumatologic surgery planning. *Rontgenpraxis* 1985; 38: 290-292.
  43. Brix F, Lambrecht JT: Preparation of individual skull models based on computed tomographic information. *Fortschr Kiefer Gesichtschir* 1987; 32: 74-77.
  44. Lambrecht JT, Sojka-Raytscheff A, Brix F: Computer tomographic findings in the skulls of patients with Gorlin–Goltz syndrome. *Dtsch Zahnarzt Z* 1985; 40: 529-530.
  45. Donlon WC, Young P, Vassiliadis A: Three-dimensional computed tomography for maxillofacial surgery: report of cases. *J Oral Maxillofac Surg* 1988; 46: 142-147.
  46. Guyuron B, Ross RJ: Computer-generated model surgery. An exacting approach to complex craniomaxillofacial disharmonies. *J Craniomaxillofac Surg* 1989; 17: 101-104.
  47. Bill JS, Reuther JF, Dittmann W, Kübler N, Meier JL, Pistner H, et al.: Stereolithography in oral and maxillofacial operation planning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1995; 24: 98-103.
  48. Ghezal A, Stucki P: 3D-Hartkopien als alternative zur 3D-Visualisierung und Bildschirm. *Informatik Forsch Entw* 1992; 7: 121-125.
  49. Giebel G, Mildenstein K, Reumann K: Manufacture of bone models based on computed tomographic data for use in surgery and orthopedics. *Biomed Tech (Berl)* 1985; 30: 111-114.
  50. Mildenstein K, Giebel G, Reumann K: 3-dimensional bone models following computer tomography data. Computer design and computer production for operation planning in surgery and orthopedics. *Fortschr Med* 1985; 103: 331-334.
  51. Gateno J, Teichgraeber JF, Xia JJ: Three-dimensional surgical planning for maxillary and midface distraction osteogenesis. *J Craniofac Surg* 2003; 14: 833-839.
  52. Karcher H: Three-dimensional craniofacial surgery: transfer from a threedimensional model (Endoplan) to clinical surgery: a new technique (Graz). *J Cran Maxillofac Surg* 1992; 20: 125-131.
  53. Nkenke E, Zachow S, Benz M, Maier T, Veit K, Kramer M, et al.: Fusion of computed tomography data and optical 3D images of the dentition for streak artefact correction in the simulation of orthognathic surgery. *Dentomaxillofac Radiol* 2004; 33: 226-232.
  54. Santler G, Karcher H, Ruda C: Indications and limitations of three-dimensional models in cranio-maxillofacial surgery. *J Craniomaxillofac Surg* 1998; 26: 11-16.
  55. Terai H, Shimahara M, Sakinaka Y, Tajima S: Accuracy of integration of dental casts in three-dimensional models. *J Oral Maxillofac Surg* 1999; 57: 662-665.
  56. Plooi JM, Maal TJ, Haers P, Borstlap WA, Kuijpers-Jagtman AM, Bergé SJ: Digital three-dimensional image fusion processes for planning and evaluating orthodontics and orthognathic surgery. A systematic review. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2011; 40: 341-352.
  57. Schutyser F, Swennen G, Suetens P: Robust visualization of the dental occlusion by a double scan procedure. *Med Image Comput Comput Assist Interv Int Conf Med Image Comput Comput Assist Interv*. 2005; 8: 368-374.
  58. Swennen GR, Schutyser FAC: Three-dimensional virtual approach to diagnosis and treatment planning of maxillofacial deformity. In: Bell WH, Guerrero CA, eds: *Distraction osteogenesis of the facial skeleton*. Hamilton: BC Decker Inc. 2006 (Chapter 06).
  59. Plooi JM, Schutyser FAC, Kunz S, Berge SJ: Digitally planned reconstruction of the facial contour in Parry–Romberg. Abstracts from the XVIIIth congress of the european association for cranio-maxillofacial surgery. *J Cran Maxillofac Surg* 2006; 34: 54-55.
  60. Goto TK, Nishida S, Nakamura Y, Tokumori K, Nakamura Y, Kobayashi K, et al.: The accuracy of 3-dimensional magnetic resonance 3D vbe images of the mandible: an in vitro comparison of magnetic resonance imaging and computed tomography. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2007; 103: 550-559.
  61. Chirani RA, Jacq JJ, Meriot P, Roux C: Temporomandibular joint: a methodology of magnetic resonance imaging 3-D reconstruction. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2004; 97: 756-761.
  62. Maurel P, McGonigal A, Keriven R, Chauvel P:



- 3D model fitting for facial expression analysis under uncontrolled imaging conditions. *Pattern Recognition*. 2008. ICPR 2008. 19th International Conference.
63. Moate SJ, Geenty JP, Shen G, Darendeliler MA: A new craniofacial diagnostic technique: the Sydney diagnostic system. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2007; 131, 3: 334-342.
64. Marchetti C, Bianchi A, Muyldermans L, Di Martino M, Lancellotti L, Sarti A: Validation of new soft tissue software in orthognathic surgery planning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2011; 40, 1: 26-32.
65. Aoki Y, Tarajima, Akhiko N, Shuji H: Physics-based 3D head model reconstruction from cephalograms for medical application. *Fundamental Electr Sci* 2002; 85: 400-407.
66. Tsuji M, Noguchi N, Shigematsu M, Yamashita Y, Ihara K, Shikimori M, et al.: A new navigation system based on cephalograms and dental casts for oral and maxillofacial surgery. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2006; 35: 828-836.
67. Nakasima A, Terajima M, Mori N, Hoshino Y, Tokumori K, Aoki Y, et al.: Three-dimensional computer-generated head model reconstructed from cephalograms, facial photographs, and dental cast models. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2005; 127: 282-292.
68. Noguchi N, Tsuji M, Shigematsu M, Goto M: An orthognathic simulation system integrating teeth, jaw and face data using 3D cephalometry. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2007; 36: 640-645.
69. Gateno J, Xia JJ, Teichgraeber JF, Christensen AM, Lemoine JJ, Liebschner MA, et al.: Clinical feasibility of computer-aided surgical simulation (CASS) in the treatment of complex cranio-maxillofacial deformities. *J Oral Maxillofac Surg* 2007; 65: 728-734.
70. Swennen GR, Barth EL, Eulzer C, Schutyser F: The use of a new 3D splint and double CT scan procedure to obtain an accurate anatomic virtual augmented model of the skull. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2007; 36: 146-152.
71. Swennen GR, Mommaerts MY, Abeloos J, De Clercq C, Lamoral P, Neyt N, et al.: The use of a wax bite wafer and a double computed tomography scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model. *J Craniofac Surg* 2007; 18: 533-539.
72. Uechi J, Okayama M, Shibata T, Muguruma T, Hayashi K, Endo K, et al.: A novel method for the 3-dimensional simulation of orthognathic surgery by using a multimodal imagefusion technique. *Am J Orthod Dentofac Orthop* 2006; 130: 786-798.
73. Girod S, Keeve E, Girod B: Advances in interactive craniofacial surgery planning by 3D simulation and visualization. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1995; 24 (1 Pt 2): 120-125.
74. Ayoub AF, Xiao Y, Khambay B, Siebert JP, Hadley D: Towards building a photo-realistic virtual human face for craniomaxillofacial diagnosis and treatment planning. *Int J Oral Maxillofac Surg* 2007; 36: 423-428.
75. Groeve PD, Schutyser F, Cleynebreugel JV, Suetens P: Registration of 3D photographs with spiral CT images for soft tissue simulation in maxillofacial surgery. *Lect Notes Comput Sci* 2001; 2208: 991-996.
76. Olszewski R, Villamil MB, Trevisan DG, Nedel LP, Freitas C, Reychler H, et al.: Towards an integrated system for planning and assisting maxillofacial orthognathic surgery. *Computer Methods and Programs in Biomedicine* 2008; 9: 13-21.
77. Xin P, Yu H, Cheng H, Shen S, Shen SG: Image Fusion in Craniofacial Virtual Reality Modeling Based on CT and 3dMD Photogrammetry. *J Craniofac Surg* 2013; 24: 1573-1576.
78. Swennen GR, Mollemans W, De Clercq C, Abeloos J, Lamoral P, Lippens F, et al.: A cone-beam computed tomography triple scan procedure to obtain a three-dimensional augmented virtual skull model appropriate for orthognathic surgery planning. *J Craniofac Surg* 2009; 20: 297-307.
79. Barone S, Paoli A, Razionale AV: Computer-aided modelling of three-dimensional maxillofacial tissues through multi-modal imaging. *Proc Inst Mech Eng H* 2013; 227: 89-104.
80. Jayaratne YS, McGrath CP, Zwahlen RA: How accurate are the fusion of cone-beam CT and 3-D stereophotographic images? *PLoS One* 2012; 7: e49585.

Address: 90-153 Łódź, Kopcińskiego 22  
Tel.: +4842 6776788  
e-mail: katarzyna.bogusiak@gmail.com

Received: 2<sup>nd</sup> July 2016

Accepted: 23<sup>rd</sup> October 2016