

Automatyczna ekstrakcja parametrów kinematycznych z elektronicznego badania aksjograficznego z wykorzystaniem narzędzi informatycznych – opracowanie metody i wstępne obserwacje

Automated extraction of kinematic parameters from electronic axiography using information technology tools – method development and preliminary observations

Daniel Surowiecki, Jolanta Kostrzewa-Janicka

Katedra Protetyki Stomatologicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny
Department of Prosthodontics, Medical University of Warsaw
Kierownik: prof. dr hab. n. med. Jolanta Kostrzewa-Janicka

HASŁA INDEKSOWE:

aksjografia, CADIAX, dysfunkcja narządu żucia, kinematyka żuchwy, analiza danych

KEY WORDS:

condylography, CADIAX, temporomandibular disorder, mandibular kinematics, data analysis

Streszczenie

Wprowadzenie. Zaburzenia skroniowo - żuchwowe (ZSŻ) stanowią jedno z najczęstszych schorzeń układu stomatognatycznego. Aksjografia z użyciem urządzenia CADIAX 4 dostarcza bogatych danych kinematycznych o ruchach żuchwy, jednak ich tradycyjna analiza ogranicza się do parametrów obliczanych przez producenta. Zastosowanie metod informatycznych umożliwia ekstrakcję dodatkowych parametrów kinematycznych z surowych danych pomiarowych.

Cel pracy. Opracowanie autorskiego narzędzia informatycznego do automatycznej ekstrakcji parametrów kinematycznych z plików eksportowanych przez oprogramowanie GAMMA Dental Software (GDSW), wstępna walidacja narzędzia oraz prezentacja jego zastosowania na małej grupie pacjentów z różnymi rozpoznaniemmi ZSŻ.

Materiał i metody. Analizie poddano dane aksjograficzne 10 pacjentów (7 kobiet, 3 mężczyzn; średni wiek $41,4 \pm 17,3$ lat) z rozpoznaniemmi: brak ZSŻ ($n=4$), ZSŻ mięśniowe ($n=3$), ZSŻ sta-

Summary

Introduction. Temporomandibular disorders (TMD) constitute one of the most common dysfunctions of the stomatognathic system. Condylography using the CADIAX 4 device provides rich kinematic data on mandibular movements; however, traditional analysis is limited to parameters calculated by the manufacturer. The use of information technology methods enables extraction of additional parameters from raw measurement data.

Aim of the study. To develop a customized information tool for automated extraction of kinematic parameters from files exported by GAMMA Dental Software (GDSW), perform preliminary validation of the tool, and present demonstration of its application in on a small group of patients with various TMD diagnoses.

Material and methods. Condylographic data of 10 patients (7 seven women, 3 three men; mean age 41.4 ± 17.3 years) were

wowe ($n=3$). Z plików formatu XCX (CADIAX XML Export) wyekstrahowano parametry kinematyczne ruchów protruzji, mediotruzji prawej, mediotruzji lewej oraz odwodzenia żuchwy, a także pomiar różnicy położenia kłykcia z pozycji referencyjnej żuchwy do pozycji w maksymalnym zaguzkowaniu zębów (ang. Condylar Position Measurement (CPM)). Obliczenia przeprowadzono w języku Python z wykorzystaniem bibliotek pandas i numpy.

Wyniki. Opracowano narzędzie umożliwiające automatyczną ekstrakcję 137 parametrów kinematycznych dla każdego pacjenta. Walidacja na danych referencyjnych wykazała zgodność wyników z wartościami obliczanymi przez GDSW. W grupie pilotażowej zaobserwowano tendencję do większej asymetrii ruchu protruzyjnego u pacjentów z ZSŻ stawowym oraz tendencję do dystrakcji prawego stawu skroniowo-żuchwowego u pacjentów z rozpoznaniem ZSŻ.

Wnioski. Opracowane narzędzie umożliwia automatyczną ekstrakcję rozszerzonego zestawu parametrów kinematycznych z badania CADIAX 4. Wstępne obserwacje sugerują potencjał metody w obiektywizacji oceny zaburzeń ruchowych żuchwy, co wymaga potwierdzenia w badaniach na większej grupie pacjentów.

analyzed/analysed, with the following diagnoses: no TMD ($n=4$), muscular TMD ($n=3$), articular TMD ($n=3$). Kinematic parameters of protrusion, right mediotrusion, left mediotrusion, and mouth opening movements were extracted from XCX (CADIAX XML Export) files, along with the Condylar Position Measurement (CPM). Calculations were performed in Python using pandas and numpy libraries.

Results. A tool was developed enabling automated extraction of 137 kinematic parameters for each patient. Validation on reference data showed agreement with values calculated by GDSW. In the pilot group, a tendency toward greater protrusive movement asymmetry was observed in patients with articular TMD, as well as a tendency toward distraction of the right temporomandibular joint in patients with TMD diagnosis.

Conclusions. The developed tool enables automated extraction of an extended set of kinematic parameters from CADIAX 4 examination. Preliminary observations suggest the potential of the method in objectifying the assessment of mandibular movement disorders, which requires confirmation in studies with on a larger patient group/population.

Wstęp

Zaburzenia skroniowo-żuchwowe (ZSŻ) są jedną z najczęstszych przewlekłych dolegliwości obszaru części twarzowej czaszki, a metaanalizy badań populacyjnych wskazują, że – zależnie od przyjętych kryteriów diagnostycznych i charakterystyki badanej populacji – dotyczą one od kilkunastu do ponad trzydziestu procent osób dorosłych.^{1,2} Trafna diagnostyka różnicowa podtypów ZSŻ – mięśniowego, stawowego oraz mieszanego – ma kluczowe znaczenie dla wyboru właściwego postępowania terapeutycznego.³ W codziennej praktyce klinicznej diagnostyka opiera się przede wszystkim na badaniu podmiotowym i przedmiotowym uzupełnionym o standaryzowane

protokoły, takie jak Diagnostic Criteria for TMD (DC/TMD), oraz, w wybranych przypadkach, badania obrazowe i czynnościowe.^{4,5}

Aksjografia wykonywana z wykorzystaniem urządzenia CADIAX 4 (GAMMA Dental, Austria) jest jedną z metod obiektywnego pomiaru ruchów wyrostków kłykciowych żuchwy.^{5,6} Urządzenie rejestruje trójwymiarowe trajektorie osi kinematycznej żuchwy w czasie rzeczywistym z rozdzielczością przestrzenną rzędu 0,01 mm i rozdzielczością czasową 9 ms. Pozwala to na ilościową i jakościową ocenę charakterystyki ruchów funkcjonalnych – protruzji, mediotruzji oraz odwodzenia – oraz na pomiar Condylar Position Measurement (CPM), który określa różnicę między pozycją referencyjną żuchwy (zgodną z relacją centralną lub

zaburzoną) a pozycją maksymalnego zaguzkowania zębów.⁷

Standardowe oprogramowanie GAMMA Dental Software (GDSW) udostępnia zestaw obliczonych parametrów numerycznych w formie raportu, w tym kąta drogi stawowej (Sagittal Condylar Inclination, SCI), kąta Bennetta, prędkości maksymalnej oraz wskaźników symetrii.^{8,9} Parametry te stanowią podstawę interpretacji klinicznej, jednak nie wykorzystują pełnego potencjału informacyjnego surowych danych kinematycznych. Trójwymiarowe trajektorie ruchów wyrostków kłykciowych rejestrowane z wysoką częstotliwością próbkowania zawierają informacje o kształcie krzywych ruchu, ich zmienności oraz wzajemnych relacjach pomiędzy stronami, które mogą mieć potencjał diagnostyczny w klasyfikacji podtypów ZSŻ.^{10,11} W oprogramowaniu są one widoczne jako graficzna wizualizacja tego ruchu, ale brakuje możliwości ich eksportu ilościowego do dalszych analiz statystycznych.

Rosnące zainteresowanie metodami sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego w stomatologii otwiera nowe możliwości analityczne.^{12,13} Podstawowym warunkiem zastosowania tych metod jest jednak dostępność danych w postaci nadającej się do przetwarzania komputerowego. CADIAX 4 umożliwia eksport danych do formatu XML (rozszerzenie .xcx), jednak dotychczas nie opisano w piśmiennictwie takiego narzędzia do automatycznej ekstrakcji parametrów kinematycznych z tego formatu, które byłoby gotowe do dalszej analizy statystycznej lub modelowania, jak przedstawione autorskie narzędzie.¹⁴

Cel pracy

Celem niniejszej pracy było opracowanie autorskiego narzędzia informatycznego do automatycznej ekstrakcji parametrów kinematycznych z plików XCX, jego wstępna walidacja oraz prezentacja zastosowania na pilotażowej

grupie obejmującej pacjentów z różnymi rozpoznaniem ZSŻ oraz osoby bez objawów dysfunkcji.

Material i metody

Grupa badana

Do badania pilotażowego włączono 10 pacjentów leczonych w Katedrze i Zakładzie Protetyki Stomatologicznej WUM. Kryteria włączenia obejmowały: wykonane pełne badanie aksjograficzne urządzeniem CADIAX 4 obejmujące rejestrację ruchów protruzji, mediotruzji prawej i lewej oraz odwodzenia żuchwy, a także udokumentowane rozpoznanie kliniczne. Kryteria wyłączenia obejmowały: brak kompletnych danych aksjograficznych oraz brak rozpoznania klinicznego w dokumentacji.

Klasyfikacji diagnostycznej dokonano retrospektywnie na podstawie dokumentacji medycznej, wyodrębniając – zgodnie z klasyfikacją DC/TMD⁴ – trzy kategorie: brak ZSŻ (grupa kontrolna), ZSŻ o typie mięśniowym (pacjenci z rozpoznaniem bólu mięśni i bólu mięśniowo-powięziowego) oraz ZSŻ o typie stawowym (pacjenci z rozpoznaniem przemieszczenia krążka bez zablokowania). Badanie zostało przeprowadzone zgodnie z zasadami Deklaracji Helsińskiej. Wszystkie dane zostały poddane pseudonimizacji przed analizą.

Protokół aksjograficzny

Badania wykonano standardowo zgodnie z protokołem GAMMA Dental Software przy użyciu urządzenia CADIAX 4.^{6,9} Częstotliwość próbkowania wynosiła 9 ms (około 111 Hz), rozdzielczość przestrzenna 0,01 mm. U każdego pacjenta zarejestrowano krzywe protruzji-retruzji, mediotruzji prawej, mediotruzji lewej oraz odwodzenia żuchwy. U 8 z 10 pacjentów wykonano dodatkowo pomiar CPM, określający różnicę pomiędzy pozycją referencyjną a pozycją maksymalnego zaguzkowania zębów.

Eksport i przetwarzanie danych

Dane aksjograficzne wyeksportowano z oprogramowania GDSW w natywnym formacie CADIAX XML Export (.xcx). Format ten zawiera trójwymiarowe współrzędne osi kinematycznej dla każdej próbki czasowej oraz dane geometryczne pomiarów CPM. Pliki poddano automatycznej anonimizacji z usunięciem danych identyfikujących pacjenta przy zachowaniu danych pomiarowych.

Opracowano autorski parser w języku Python wykorzystujący biblioteki standardowe (xml.etree.ElementTree, pandas, numpy). Parser realizuje następujące funkcje: odczyt struktury XML pliku XCX, ekstrakcję metadanych badania, przetworzenie surowych współrzędnych przestrzennych, obliczenie pochodnych parametrów kinematycznych oraz integrację z plikami zawierającymi etykiety kliniczne pacjentów. Dla każdej krzywej ruchu obliczono parametry: zakres ruchu w trzech osiach przestrzennych [mm], maksymalne przemieszczenie trójwymiarowe [mm], prędkość ruchu (maksymalną, średnią, odchylenie standardowe) [mm/s], parametr płynności ruchu (jerk) jako pochodną prędkości [mm/s²], wskaźniki kształtu rozkładu (skośność, kurtoza), maksymalną rotację żuchwy [°] oraz wskaźniki asymetrii lewa-prawa. W celu interpretacji CPM obliczono odległość prostopadłą punktu CPM od krzywej protruzji w płaszczyźnie strzałkowej, przyjmując arbitralnie próg istotności klinicznej $\pm 0,1$ mm dla rozróżnienia normy, kompresji oraz dystrakcji stawu.^{7,15} W sumie dla każdego pacjenta wyekstrahowano 137 parametrów ilościowych. Tabelę cech wyeksportowano w formacie umożliwiającym dalszą analizę statystyczną (CSV, XLSX).

Walidacja narzędzia

Poprawność parsera zweryfikowano poprzez porównanie wybranych wartości obliczonych przez narzędzie z wartościami raportowanymi w module Numerical Analysis

oprogramowania GDSW dla badań referencyjnych. Walidacją objęto: maksymalne przemieszczenie wyrostków kłykciowych, czas osiągnięcia maksymalnego przemieszczenia, maksymalną rotację żuchwy oraz wskaźnik symetrii ilościowej. Zgodność wyników w zakresie tych parametrów wynosiła poniżej 0,5% wartości referencyjnej.

Analiza statystyczna

Z uwagi na liczebność grupy pilotażowej (n=10) ograniczono analizę do statystyki opisowej. Dla każdego parametru obliczono wartość średnią, odchylenie standardowe, medianę oraz zakres. Porównania pomiędzy grupami diagnostycznymi przedstawiono w postaci wykresów pudełkowych. Nie wykonywano testów istotności statystycznej ze względu na małą liczebność podgrup. Analizy wykonano w języku Python z wykorzystaniem bibliotek pandas, numpy, matplotlib oraz seaborn.

Wyniki

Charakterystyka grupy badanej

Grupę badaną stanowiło 10 pacjentów (7 kobiet, 3 mężczyzn) w wieku 21-71 lat (średnia $41,4 \pm 17,3$ lat, mediana 37,0 lat). Charakterystykę grupy w podziale na rozpoznania kliniczne wg DC/TMD przedstawia tabela 1.

Porównanie grup pod względem parametrów kinematycznych

Rycina 1 przedstawia rozkłady wybranych parametrów kinematycznych w grupach diagnostycznych. Zaobserwowano kilka tendencji wartych odnotowania, należy jednak podkreślić, że ze względu na małą liczebność grup (n = 3-4) wnioski mają charakter wyłącznie deskryptywny i wymagają potwierdzenia w dalszych badaniach.

Asymetria ruchu protruzyjnego osiągała wyższe wartości w grupie z ZSŻ stawowym

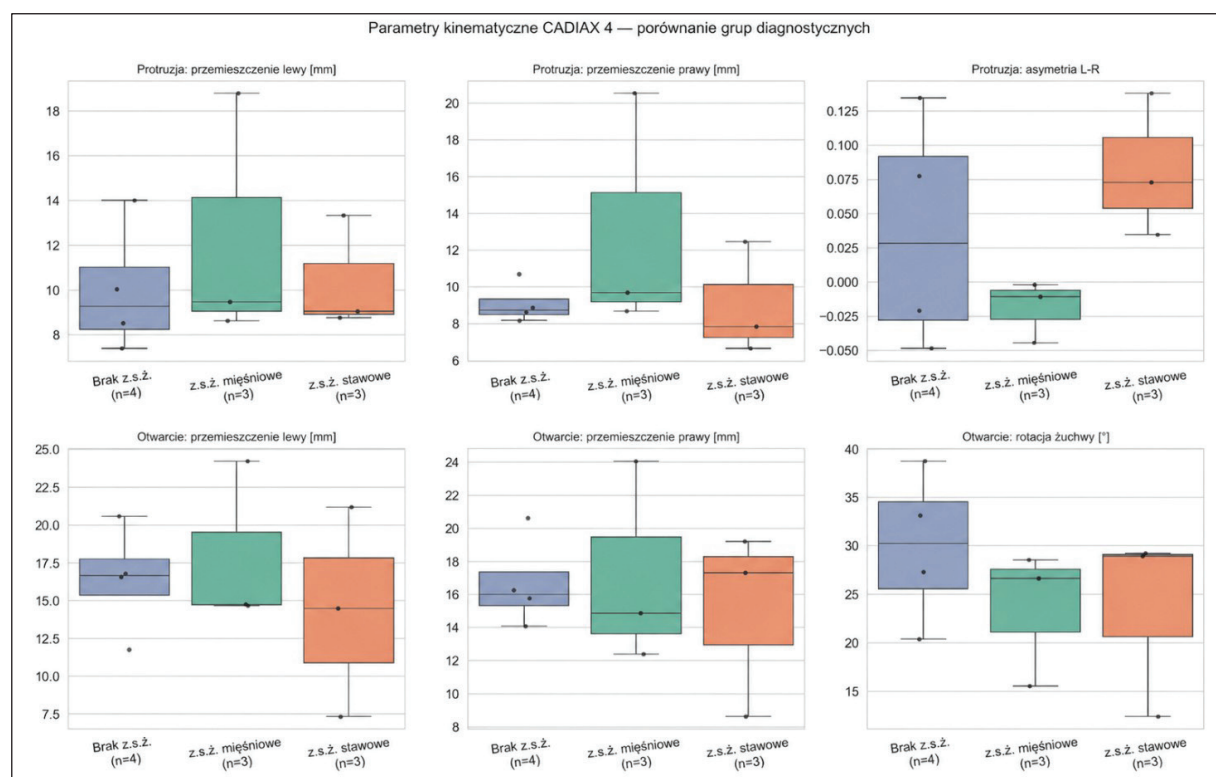
Tabela 1. Charakterystyka grupy badanej w podziale na rozpoznania kliniczne

Rozpoznanie	n	Wiek (średnia $\pm$ SD)	Kobiety	Mężczyźni
Brak ZSŻ	4	49,5 $\pm$ 18,0	1	3
ZSŻ mięśniowe	3	34,7 $\pm$ 4,5	3	0
ZSŻ stawowe	3	37,3 $\pm$ 24,9	3	0
Razem	10	41,4 $\pm$ 17,3	7	3

(mediana 0,07; zakres 0,03-0,14) w porównaniu z grupą ZSŻ mięśniowego (mediana -0,01; zakres -0,04 do -0,002) oraz grupą bez objawów (mediana 0,03; zakres -0,05 do 0,13). Maksymalna rotacja żuchwy podczas odwodzenia była wyższa w grupie kontrolnej (mediana 30,1°) niż w grupach z rozpoznaniem ZSŻ (ZSŻ mięśniowe – mediana 26,7°; ZSŻ stawowe – mediana 29,0°), co może odzwierciedlać tendencję do mniejszego zakresu ruchu rotacyjnego w dysfunkcji.

Pomiar CPM

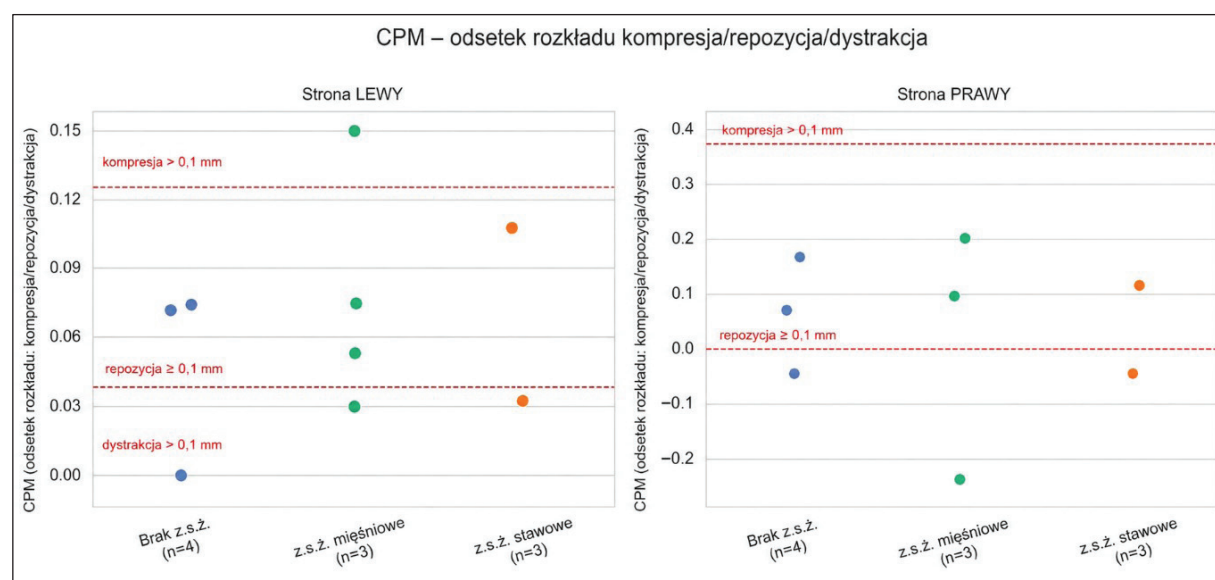
Klasyfikację pomiaru CPM dla obu stawów skroniowo-żuchwowych w podziale na grupy diagnostyczne przedstawia tabela 2. Przy zastosowanym progu klinicznym $\pm 0,1$ mm odległości prostopadłej od krzywej protruzji, wszyscy pacjenci grupy bez ZSŻ oraz grupy ZSŻ mięśniowego (z dostępnymi pomiarami CPM) klasyfikowali się jako norma w zakresie stawu lewego. W zakresie stawu prawego u 1 pacjenta z ZSŻ mięśniowym zaobserwowano dystrakcję



Ryc. 1. Wykres pudełkowy parametrów kinematycznych — porównanie grup diagnostycznych.

T a b e l a 2. Klasyfikacja pomiaru CPM w podziale na rozpoznania (próg $\pm 0,1$ mm)

Rozpoznanie	Staw lewy			Staw prawy		
	norma	kompresja	dystrakcja	norma	kompresja	dystrakcja
Brak TMD (n=3)	3	0	0	3	0	0
TMD mięśniowe (n=3)	3	0	0	2	0	1
TMD stawowe (n=2)	2	0	0	2	0	0
Razem (n=8)	8	0	0	7	0	1

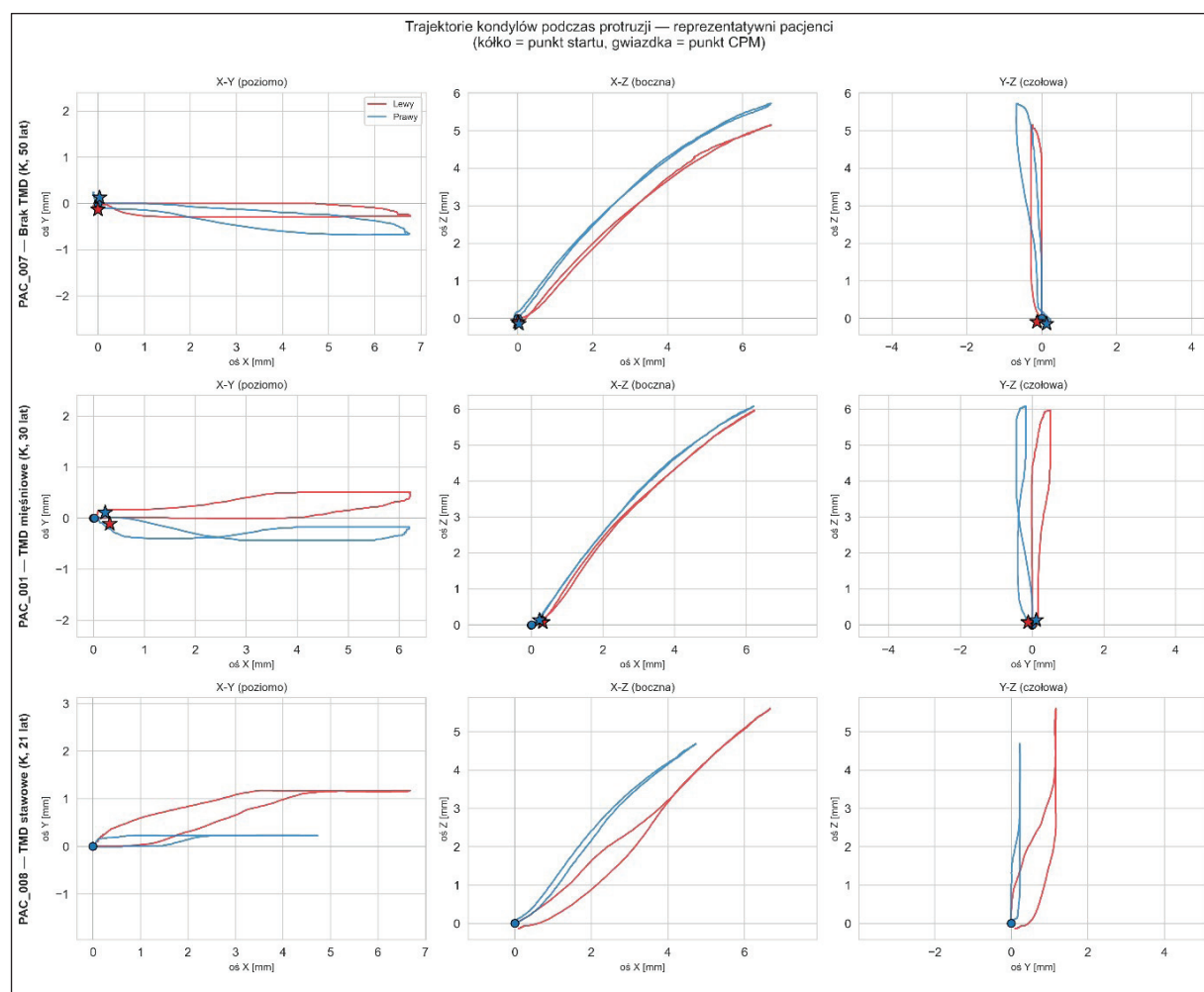
Ryc. 2. Pomiar CPM — odległość prostopadła punktu CPM od krzywej protruzji w podziale na grupy diagnostyczne. Linie czerwone oznaczają próg istotności klinicznej $\pm 0,1$ mm.

(-0,35 mm). Wartości pomiarów CPM przedstawia rycina 2.

Trajektorie osi kinematycznej – przypadki reprezentatywne

Trajektorie ruchu osi kinematycznych są standardowo prezentowane wizualnie w oprogramowaniu GDSW. W celu ilustracji jakościowej zróżnicowania ruchu w grupie badanej, dla każdej z trzech grup diagnostycznych wybrano pacjenta najbardziej zbliżonego do wartości średnich grupy w zakresie kluczowych parametrów kinematycznych, a następnie

zrekonstruowano graficznie ich trajektorie podczas ruchu protruzji w trzech projekcjach przestrzennych z wyekstrahowanych danych (ryc. 3). U pacjenta bez objawów ZSŻ trajektorie obu wyrostków kłykciowych były symetryczne i gładkie, a punkty pomiaru CPM lokalizowały się w pobliżu punktów startowych. U pacjentki z ZSŻ mięśniowym zaobserwowano subtelny asymetrię w projekcji poziomej (X-Y) przy zachowaniu symetrii ruchu strzałkowego. U pacjentki z ZSŻ stawowym widoczna była wyraźna asymetria trajektorii obu wyrostków kłykciowych, szczególnie w projekcji



Ryc. 3. Trajektorie wyrostków kłykciowych podczas ruchu protruzji w trzech projekcjach (X-Y, X-Z, Y-Z) u trzech reprezentatywnych pacjentów. Czerwony kolor — staw lewy, niebieski — prawy. Kółko oznacza punkt startu, gwiazdka — punkt CPM.

poziomej, gdzie lewy wyrostek wykazywał szeroki ruch poprzeczny (do +1,2 mm) przy minimalnym ruchu poprzecznym prawego.

Dyskusja

Niniejsza praca prezentuje opracowanie autorskiego narzędzia informatycznego umożliwiającego automatyczną ekstrakcję rozszerzonego zestawu parametrów kinematycznych z badania aksjograficznego CADIAX 4. W odróżnieniu od standardowego raportu numerycznego oprogramowania GDSW, opracowane narzędzie pozwala na uzyskanie 137 parametrów

ilościowych dla każdego pacjenta – w tym pochodnych parametrów dynamicznych (prędkość, jerk), wskaźników kształtu krzywej oraz interpretacji geometrycznej pomiaru CPM względem trajektorii ruchu protruzji.

W dostępnym piśmiennictwie nie odnaleziono opisu analogicznego narzędzia umożliwiającego automatyczną ekstrakcję parametrów ilościowych z surowych danych zapisywanych przez CADIAX 4 do dalszej analizy w środowisku obliczeniowym. Większość prac wykorzystujących to urządzenie opiera się na parametrach raportowanych przez producenta lub na ręcznym odczycie wartości z raportów

graficznych.^{6,9,10,16} Należy podkreślić, że innowacyjność niniejszej pracy nie polega na samej wizualizacji trajektorii osi kinematycznej (funkcjonalność ta jest standardowo dostępna w GDSW), ani na sposobie obliczania klasycznych parametrów, takich jak SCI czy kąt Bennetta, które są obliczane przez producenta. Wkład oryginalny stanowi po pierwsze: automatyzacja procesu ekstrakcji danych ilościowych z plików eksportowych, po drugie: obliczenie dodatkowych parametrów pochodnych nieprezentowanych w raporcie producenta (jerk, wskaźniki kształtu krzywej), po trzecie: opracowanie ilościowej interpretacji geometrycznej pomiaru CPM jako odległości prostopadłej od krzywej protruzji. Rozwiązanie to otwiera możliwość zastosowania nowoczesnych metod analizy danych, w tym uczenia maszynowego, do badań kondylograficznych prowadzonych na większych grupach pacjentów.^{14,17}

Wstępne obserwacje w grupie pilotażowej sugerują kilka potencjalnie istotnych klinicznie wzorców. Zaobserwowano tendencję do większej asymetrii ruchu protruzyjnego u pacjentów z ZSŻ stawowym, co jest zgodne z klinicznym oczekiwaniem dotyczącym jednostronnego charakteru wielu patologii stawowych.^{7,16} Pomiar CPM wykazał tendencję do dystrakcji prawego stawu skroniowo-żuchwowego u pacjentów z rozpoznaniem ZSŻ, co może odzwierciedlać zmiany w pozycji referencyjnej głowy żuchwy wynikające z dysfunkcji.^{7,15} Ilustracja trajektorii osi kinematycznej u reprezentatywnych pacjentów potwierdza jakościowe wzorce zaobserwowane w analizie ilościowej – wyraźnie inny obraz ruchu w grupie ZSŻ stawowego w porównaniu z grupą bez objawów dysfunkcji.

Należy podkreślić, że wszystkie powyższe obserwacje mają charakter wyłącznie deskryptywny i nie stanowią dowodu istnienia rzeczywistych różnic między grupami diagnostycznymi. Liczebność grupy pilotażowej (n=10) była

celowo ograniczona do pierwszej walidacji metody i nie pozwala na formułowanie wniosków o charakterze klinicznym. Pełna walidacja diagnostyczna wymaga badania w grupie obejmującej co najmniej 100 pacjentów z zachowaniem proporcjonalności podgrup diagnostycznych oraz dopasowania wiekowego.

Praca posiada szereg ograniczeń metodologicznych, które należy odnotować. Grupa pilotażowa charakteryzowała się znaczącą nierównowagą wieku i płci pomiędzy podgrupami, co odzwierciedla naturalną epidemiologię ZSŻ, ale ogranicza możliwość interpretacji obserwowanych różnic. Następnie, próg istotności klinicznej dla pomiaru CPM ($\pm 0,1$ mm) został przyjęty arbitralnie z uwagi na brak konsensusu w piśmiennictwie i wymaga weryfikacji na większej grupie.¹⁵ Należy zaznaczyć, że walidacja narzędzia ograniczyła się do parametrów dostępnych w raporcie GDSW; algorytmy obliczania parametrów takich jak SCI czy kąt Bennetta są chronione przez producenta i mogą wykorzystywać dodatkowe procedury filtracji niezawarte w niniejszej implementacji.⁸

Mimo wymienionych ograniczeń, niniejsza praca otwiera możliwości dalszych badań w kierunku obiektywizacji diagnostyki ZSŻ. Planowanym kolejnym etapem jest rozszerzenie analizy oraz wykorzystanie wyekstrahowanych parametrów do trenowania modeli klasyfikacyjnych opartych na metodach uczenia maszynowego.^{11,13,18} Z uwagi na liczbę dostępnych parametrów oraz zróżnicowanie wzorców między pacjentami, modele takie mogą docelowo wspierać proces diagnostyczny ZSŻ jako narzędzie obiektywnej, ilościowej i jakościowej oceny ruchowej.

Podsumowanie

Opracowano autorskie narzędzie informatyczne umożliwiające automatyczną ekstrakcję 137 parametrów kinematycznych z plików eksportowych CADIAX 4 (XCX), gotowych

do dalszej analizy statystycznej i modelowania.

Walidacja narzędzia wykazała wysoką zgodność wartości obliczonych z parametrami raportowanymi przez oprogramowanie urządzenia producenta.

Wstępne obserwacje w grupie pilotażowej sugerują potencjalne wzorce różnicujące rozpoznania zaburzeń skroniowo-żuchwowych w zakresie asymetrii ruchu protruzyjnego oraz pomiaru CPM, co wymaga potwierdzenia w badaniach na większej grupie pacjentów.

Opracowane narzędzie stanowi podstawę do dalszych badań nad obiektywizacją diagnostyki dysfunkcji narządu żucia z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego.

Piśmiennictwo

1. *Valesan LF, Da-Cas CD, Réus JC, Denardin ACS, Garanhani RR, Bonotto D, Januzzi E, de Souza BDM*: Prevalence of temporomandibular joint disorders: a systematic review and meta-analysis. *Clin Oral Investig* 2021; 25, 2: 441-453.
2. *Zieliński G, Pajqk-Zielińska B, Ginszt M*: A meta-analysis of the global prevalence of temporomandibular disorders. *J Clin Med* 2024; 13, 5: 1365.
3. *Prusik N, Gawlak D*: Etiologia zaburzeń skroniowo-żuchwowych – obecny stan wiedzy. *Protet Stomatol* 2025; 75, 3: 213-224.
4. *Schiffman E, Ohrbach R, Truelove E, Look J, Anderson G, Goulet JP et al.*: Diagnostic Criteria for Temporomandibular Disorders (DC/TMD) for clinical and research applications: recommendations of the International RDC/TMD Consortium Network and Orofacial Pain Special Interest Group. *J Oral Facial Pain Headache* 2014; 28, 1: 6-27.
5. *Jakubowska S, Szerszeń MP, Kostrzewa-Janicka J*: Systemy śledzenia ruchów żuchwy – przegląd literatury. *Protet Stomatol* 2023; 73, 1: 18-28.
6. *Talmaceanu D, Bolog N, Leucuta D, Tig IA, Buduru S*: Diagnostic use of computerized axiography in TMJ disc displacements. *Exp Ther Med* 2022; 23, 3: 213.
7. *Surowiecki D, Tomasik M, Kostrzewa-Janicka J*: Qualitative alterations of mandibular kinematics in patients with myogenous temporomandibular disorders: an axiographic study using the Cadiax Diagnostic system. *Diagnostics* 2025; 15, 23: 3044.
8. *Schierz O, Klinger N, Schön G, Reissmann DR*: The reliability of computerized condylar path angle assessment. *Int J Comput Dent* 2014; 17, 1: 35-51.
9. *Ahlers MO, Petersen T, Katzer L, Jakstat HA, Roehl JC, Türp JC*: Condylar motion analysis: a controlled, blinded clinical study on the interindividual reproducibility of standardized evaluation of computer-recorded condylar movements. *Sci Rep* 2023; 13, 1: 11721.
10. *Lewandowska A, Mańka-Malara K, Kostrzewa-Janicka J*: Sagittal condylar inclination and transversal condylar inclination in different skeletal classes. *J Clin Med* 2022; 11, 9: 2664.
11. *Calil BC, da Cunha DV, Vieira MF, de Oliveira Andrade A, Furtado DA, Bellomo Junior DP, Pereira AA*: Identification of arthropathy and myopathy of the temporomandibular syndrome by biomechanical facial features. *Biomed Eng Online* 2020; 19, 1: 22.
12. *Schwendicke F, Samek W, Krois J*: Artificial intelligence in dentistry: chances and challenges. *J Dent Res* 2020; 99, 7: 769-774.
13. *Jha N, Lee KS, Kim YJ*: Diagnosis of temporomandibular disorders using artificial intelligence technologies: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One* 2022; 17, 8: e0272715.
14. *Shigemitsu R, Ogawa T, Sato E, Oliveira AS, Rasmussen J*: Kinematic classification of mandibular movements in patients with temporomandibular disorders based on PCA.

- Comput Biol Med 2025; 184: 109441.
15. Radej I, Dargiewicz E, Sawczuk-Siemieniuk M, Ferrando Cascales R, Ferrando Cascales Á, Agustín-Panadero R, Szarmach I: The role of maxillofacial structure and malocclusion on condylar displacement in maximum intercuspation and centric relation in patients seeking orthodontic treatment – a scoping review. *J Clin Med* 2023; 12, 2: 689.
16. Bindek-Sypień K, Baron S, Sypień M: Ocena przyczyn trzasku odwrotnego w stawie skroniowo-żuchwowym w obrazie klinicznym i aksjograficznym. *Protet Stomatol* 2010; 60, 4: 252-259.
17. Reda B, Contardo L, Prenassi M, Guerra E, Derchi G, Marceglia S: Artificial intelligence to support early diagnosis of temporomandibular disorders: a preliminary case study. *J Oral Rehabil* 2023; 50, 1: 31-38.
18. Zatt FP, Cordeiro JVC, Bohner L, de Souza BDM, Caldas VEA, Caldas RA: Using machine learning to classify temporomandibular disorders: a proof of concept. *J Appl Oral Sci* 2024; 32: e20240282.
- Zaakceptowano do druku: 17.09.2026 r.
Adres autorów: 02-097 Warszawa, ul. Binieckiego 6.
© Zarząd Główny PTS 2026.