

**Jakub BUKAŁA¹, Jerzy MAŁACHOWSKI¹, Kamil PIETROŃ¹, Kamil SYBILSKI¹,
Aleksandra SZAFRAŃSKA¹**

¹Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna im. Jarosława Dąbrowskiego, Warszawa

REJESTRACJA RUCHU ŻUCHWY WZGLĘDEM PODSTAWY CZASZKI

Streszczenie: W pracy przedstawiono metodę badawczą pozwalającą na wyznaczenie krzywych opisujących ruch żuchwy względem podstawy czaszki człowieka bazującą na wideo-analizie. Do pomiaru wykorzystuje się markery pasywne odbijające promieniowanie podczerwone, które umieszczane są na nakładkach mocowanych do tkanek twardych osoby badanej.

Słowa kluczowe: żuchwa, analiza ruchu, druk 3D

1. WSTĘP

Charakter ruchu żuchwy względem podstawy czaszki wynika z bardzo wielu czynników, do których zaliczane są m.in.: przebyte zabiegi z zakresu chirurgii stomatologicznej, braki i wady w uzębieniu, czy schorzenia układu stomatognatycznego. Nowoczesne leczenie stomatologiczne ukierunkowane jest na kompleksowe przywrócenie zdrowia w układzie stomatognatycznym, począwszy od korekcji uzębienia, uzupełnienia uzębienia aż po przywrócenie prawidłowej pracy stawu skroniowo-żuchwowego (SSŻ).

W diagnostyce oraz planowaniu zabiegów w obszarze układu stomatognatycznego stosuje się systemy pomiarowe pozwalające na wychwycenie dysfunkcji stawu SSŻ. Umożliwiają one sprawdzenie czy u pacjenta możliwe jest rozpoczęcie leczenia protetycznego lub ortodontycznego, czy też nie jest to możliwe ze względu na występujące problemy stawowe lub mięśniowe. Najczęściej wykorzystywane jest w tym celu urządzenie CADIAX [1,2] lub systemy wideo wykorzystujące śledzenie różnego rodzaju markery (pasywne i aktywne) [3–5].

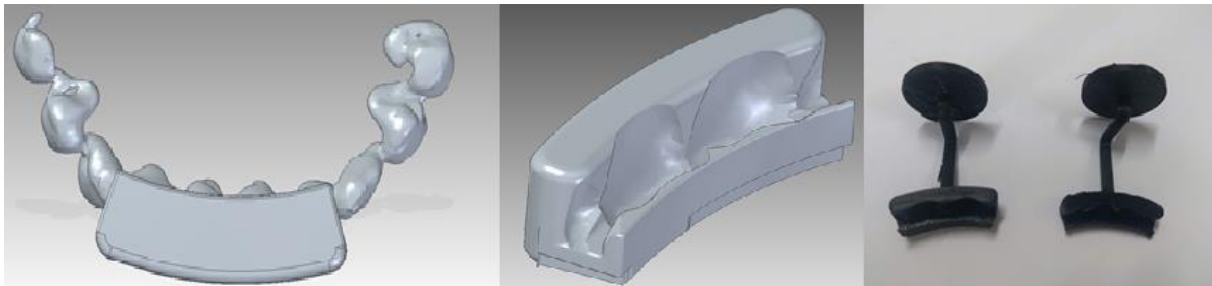
Pomiar ruchu żuchwy z wykorzystaniem markerów jest bardzo szybki i właściwie bezinwazyjny. Niestety wiąże się z występowaniem pewnych ograniczeń. Jedno z nich jest związane z umieszczaniem markerów bezpośrednio na skórze. Zaletą takiego podejścia jest duża widoczność markerów oraz możliwość manualnego wykrycia punktu, w którym marker powinien być umieszczony. Wadą jest występowanie dużego błęd pomiarowego w trakcie pomiaru dużych przemieszczeń, gdyż skóra przemieszcza względem kości. Pewnym wyjściem z sytuacji jest stosowanie personalizowanych nakładek na zęby, do których mocowane są markery [4–6]. Nie ma wtedy wpływu przemieszczania skóry względem kości, ale pojawia się konieczność przygotowania odpowiednich nakładek. Niedogodnością jest również brak możliwości całkowitego zamknięcia ust.

W dalszej części pracy zostanie przedstawiona metodyka prowadzenia pomiarów z wykorzystaniem specjalistycznych nakładek.

2. PRZYGOTOWANIE ELEMENTÓW UKŁADU POMIAROWEGO

Zasadniczym elementem opisywanej metodyki są nakładki na zęby. Pierwszym etapem przygotowania elementów układu pomiarowego jest wykonanie tomografii komputerowej. Jest to obecnie dość powszechnie stosowana metoda obrazowania układu stomatognatycznego pacjentów, której finalnym efektem jest przestrzenny obszar w formacie stl (siatka trójkątów). Powierzchnia utworzona przez siatkę trójkątów może być dowolnie modyfikowana z wykorzystaniem systemów CAD lub specjalistycznych aplikacji do modyfikacji siatek. W trakcie realizacji prac zamodelowano dwa wycinki pierścienia otaczającego niezależnie zęby górne i dolne. Następnie zastosowano operację Boolowską polegającą na odjęciu od objętości pierścieni dolnego i górnego łuku zębowego. Dzięki temu uzyskano nakładkę idealnie dopasowaną do zębów pacjenta.

Kolejnym krokiem było zamodelowanie łączników pozwalających na zamocowanie markerów na zewnątrz jamy ustnej (Rys. 1). Pomimo tworzenia spersonalizowanych nakładek oraz posiadania tomografii komputerowej pacjenta niemożliwe było jednoznaczne określenie geometrii łączników. Dlatego też postanowiono podzielić każdą z nakładek pomiarowych na trzy niezależne komponenty – nakładka na zęby, łącznik oraz tarcza do mocowania markerów. W ten sposób możliwe było przygotowanie zestawu różnych geometrii łączników i dopasowanie ich bezpośrednio przed samym pomiarem.



Rys. 1. Etapy projektowania nakładek na zęby

Ostatnim etapem przygotowania nakładek był wydruk opracowanych komponentów na drukarce 3D. W prezentowanej pracy wykorzystano druk FDM.

3. PRZEPROWADZENIE POMIARÓW

Do rejestracji ruchu żuchwy wykorzystano system Noraxon MyoVideo, który składa się z:

- **dwóch reflektorów LED-IR,**
- **dwóch kamer rejestrujących odbite od markerów pasywnych promieniowanie IR,**
- **zestawu do synchronizacji kamer,**
- **oprogramowania MyoVideo,**
- **markerów pasywnych wraz z mocowaniami.**

Przed rozpoczęciem pomiarów ustawiono statywy z kamerami i reflektorami w taki sposób, że jedna kamera ustawiona była bezpośrednio przed pacjentem, druga natomiast prostopadle do pierwszej. Dzięki temu kamera nr 1 rejestrowała ruchy pionowe oraz poprzeczne żuchwy, a kamera nr 2 ruchy pionowe oraz wzdłużne. Następnie umieszczono na

przygotowanych tarczach oraz nieruchomych częściach twarzy 6 markerów. Markery umieszczono w taki sposób, żeby możliwe było wyznaczenie nie tylko przemieszczeń wzdłużnych, poprzecznych oraz pionowych, ale także obrotu żuchwy względem podstawy czaszki.

Wykorzystywany system pomiarowy nie mierzy bezpośrednio rzeczywistej odległości, dlatego kolejną czynnością było wykonanie manualnego pomiaru dystansu pomiędzy wybranymi markerami, na podstawie którego na etapie obróbki wyników dokonano skalowania wyników.

4. WYNIKI POMIARÓW

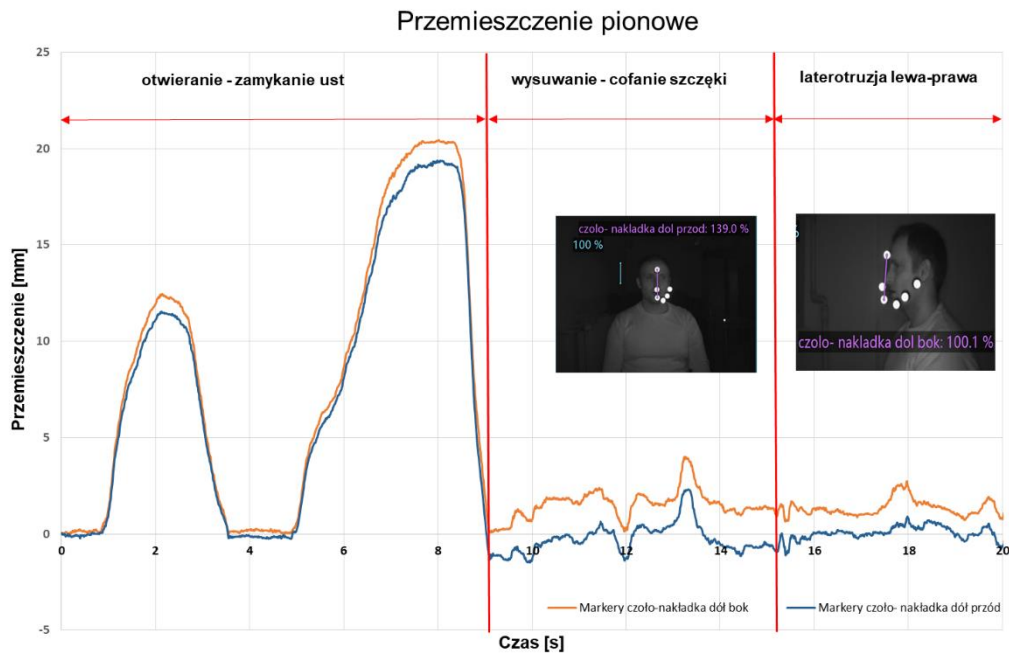
W trakcie pomiarów rejestrowano ruch żuchwy i podstawy czaszki dla:

- **otwierania i zamykania ust,**
- **wysuwania i cofania żuchwy (protruzja),**
- **ruchów bocznych (laterotruzji). Oprogramowanie MyoVideo umożliwia m.in. pomiar odległości, kątów i wyznaczenie trajektorii markerów w wybranych chwilach czasowych lub pomiar zmian mierzonych wartości w czasie trwania nagrania. Pomierzone wartości odnoszone są do długości charakterystycznej, na podstawie której pomiary są skalowane do rzeczywistych wartości. Na rys.2 przedstawiono ułożenie markerów oraz przykładowe pomiary odległości między nimi.**

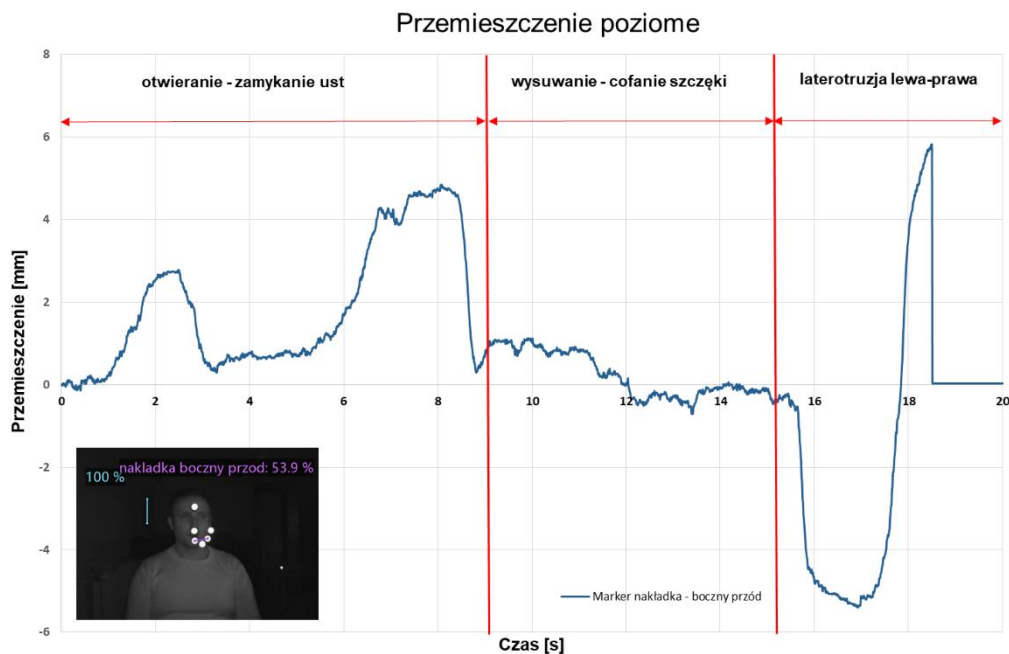


Rys. 2. Przykładowe pomiary odległości w płaszczyźnie czołowej i strzałkowej w systemie MyoVideo

Jako wyniki badań uzyskano charakterystyki przedstawione na rysunkach od 3 do 6. Czas trwania sekwencji ruchów wyniósł 20 sekund. Na rys. 3 przedstawiono zmiany odległości między markerem przyklejonym do czoła a markerem przyklejonym do nakładki dolnej. Pomiary dokonano na filmach z dwóch kamer. Badana osoba dwukrotnie wykonała ruch żuchwą przy otwieraniu i zamykaniu ust. Zakres pierwszego ruchu wyniósł około 12 mm natomiast za drugim razem około 20 mm. Sekwencja ta trwała pierwsze 10 sekund. Od około 10 sekundy do 15 sekundy badany wykonał ruch protruzji, czyli maksymalnego wysunięcia żuchwy do przodu i do tyłu. Od 15 do 20 sekundy badany wykonał ruchy boczne, czyli maksymalne wysunięcie żuchwy na lewo i prawo. Pomiar przemieszczeń podczas wysuwania szczęki i laterotruzji nie był możliwy na podstawie wyżej wymienionych punktów pomiarowych, co widać od 10-tej sekundy na wykresie.

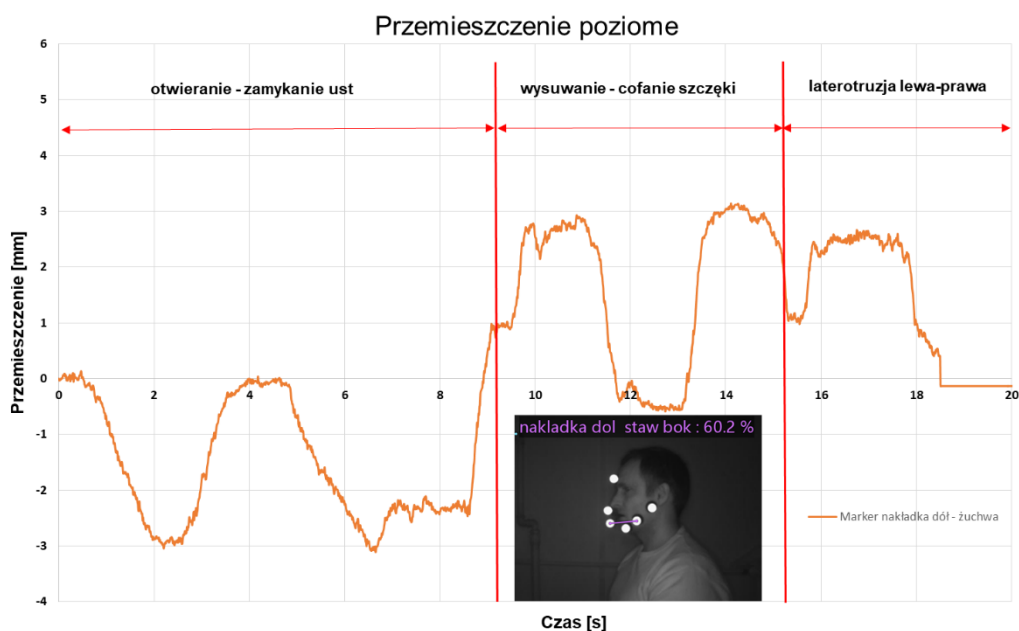


Rys. 3. Wykres zmian przemieszczeń pionowych zarejestrowanych podczas eksperymentu. Na kolejnym wykresie przedstawiono przebieg zmian odległości mierzonej pomiędzy markerem przyklejonym do nakładki dolnej a markerem umieszczonym w połowie długości żuchwy. Dzięki temu możliwe było zarejestrowanie laterotrużji lewej i prawej. Ruch jest symetryczny i jego zakres wynosi ± 6 mm natomiast przebieg wykresu od 19 sekundy wskazuje na błąd śledzenia markerów przez system.



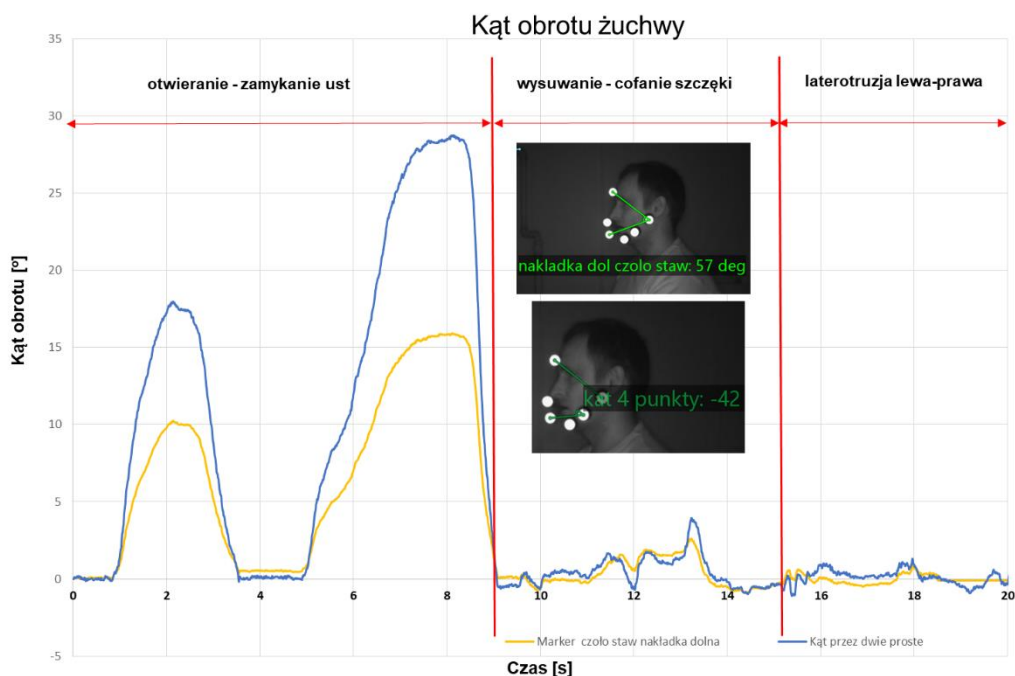
Rys. 4. Wykres przemieszczeń poziomych w widoku od przodu zarejestrowanych podczas eksperymentu.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg zmian odległości pomiędzy markerem na nakładce dolnej a markerem w połowie żuchwy w widoku z boku. Taka konfiguracja pomiarowa umożliwiła uzyskanie przebiegu ruchu wysuwania i cofania szczęki. Badany wykonał powtarzalną sekwencję dwukrotnie. Zakres tego ruchu wyniósł 3 mm wysunięcia do przodu i około 1 mm cofania do tyłu.



Rys. 5. Wykres przemieszczeń poziomych w widoku od boku zarejestrowanych podczas eksperymentu.

Ostatni rysunek przedstawia wykres zmian kąta obrotu żuchwy mierzonego między markerami na czole, krążku stawowym oraz nakładce dolnej. Ponadto dokonano pomiaru kąta pomiędzy dwoma prostymi wyznaczonymi przez 4 punkty: jedna prosta poprowadzona przez markery na nakładce dolnej i na punkcie w połowie żuchwy oraz druga prosta poprowadzona przez marker na czole oraz krążku stawowym. Przebiegi krzywych są podobne jednakże przy pomiarze czteropunktowym uzyskano prawie 2 razy większy zakres ruchu wynoszący około 30 stopni.



Rys. 6. Wykres zmian kąta obrotu żuchwy zarejestrowanych podczas eksperymentu.

4. WNIOSKI

Obecnie stosowanych jest wiele metod pomiaru ruchu kości żuchwy względem kości podstawy czaszki. W pracy przedstawiono wybraną metodę bazującą na systemie optycznym śledzącym ruch markerów (ze względu na dostępność wyłącznie tej metody). Sama metoda optyczna jest bardzo szybka i bezinwazyjna. Niestety wymaga zamocowania markerów, które umieszczone bezpośrednio na skórze powodują występowanie dużych błędów pomiarowych. Dlatego też zdecydowano się na wykorzystanie dodatkowych wysięgników. Ze względu na brak kleju, który zagwarantowałby trwałe zespojenie zębów i materiału wysięgników zdecydowano się na wykorzystanie spersonalizowanych nakładek. Pociągnęło to za sobą konieczność uzyskania geometrii zębów. Finalnie wydrukowano nakładki, dzięki którym wykonano serię pomiarów.

Metoda badawcza pozwoliła na wyznaczenie krzywych opisujących ruch żuchwy w dwóch płaszczyznach. Dzięki szybkości samej metody możliwe jest uzyskanie danych dla dużej grupy badawczej. Wadą metody jest konieczność pozyskania geometrii zębów badanego w celu wykonania spersonalizowanych nakładek do mocowania markerów oraz konieczność drukowania nakładek, co nie przekłada się na sam czas pracy z osobą badaną, ale na ogólny czas od rozpoczęcia badań do uzyskania finalnych wyników.

LITERATURA

- [1] Ahangari A.H., Torabi K., Pour S.R., Ghodsi S.: Evaluation of the cadiax compact® ii accuracy in recording preadjusted condylar inclinations on fully adjustable articulator. *J Contemp Dent Pract* 2012;13:504–8. doi:10.5005/jp-journals-10024-1176.
- [2] Krzemien J., Dyduch A., Baron S.: Badanie drogi stawowej u osób z bólową postacią dysfunkcji stawów skroniowo-żuchwowych. *Dwumiesięcznik Stomatol Prakt Polish&English J Dent* 2011;6:8–16.
- [3] Kijak E.: Displacement crackles within the temporomandibular joint and the quality of abduction and adduction mandible track in functional tests, using Zebris JMA device. Part II. *Protet Stomatol* 2017;67:38–44. doi:10.5604/00331783.1233260.
- [4] Pinheiro A.P., Andrade A.O., Pereira A.A., Bellomo D.: A computational method for recording and analysis of mandibular movements. *J Appl Oral Sci* 2008;16:321–7. doi:10.1590/S1678-77572008000500004.
- [5] da Cunha D.V., Degan V.V., Vedovello Filho M., Bellomo D.P., Silva M.R., Furtado D.A., et al.: Real-time three-dimensional jaw tracking in temporomandibular disorders. *J Oral Rehabil* 2017;44:580–8. doi:10.1111/joor.12521.
- [6] Andrade A. de O., Silva M.R. da, Pereira A.A., Furtado D.A., Junior D.P.B.: A specialized motion capture system for real-time analysis of mandibular movements using infrared cameras. *Biomed Eng Online* 2013;12:17. doi:10.1186/1475-925x-12-17.

PODZIĘKOWANIE: Praca powstała w ramach projektu “3D-JAW” (*Opracowanie trójwymiarowego modelu stawu skroniowo-żuchwowego w celu odwzorowania działania aparatu kostno-chrzęstno-więzadłowego dla efektywnej komercjalizacji wyników w protetyce, ortodoncji i chirurgii ortognatycznej*; POIR.04.01.02-00-0029/17).

REGISTRATION OF THE MOVEMENT OF THE MANDIBLE RELATIVE TO THE BASE OF THE SKULL

Abstract: The study presents a research method for determining movement curves of the human mandible in relation to the base of the skull. The method is based on video analysis of passive markers reflecting IR radiation. Markers are placed on the personalized overlays fastened to the hard tissues of the examined person.