

Trajektoria kwintowa – dwuwymiarowa reprezentacja muzyki*

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę reprezentacji utworów muzycznych w postaci trajektorii kwintowej. Istota tworzenia trajektorii kwintowej polega na obserwacji zestawu pojawiających się dźwięków z ustaloną rozdzielczością czasową. Liczności, bądź czas trwania poszczególnych dźwięków odzwierciedlony jest poprzez długości wektorów wpisanych w koło kwintowe, tzw. sygnatury muzyczne. Trajektoria kwintowa obrazująca zmienność w czasie sygnatury muzycznej pozwala o jakościową ocenę struktury harmonicznego utworu muzycznego. Postać trajektorii kwintowej zależy z charakterem utworu i może stanowić obiekt badań związanych z pozyskiwaniem wiedzy muzycznej, ściśle powiązany z problemami klasyfikacji gatunków muzycznych. W artykule przedstawiono koncepcję tworzenia trajektorii kwintowej i rysunki pokazujące przykłady trajektorii kwintowych dla różnych znanych utworów muzycznych.

Abstract. This paper presents a method for representing the musical works in the form of the trajectory of fifths. The essence of creating a trajectory of fifths consists in observing with a fixed time resolution a set of appearing sounds. The multiplicity, or duration of individual sounds is reflected by the lengths of vectors inscribed in the circle of fifths, so-called music signatures. The trajectory of fifths allows for a qualitative evaluation of the harmonic structure of a musical piece. The form of the trajectory of fifths is closely related to the character of the piece of music and can be an object of research related to the acquisition of music information retrieval, closely related to the problems of music genres recognition. This paper presents the concept of creating a trajectory of fifths and figures showing examples of trajectory of fifths for various well-known pieces of music. (**Trajectory of fifths - a two-dimensional representation of music**)

Słowa kluczowe: wizualizacja muzyki, wyszukiwanie informacji muzycznej, komputerowa analiza muzyki, analiza tonalna

Keywords: music visualization, music information retrieval, computational music cognition, tonal analysis

Wstęp

Historia modelowania współbrzmień sięga czasów Pitagorasa, który określił zasady matematycznego opisu dwudźwięków. Rozwinięciem tej koncepcji oraz idei obrazowania sygnałów, znanej pod nazwą krzywe Lissajous są figury obrazujące akordy, czyli tzw. akwety [8, 9]. Powiązanie wzajemne akordów znalazło odzwierciedlenie w sieciach harmonicznym Eulera. Ściśle związane z sieciami Eulera są różnorodne modele spiralne [3, 4, 21], reprezentujące relacje pomiędzy dźwiękami, akordami, czy też systemami tonalnymi. W literaturze prezentowanych jest wiele różnych modeli tonalnych, które różnią się złożonością, sposobem reprezentacji współbrzmień oraz możliwością wykorzystania w algorytmicznych metodach analizy muzyki. Ciekawą koncepcję opisu tonalnego przedstawił Longuent-Higgins [18, 19], proponując tzw. mapy tonalne. Bardzo złożony matematycznie model powiązania dźwięków, będący podstawą różnorodnych algorytmów został zaproponowany w pracy [3] i wykorzystany w różnorodnych aspektach analizy treści utworów muzycznych [4,6].

Algorytmiczne metody pozyskiwania wiedzy muzycznej są przedmiotem badań licznych zespołów badawczych. Dotyczą one klasyfikacji gatunków muzycznych [2, 23], sposobów aranżacji [12], analizy tonalnej utworów [1, 7], czy też określania poziomu emocji w muzyce [10, 24]. Dane o utworach muzycznych pozyskiwane są z informacji zawartych w różnych formach opisu utworów. W ostatnim czasie w procesie analizy bardzo szeroko korzysta się z metod sztucznej inteligencji, wykorzystujących sieci neuronowe [7, 16] i różnorodne metody uczenia maszynowego [25].

W komputerowych metodach klasyfikacji gatunków muzycznych bardzo ważną rolę odgrywa umiejętność oceny struktury harmonicznego utworu, ściśle powiązanej z dwoma aspektami analizy utworów: analizą częstotliwościową poszczególnych dźwięków [20] oraz analizą struktury harmonicznego sekwencji akordów [5, 11]. Danymi wejściowymi są zwykle informacje zawarte w plikach MIDI lub sygnałach audio. Analiza struktury harmonicznego utworów jest przedmiotem licznych badań, w których można dostrzec różnorodne sposoby wizualizacji współbrzmień oraz sekwencji akordów. Obrazowanie treści muzycznej może polegać na wizualizacji tego co słyszymy, a czasami

może również odzwierciedlać odczucia, pokazując występujące w utworze emocje, napięcia itp.

Bardzo prostą, a zarazem dobrze ugruntowaną muzycznie formą reprezentacji treści utworu muzycznego jest sygnatura muzyczna. Pozwala ona na stosunkowo proste i skuteczne określenie znaków przykluczowych [15] oraz tonacji utworu [13], na podstawie krótkiej próbki, zawierającej kilka dźwięków. Warto zwrócić uwagę, że ze względu na prostotę obliczeniową algorytmów świetnie nadaje się do implementacji sprzętowej w elektronicznych instrumentach muzycznych [15], gdyż w odróżnieniu od algorytmów wykorzystujących profile tonalne [17, 22] pozwala na określenie liczby i rodzajów znaków przykluczowych bez wyznaczenia jakiegokolwiek współczynnika korelacji. Okazuje się, że obserwacja zmienności sygnatury muzycznej w czasie, uwidoczniła w kształcie trajektorii kwintowej, umożliwia zgrubną ocenę struktury harmonicznego utworu [14]. Stwarza to możliwość różnicowania utworów muzycznych, powiązaną z oceną kształtu trajektorii kwintowej i jej położenia w kole kwintowym.

Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji obrazowania utworów muzycznych za pomocą trajektorii kwintowej, pokazanie przykładów trajektorii kwintowych dla znanych utworów muzycznych i wskazanie licznych, oryginalnych obszarów badawczych wykorzystujących trajektorie kwintowe.

Podstawowe pojęcia

Utwór muzyczny to sekwencja uporządkowanych w czasie dźwięków, bardzo często tworzących akordy. Analiza treści utworu może więc sprowadzać się do obserwacji zbioru dźwięków, które pojawiają się w kolejnych oknach czasowych. Naturalnym wyborem okna czasowego jest jego powiązanie z metrum analizowanego utworu. Tego typu zasada stoi u podstaw tworzenia sygnatur muzycznych [13]. Rozważmy początkowy fragment tradycyjnej kołedy przedstawiony na Rys.1.



Rys. 1. Fragment przykładowej kołedy

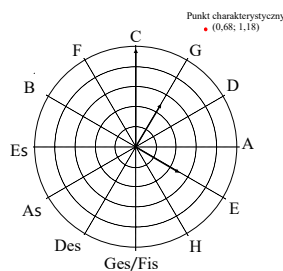
Zakładając ćwierćnotową rozdzielczość analizy, możliwe staje się powiązanie treści utworu z sekwencją ośmiu 12-elementowych wektorów, zawierających liczby określające licznosc występowania poszczególnych dźwięków, z pominięciem ich zakresów oktaowych. Zakładając uporządkowanie dźwięków zgodnie ze skalą chromatyczną (C, C#, D, D#, E, F, F#, G, G#, A, A#, H), kolejne wektory przyjmują następującą postać:

- (1)
- K1={2;0;0;0;1;0;0;1;0;0;0;0}
 - K2={2;0;0;0;1;0;0;1;0;0;0;0}
 - K3={1;0;0;0;1;0;0;0;0;2;0;0}
 - K4={1;0;0;0;1;0;0;0;0;2;0;0}
 - K5={0;0;2;0;0;1;0;0;0;1;0;0}
 - K6={1;0;1;0;0;1;0;0;0;1;0;0}
 - K7={0;0;1;0;0;0;0;2;0;0;0;1}
 - K8={0;0;1;0;0;0;0;2;0;0;0;1}

Każdy z wektorów, po normalizacji można przedstawić w postaci sygnatury muzycznej, która jest zbiorem wektorów wpisanych w koło kwintowe. Długości wektorów odpowiadają znormalizowanej licznosci poszczególnych dźwięków, a kierunek jest zgodny z położeniem dźwięków w kole kwintowym [13].

Przykładowa sygnatura odpowiadająca wektorowi K1, po normalizacji do wartości 1 (promień koła kwintowego) przedstawiona jest na Rys. 2.

$$K1_n = \{1; 0; 0; 0; 0; 1; 0; 0; 0; 1; 0; 0; 0; 0\}$$

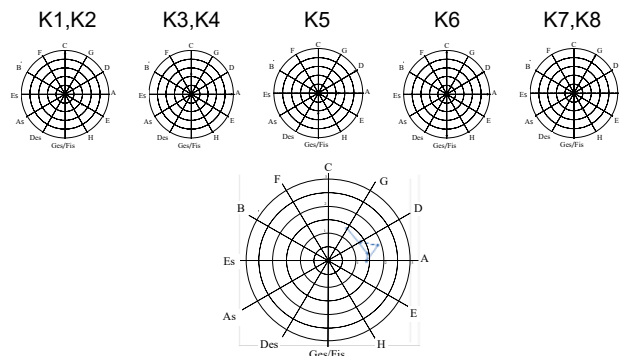


Rys. 2. Sygnatura muzyczna odpowiadająca wektorowi K1

Sygnatura muzyczna stwarza możliwość bardzo efektywnego pod względem obliczeniowym określenia znaków przykluczowych [15] oraz tonacji utworu [13]. Istota przedstawionych we wskazanych pracach algorytmów wynika z ułożenia na kole kwintowym dźwięków gamowłaściwych. Leżą one po jednej stronie koła kwintowego, zakładając jego podział względem osi pokrywającej się ze średnicą koła. I tak np. z osią skierowaną Des → G można kojarzyć tonację D-dur, gdyż patrząc zgodnie z kierunkiem Des → G, prawa część koła kwintowego wraz z dźwiękami należącymi do osi skierowanej zawierają wszystkie dźwięki gamowłaściwe tonacji D-dur. Układ dźwięków zgodny z ruchem wskazówek zegara poczynając od dźwięku G obejmuje dźwięki {G,D,A,E,H,Fis,Cis/Des}, co po uporządkowaniu tworzy gamę D-dur (D – E – Fis - G - A - H - Cis - D).

Trajektoria kwintowa

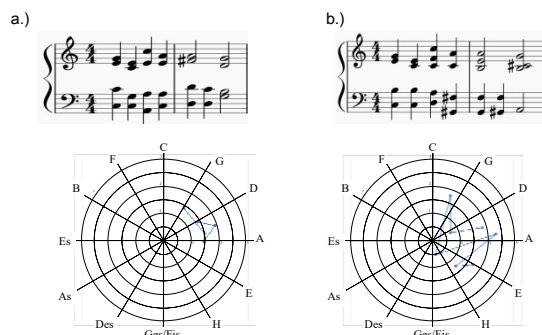
Każdej sygnaturze muzycznej można przyporządkować punkt charakterystyczny o współrzędnej końca wektora, będącego sumą wektorów tworzących sygnaturę muzyczną (Rys. 2). Łącząc kolejne punkty charakterystyczne odpowiadające sekwencji sygnatur uzyskujemy łamaną, nazywaną trajekcją kwintową [14]. Przykład sekwencji sygnatur opisanych wektorami K1-K8, oraz trajektorii kwintowej przedstawiono na Rys. 3. Promień koła kwintowego, w którym wpisana jest trajektoria kwintowa pokazany na Rys. 3 przyjmuje wartość 3 (długość wektora sumarycznego sygnatury przyjmuje teoretycznie wartości z zakresu <0; 3,86>, przy czym zwykle jest mniejszy od 3).



Rys.3. Sekwencja sygnatur oraz odpowiadająca jej trajektoria kwintowa fragmentu utworu z Rys. 1

Kształt trajektorii kwintowej może być źródłem cennych informacji zawierających dane o złożoności harmonicjnej utworów, jego tonacji, sposobie aranżacji, często bezpośrednio związanym z gatunkiem utworu.

Weźmy pod uwagę analizowany fragment kolędy. Linia melodyczna, znajdująca się w najwyższym głosie, może być uzupełniona w różny sposób. Całość stanowi ostateczny kształt kolędy, który jest charakterystyczny dla danej stylistyki muzycznej. Na Rys. 4 przedstawiono przykład trajektorii kwintowej dla tego samego fragmentu kolędy, przy czym w pierwszym przypadku (Rys. 4a) jest to jej tradycyjne opracowanie, a w drugim jazzowe (Rys. 4b).



Rys. 4. Trajektoria kwintowe fragmentów kolędy, a.) opracowanie tradycyjne, b.) opracowanie jazzowe

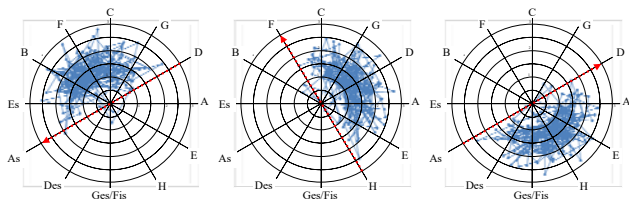
Obserwując kształt trajektorii kwintowej z Rys. 4b widać, że punkty trajektorii znajdują się na znacznie większym obszarze koła kwintowego, gdyż znalazły się zarówno dalej, jak i bliżej środka koła kwintowego. Wynika to ze struktury harmonicjnej utworu, w którym w przypadku opracowania jazzowego występuje więcej dźwięków spoza gamy C-dur, tworzące akordy septymowe oraz inne współbrzmienia charakterystyczne dla jazzu. Powyższe spostrzeżenia można matematycznie opisać różnymi parametrami trajektorii kwintowej [14], które przyjmują istotnie różne wartości dla utworów jazzowych, klasycznych, czy też rockowych.

Postać trajektorii kwintowej – źródło różnorodnych informacji

Analiza kształtu trajektorii kwintowej pozwala na pozyskiwanie różnorodnych informacji. Jej postać jest silnie związana z tonacją, złożonością harmoniczną oraz gatunkiem utworu.

Na Rys. 5 pokazano trajektorię kwintową Preludium nr 5 Es-dur ze zbioru preludii Das Wohltemperierte Klavier J.S Bacha. Rys. 5a. przedstawia trajektorię kwintową utworu w oryginalnej tonacji, a kolejne Rys. 5b i 5c trajektorię kwintową preludium przetransponowanego odpowiednio do tonacji C-dur oraz A-dur. Efektem transpozycji jest obrót trajektorii odpowiednio o 90° i 180°

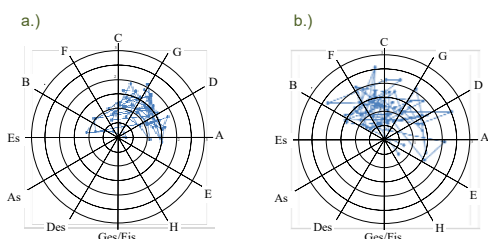
zgodnie z ruchem wskazówek zegara. Na rysunkach zaznaczono główną oś skierowaną pokazującą, że znacząca większość punktów trajektorii kwintowej znajduje się po prawej jest stronie, patrząc zgodnie z kierunkiem osi skierowanej.



Rys. 5. Trajektorie kwintowe preliudium Es-dur nr 7 ze zbioru preludiumów Das Wohltemperierte Klavier J. S Bacha w tonacji oryginalnej i transpozycjach utworu, a.) Es-dur, b.) C-dur, c.) A-dur

Nasuwa się pytanie, czy można na podstawie trajektorii kwintowej określić tonację utworu. Patrząc na trajektorie kwintowe przedstawione na Rys. 5a, 5b i 5c widać, że większość punktów trajektorii znajduje się w jednej połowie koła kwintowego. Niestety nie zawsze tak to wygląda, szczególnie w przypadku współczesnej muzyki klasycznej, muzyki jazzowej, które zawierają wiele dźwięków nie należących do gamy związanej z tonacją utworu.

Analizując dogłębnie trajektorie kwintowe utworów muzyki klasycznych okazało się, że istnieją teoretyczne podstawy stwierdzenia, że trajektorie kwintowe utworów w trybie durowym powinny obejmować mniejszy obszar niż trajektorie utworów w trybie molowym. Oczywiście analizie poddawane są trajektorie kwintowych zawierające identyczną liczbę punktów. Przykłady dwóch 128-punktowych trajektorii, podobnych w charakterze utworów, którymi są dwa pierwsze preludia ze zbioru I preludiumów Das Wohltemperierte Klavier J. S Bacha przedstawiono na Rys. 6. Trajektorie kwintowe preludium uzyskano zakładając ćwierćnutową rozdzielczość wykonanej analizy. Punkty trajektorii kwintowej preliudium c-moll znajdują się na większym obszarze koła kwintowego, co sprawia, że trajektoria tego preliudium ma większą powierzchnię, długość niż trajektoria preliudium w trybie durowym. Okazuje się, że tego typu hipotezę można potwierdzić odpowiednimi analizami statystycznymi, wykonanymi na wynikach badań eksperymentalnych prowadzonych na odpowiednio dużym zbiorze utworów, co dokładnie przedstawiono w pracy [14].

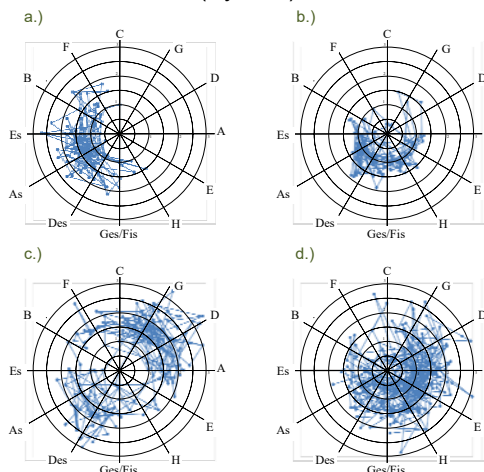


Rys. 6. Trajektorie kwintowe preludiumów ze zbioru Das Wohltemperierte Klavier J. S Bacha (zeszyt I), a.) Prelidium nr 1, C-dur, b.) Prelidium nr 2 c-moll

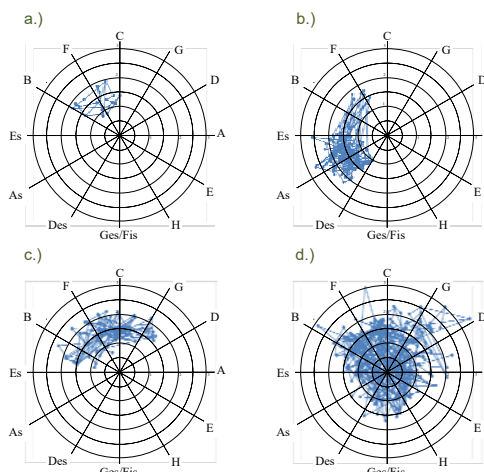
Analizy statystyczne powinny być zawsze wykonywane na trajektoriach kwintowych zawierających identyczną liczbę punktów. Możliwe jest jednak obserwowanie trajektorii kwintowych całych utworów, co umożliwia gołym okiem zaobserwować wiele różnic.

Na rys. 7 pokazano cztery przykłady trajektorii kwintowych bardzo znanych utworów muzyki klasycznej. Założono ćwierćnutową rozdzielczość analizy. Na kolejnych rysunkach pokazano trajektorie kwintowe: Prelidium Des-dur Op. 28 Nr 15 Fryderyka Chopina, tzw. Prelidium

deszczowego (Rys. 7a), I części Sonaty cis-moll op. 27 nr 2 Ludwiga van Beethovena, tzw. sonaty Księżycowej (Rys. 7b.), Prelidium X Claude Debussy'ego znanego pod nazwą Zatopiona Katedra (Rys. 7c) oraz utworu George Gershwna, Summertime (Rys. 7d).



Rys. 7. Trajektorie kwintowe przykładowych utworów muzyki klasycznej a.) Prelidium Des-dur Op. 28 Nr 15, Fr. Chopin, b.) Sonata cis-moll op. 27 nr 2, L. van Beethoven, c.) Prelidium X, C. Debussy, d.) Summertime, G. Gershwin



Rys. 8. Trajektorie kwintowe przykładowych utworów różnych gatunków muzycznych, a.) kolęda Cicha noc – wykonanie tradycyjne, b.) Muzyka elektroniczna, Vandgelis – Chariots of fire, c.) Rock, The Beatles - Girl, d.) Jazz - Caravan

Warto zwrócić uwagę, na dwa spostrzeżenia wynikające z obserwacji trajektorii pokazanych na Rys. 7. Dwie pierwsze trajektorie kwintowe mają zbliżony charakter wynikający z położenia większości punktów w jednej połowie koła kwintowego. W pierwszym przypadku chodzi o lewą część koła kwintowego, w drugim – dolną część, co wynika z różnych tonacji rozpatrywanych utworów. Jest to najczęściej obserwowany rozkład punktów trajektorii charakterystyczny na muzyki klasycznej. W przypadku Prelidium X Claude Debussy'ego obserwujemy trajektorię zawierającą dwie wyraźnie oddzielone części. Wynika to ze struktury utworu, w którym środkowa część jest skomponowana w innej tonacji niż część początkowa i końcowa. W przypadku utworu Georga Gershwna trajektoria znajduje się na znacznie większej powierzchni koła kwintowego.

Podobne różnice można zaobserwować dla różnych gatunków muzycznych. Kilka przykładów przedstawiono na Rys. 8.

Istotna różnica pomiędzy trajektoriami kwintowymi z Rys. 8 wynika oczywiście z długości wybranych utworów. Znacznie mniej punktów zawiera trajektoria kołody Cicha noc niż trajektoria znacznie dłuższego utworu jazzowego Caravan. Różnica tkwi jednak również w innej istotnej kwestii. Trajektoria kwintowa utworu jazzowego Caravan zawiera nie tylko znacznie więcej punktów, ale obejmuje również znacznie większą powierzchnię koła kwintowego, a dodatkowo wiele punktów znajduje się w okolicy środka koła. Dodatkowo punkty trajektorii są położone we wszystkich wycinkach koła kwintowego, tworzonych przez środek koła i punkty skojarzone z dźwiękami na jego obrzeżu. Taka sytuacja jest charakterystyczna dla utworu o bardzo złożonej strukturze harmoniczej, korzystającej z wszystkich możliwych dźwięków skali dwunastostopniowej. Znacznie prostszą harmonię utworów odzwierciedlają trajektorie kwintowe pokazane na rys. 8b i 8c, które wykorzystują w większości dźwięki gamowłaściwe. Powyższe spostrzeżenia zostały poparte szeregiem eksperymentów i analiz statystycznych przedstawionych między innymi w pracy [14].

Podsumowanie

Zaprezentowana w artykule oryginalna koncepcja dwuwymiarowego odwzorowania treści utworu muzycznego za pomocą trajektorii kwintowej wydaje się być bardzo obiecująca. Podobnie jak sygnatura muzyczna stanowi niezwykle wygodną postać do pozyskiwania różnych parametrów charakteryzujących muzyczne cechy analizowanego utworu. Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych prac, których celem będzie różnorodna analiza tonalna utworów oraz wykorzystanie parametrów trajektorii kwintowej w procesie klasyfikacji gatunków muzycznych. Pierwsze wyniki wydają się być bardzo obiecujące i jednoznacznie wskazują na korzyści wynikające z możliwości eksploracji wiedzy muzycznej, wynikające z obserwacji różnorodnych parametrów trajektorii kwintowej.

W najbliższej przyszłości planowane są prace, których istota sprowadzać się będzie do wykorzystania elementów parametryzacji trajektorii kwintowej w algorytmie określania tonacji utworu muzycznego. W pracy [12] zaprezentowano oryginalny algorytm określania tonacji na podstawie kształtu sygnatury muzycznej, który swoją prostotą przewyższa wszystkie znane z literatury metody analizy tonalnej, nawet te, które wykorzystują profile tonalne. Nasuwa się pytanie, czy nie można określić tonacji utworu na podstawie kształtu trajektorii kwintowej. Być może tego typu podejście mogłoby być wspomaganie przez wstępną analizę kształtu sygnatury muzycznej, która umożliwi określenie kierunku głównej osi skierowanej. Podstawowym problemem obliczeniowym w algorytmie określania tonacji na podstawie kształtu sygnatury muzycznej jest sposób wyboru tonacji spośród dwóch tonacji paralelnych, wskazanych przez główną oś skierowaną sygnatury. Wydaje się, że trajektorie kwintowe utworów muzycznych w tonacjach paralelnych powinny być istotnie różne pod względem rozmieszczenia punktów trajektorii w kole kwintowym, które można by ocenić analizując obrys trajektorii oraz odległość środka trajektorii kwintowej od środka koła kwintowego.

Równie ciekawym obszarem badawczym są planowane poszukiwania cech trajektorii, które mogą różnicować trudne do rozpoznania style muzyczne. Przykładowo nasuwa się pytanie, jakich parametrów użyć, aby jak najprościej różnicować współczesną muzykę klasyczną i jazz. Oczywiście przedmiotem prac będą również szeroko rozumiane porównania opracowanych metod z algorytmami klasyfikacji utworów znanymi z literatury.

* Praca częściowo finansowana ze środków Ministerstwa Edukacji i Nauki.

Autorzy: Michalina Kania, e-mail: michkan917@student.polsl.pl
prof. dr hab. inż. Dariusz Kania, Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki, ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: dkania@polsl.pl

LITERATURA

- [1] Albrecht J., Shanahan D., The Use of Large Corpora to Train a New Type of Key-Finding Algorithm: An Improved Treatment of the Minor Mode, *Music Perception: An Interdisciplinary Journal*, 31(1), (2013), 59-67
- [2] Burred, J.J., Hierarchical approach to automatic musical genre classification, *Journal of the Audio Engineering Society*, 52(7/8), (2014), 724-739
- [3] Chew E., Towards a Mathematical Model of Tonality, Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [4] Chew E., Out of the Grid and Into the Spiral: Geometric Interpretations of and Comparisons with the Spiral-Array Model, *Computing in Musicology*, 15, (2008), 51-72.
- [5] Chen T-P., Su L., Functional harmony recognition of symbolic music data with multi-task recurrent neural networks, *19th ISMIR Conference*, Paris, France, (2018), 90-97
- [6] Chuan C-H, Chew E., Audio Key Finding: Considerations in System Design and Case Studies on Chopin's 24 Preludes, *EURASIP Journal on Advances in Audio Signal Processing*, (2007), 1-15
- [7] Dawson M.: Connectionist Representations of Tonal Music: Discovering Musical Patterns by Interpreting Artificial Neural Networks, AU Press, Athabasca University, 2018
- [8] Grekow J., Metoda transformowania muzyki w figury 3D, *Przegląd Elektrotechniczny*, 89(11), (2013), 327-329
- [9] Grekow J.: Metoda transformowania muzyki w figury 4D, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91(4), (2015), 159-162
- [10] Grekow J., Musical performance analysis in terms of emotions it evokes. *Journal of Intelligent Information Systems*, 51(4), (2018), 415-437
- [11] Jacoby N., Tishby N., Tymoczko D., An information theoretic approach to chord categorization and functional harmony, *Journal of New Music Research*, 44(3), (2015), 219-244
- [12] Kania, P., Kania, D., Sygnatura utworu w procesie reprezentacji i analizy treści utworu muzycznego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94(4), (2018), 196-200.
- [13] Kania D., Kania P.: A key-finding algorithm based on music signature, *Archives of Acoustics*, 44(3), (2019), 447-457
- [14] Kania D., Kania P., Łukaszewicz T., Trajectory of fifths in music data mining, *IEEE Access*, Vol. 9, (2021), 8751 – 8761
- [15] Kania P., Kania D., Łukaszewicz T., A hardware-oriented algorithm for real-time music key signature recognition, *Applied Sciences, Computing and Artificial Intelligence*, 11, 8753, (2021), 1-16
- [16] F. Korzeniowski, G Widmer, End-to-end musical key estimation using a convolutional neural network, *25th European Signal Processing Conference*, (2017), 966-970
- [17] Krumhansl C.L.: Cognitive Foundations of Musical Pitch, New York: Oxford University Press, 1990, 77-110
- [18] Longuet-Higgins H.C., Letter to a musical friend, *The Music Review*, 23, 244, 1962
- [19] Longuet-Higgins, H.C., Second letter to a musical friend, *The Music Review*, 23, 280, 1962
- [20] Ntalampiras, S., A novel holistic modeling approach for generalized sound recognition. *IEEE Signal Processing Letters*, 20, 2, (2013), 185-188
- [21] Shepard R.: Geometrical approximations to the structure of musical pitch, *Psychological Review*, 89, (1982), 305-333
- [22] Temperley D., Marvin E.: Pitch-Class Distribution and Key Identification, *Music Perception*, 25, 3, (2008), 193-212
- [23] Weiß C., Brand F., Müller M., Mid-level Chord Transition Features for Musical Style Analysis, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP 2019*, 12-17 May, Brighton, United Kingdom, (2019)
- [24] Yang S., Reed C., Chew E., Barthelet M., Examining emotion perception agreement in live music performance, *IEEE Transactions on Affective Computing*, (2021), 1-17
- [25] Zhou X.-H., Lerch A., Chord Detection Using Deep Learning, *Proceedings of SIMIR 2015*, Malaga, (2015), 52-58