

Sygnatura kwintowa w procesie wykrywania trybu tonalnego utworu muzycznego

Signature of fifths in the process of detecting the tonal mode of a musical piece

Streszczenie. W artykule przedstawiono oryginalną metodę detekcji trybu tonalnego utworów muzycznych. W procesie oceny trybu tonalnego wykorzystano sygnaturę kwintową, stanowiącą zbiór wektorów odpowiednio wpisanych w koło kwintowe. Długości poszczególnych wektorów odpowiadają znormalizowanym licznościom dźwięków występujących w analizowanym fragmencie utworu. Początek każdego wektora osadzony jest w środku koła kwintowego, a jego kierunek określony jest jednym z dwunastu dźwięków opisujących to koło, odpowiadających układowi tonacji durowych. Wykrywanie trybu tonalnego opiera się na analizie sygnatur kwintowych wyznaczonych dla ustalonych okien czasowych utworu. Dla każdej sygnatury kwintowej określany jest wektor charakterystyczny, którego kierunek porównywany jest z kierunkiem osi trybu dur/moll. Detekcja trybu tonalnego odbywa się na podstawie znaku sumy kątów występujących pomiędzy wektorami charakterystycznymi rozważanych sygnatur kwintowych a osią trybu dur/moll.

Abstract. In this article, we present a novel method for detecting the tonal mode of musical works. The algorithm utilizes the concept of the signature of fifths, a set of vectors properly inscribed in the circle of fifths. The lengths of the individual vectors correspond to the normalized multiplicities of the sounds occurring in the analyzed fragment of the work. Each vector is anchored at the center of the circle of fifths and directed toward one of the twelve notes that define this circle, corresponding to the major tonal system. The determination of the tonal mode is based on analyzing the signatures of fifths obtained for established analytical time windows. For each such signature, a characteristic vector is determined, the direction of which is compared with that of the major/minor mode axis. The decision regarding the tonal mode is based on the sign of the sum of angles between the characteristic vectors of the considered signatures of fifths and the major/minor mode axis.

Słowa kluczowe: wyszukiwanie informacji muzycznej, komputerowa analiza muzyki, klasyfikacja stylu muzycznego, akustyka muzyczna
Keywords: music information retrieval, computational music cognition, music genre classification, music acoustics

Wstęp

Postęp w zakresie technik uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji przyczynił się do gwałtownego rozwoju metod pozyskiwania informacji muzycznej oraz klasyfikacji muzyki. W procesie klasyfikacji gatunków muzycznych wykorzystuje się zwykle wiele wskaźników różnicujących utwory [1, 2]. Jednym z takich wskaźników może być proponowany w niniejszej pracy wskaźnik trybu tonalnego utworu.

Znanych jest wiele modeli tonalności, przy czym do najpopularniejszych z nich należą modele dwu- i trójwymiarowe [3, 4, 5]. Warto podkreślić, że w ostatnim czasie opracowane zostały również znacznie bardziej wyrafinowane modele wielowymiarowe [6, 7].

Prekursorem dwuwymiarowego opisu tonalności był Leonard Euler. Opracował on sieć harmoniczną Tonnetz, obrazującą relacje pomiędzy dźwiękami tworzącymi akordy [8]. Podobne relacje interwałowe stanowią podstawę dwuwymiarowych map Longueta-Higginsa [5, 9], czy też przestrzennych modeli spiralnych [3, 4, 10]. W ostatnich latach w literaturze pojawiło się wiele przykładów metod analizy tonalnej opartych na uczeniu maszynowym tudzież sztucznej inteligencji [11, 12, 13, 14].

Profile tonalne odgrywają istotną rolę w procesie analizy tonalnej, służąc do określania tonacji utworów [15, 16, 17, 18, 19]. Mimo opracowania wielu profili tonalnych [11, 15, 18, 19], ich zastosowanie do precyzyjnego i pewnego określenia trybu tonalnego utworów pozostaje problematyczne. W przypadku błędnego określenia tonacji, wskazywana jest również niewłaściwa tonacja paralelna lub jednoimienna, co bezpośrednio wiąże się z nieprawidłowym wskazaniem trybu tonalnego. Warto zauważyć, że znane są także metody określania tonacji, których istota polega na użyciu powiązań tonalnych odzwierciedlonych w strukturze koła kwintowego [17, 20]. Stały się one podstawą prac badawczych wykorzystujących sygnaturę kwintową [21, 22, 23, 24].

Jednym z problemów analizy tonalnej jest rozróżnianie utworów skomponowanych w tonacjach durowych i molowych [25]. Muzyka w tonacji durowej ma charakter

pogodny i wesoły, natomiast w tonacji molowej jest smutna, melancholijna czy nawet smutna. Elementy nastroju, wyczuwalne przez słuchaczy, są istotne z punktu widzenia klasyfikacji utworów, co podkreśla znaczenie procesu detekcji trybu dur/moll.

Doświadczenia związane z wykorzystaniem sygnatury kwintowej w procesie określania znaków przykluczowych [21] oraz tonacji [17, 20], jak i bardzo obiecujące wyniki prac koncentrujących się na badaniu zmienności sygnatury kwintowej w czasie, zobrazowanej w formie trajektorii kwintowej [24, 26, 27], stały się inspiracją do analizy powiązań takich sygnatur z trybem tonalnym dur/moll. W pracy [20] przedstawiono prosty sposób określenia tonacji oparty na analizie sygnatury kwintowej. Metoda ta sprowadza się do oceny odchylenia głównej osi skierowanej sygnatury od osi trybu dur/moll. Uzyskane wyniki zachęciły nas do opracowania algorytmu klasyfikacji trybu dur/moll przedstawionego w dalszej części artykułu.

Celem pracy jest przedstawienie koncepcji metody umożliwiającej rozróżnianie tonacji durowej i molowej na podstawie sygnatury kwintowej utworu muzycznego. Istota idei polega na określaniu sygnatur kwintowych reprezentujących fragmenty utworu i analizie odchylenia ich głównych osi skierowanych od osi trybu dur/moll.

Podstawy teoretyczne

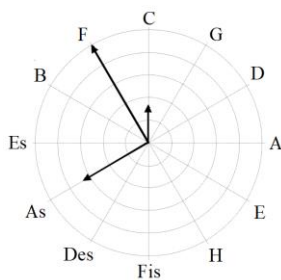
Utwór muzyczny to sekwencja dźwięków, która zwykle składa się linii melodycznej oraz akompaniamentu. W kolejnych oknach czasowych utworu możemy obserwować zmieniające się zbiory dźwięków. Często w tych zbiorach mogą znaleźć się te same dźwięki oddalone o interwał oktawy lub jej wielokrotność. Naturalnie, wybór okna czasowego powiązać można z podstawą metryczną analizowanego utworu. Tego typu zasada stoi u podstaw tworzenia sygnatur kwintowych [16, 20].

Rozważmy pierwsze okno ćwierćnutowe Preludium nr 12, f-moll, J. S. Bacha ze zbioru Das Wohltemperierte Klavier, część I (rys.1.). Pomijając czas trwania dźwięków, okno to zawiera sześć elementów: f, as, f¹, as¹, c², f².

Pomijając zakresy oktafowe, po normalizacji względem wartości maksymalnej, która w rozważanym przypadku wynosi 3, liczności poszczególnych dźwięków kształtują się następująco: $|\vec{F}| = 1$, $|\vec{As}| = 0,67$, $|\vec{C}| = 0,33$. Zakładając jednostkowy promień koła kwintowego, znormalizowane liczności dźwięków odpowiadają długościom wektorów tworzących sygnaturę kwintową przedstawioną na rysunku 2.

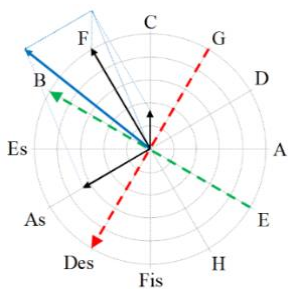


Rys. 1. Początkowy fragment Preludium nr 12, f-moll, J. S. Bacha ze zbioru Das Wohltemperierte Klavier, część I (BWV 857).



Rys. 2. Sygnatura kwintowa pierwszego okna ćwierćnutowego Preludium nr 12, f-moll, J. S. Bacha ze zbioru Das Wohltemperierte Klavier, część I (BWV 857).

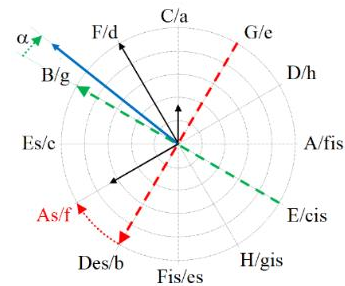
Dla przedstawionej na rysunku 2 sygnatury kwintowej możemy określić kilka charakterystycznych elementów, pozwalających na rozpoznanie tonacji utworu lub funkcji harmonicznego odpowiadającej analizowanej próbce. Elementy te zostały zobrazowane na rysunku 3. Należą do nich: wyróżniona czerwonym kolorem główna oś skierowana sygnatury kwintowej (oś, dla której różnica sum modułów wektorów znajdujących się po prawej stronie oraz po lewej stronie przyjmuje wartość maksymalną), prostopadła do niej oś trybu dur/moll (kolor zielony) oraz będący sumą wektorów tworzących sygnaturę, wektor charakterystyczny sygnatury kwintowej (kolor niebieski). Informacje na temat sposobu tworzenia wspomnianych osi oraz wektora charakterystycznego sygnatury kwintowej można znaleźć w [20].



Rys. 3. Sygnatura kwintowa i skojarzone z nią elementy: główna oś skierowana sygnatury kwintowej (kolor czerwony), oś trybu dur/moll (kolor zielony) oraz wektor charakterystyczny (kolor niebieski).

Z poszczególnymi pozycjami koła kwintowego można skojarzyć nie tylko tonacje durowe, ale również paralelne do nich tonacje molowe. Określenie trybu tonalnego ograniczyć można zatem do wyznaczenia jednej spośród dwóch paralelnych tonacji. Wybór pary tonacji paralelnych wynika z kierunku głównej osi skierowanej sygnatury kwintowej. I tak dla przedstawionej na rysunku 4 sygnatury kwintowej para

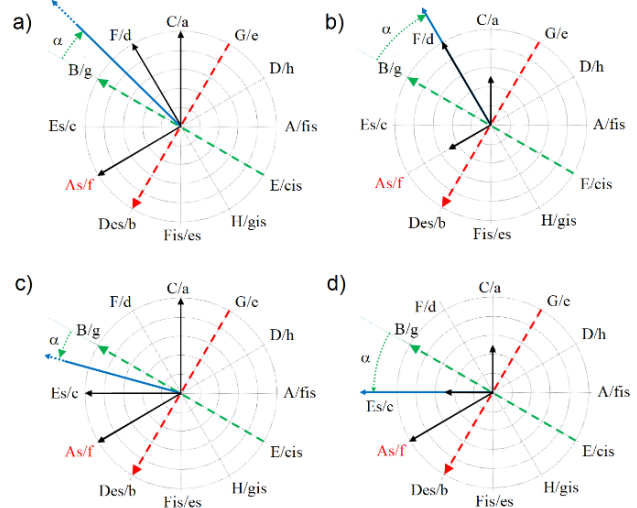
tonacji paralelnych, czyli tonacji As-dur i f-moll, odchyłona jest o 30° względem tonacji wskazanych przez główną oś skierowaną sygnatury kwintowej [17, 20].



Rys. 4. Zobrazowanie elementów pozwalających na wyznaczenie tonacji na podstawie sygnatury kwintowej (*opis w tekście*).

Okazuje się, że wybór jednej spośród dwóch tonacji paralelnych sprowadzić można do określenia wartości wyróżnionego na rysunku 4 kąta α (kąta pomiędzy wektorem charakterystycznym sygnatury kwintowej a osią trybu dur/moll) [20]. W analizowanym przypadku jego wartość wynosi $-8,6^\circ$, co ze względu na ujemny znak wskazuje na tonację molową, czyli f-moll [20]. Widać więc, że na podstawie pierwszego okna ćwierćnutowego udało się właściwie określić tonację analizowanego utworu.

Należy zauważyć, że wartość kąta α jest nie tylko powiązana z trybem tonalnym. Odzwierciedla ona również „siłę” powiązania badanej próbki ze wskazaną tonacją. Zależność kąta α od trybu tonalnego oraz stopnia zwielokrotnienia dźwięku tonalnego pokazano na przykładzie sygnatur z rysunków 5a-d, otrzymanych kolejno dla: akordu f-moll (F-As-C), akordu f-moll ze zdwojoną toniką, akordu As-dur (As-C-Es) oraz akordu As-dur ze zdwojoną toniką.



Rys. 5. Przykładowe sygnatury kwintowe: a) akord f-moll, b) f-moll ze zdwojoną toniką, c) akord As-dur, d) As-dur ze zdwojoną toniką.

Sygnaturom tym odpowiadają następujące wartości kątów pomiędzy wektorem charakterystycznym sygnatury kwintowej i osią trybu dur/moll: $\alpha_a = -15^\circ$, $\alpha_b = -30^\circ$, $\alpha_c = 15^\circ$, $\alpha_d = 30^\circ$. Ujemne wartości kąta wskazują na tryb molowy (rys. 5a i 5b), a dodatnie na tryb durowy (rys. 5c i 5d). Jak widać, podwojenie dźwięku tonalnego spowodowało zwiększenie wartości bezwzględnej kąta α z 15° do 30° .

Algorytm rozpoznawania trybu tonalnego

W niniejszej sekcji przedstawiono nowatorski algorytm określania trybu tonalnego dur/moll, wykorzystujący koncepcję sygnatury kwintowej. W ramach metody utwór muzyczny dzielony jest na okna czasowe, a dla każdego z okien wyznaczana jest główna oś skierowana sygnatury. Szczególną rolę w procesie analizy odgrywają sygnatury określone dla pierwszego i ostatniego okna. Dzieje się tak, ponieważ zwykle początek oraz koniec utworu są bardzo silnie powiązane z jego tonacją. Zdarzają się oczywiście dzieła, w który początek skomponowany jest w innej tonacji niż zakończenie, dlatego oprócz analizy sygnatur uzyskanych dla krańców utworu w proponowanej metodzie brana pod uwagę jest także sygnatura stanowiąca sumę sygnatur otrzymanych dla wszystkich okien czasowych. Na jej podstawie wyznaczany jest wektor charakterystyczny sygnatury całego utworu, który zwykle zlokalizowany jest w sektorze koła kwintowego właściwym dla trybu tonalnego utworu.

Opracowany algorytm składa się z pięciu głównych kroków, z których pierwszy dogłębnie przedstawiony został w innych pracach, między innymi w [17, 22]. Ogólnie rzecz ujmując, istota algorytmu sprowadza się do określenia wartości współczynnika β , stanowiącej sumę kątów α występujących pomiędzy wektorami charakterystycznymi poszczególnych sygnatur kwintowych a osią trybu dur/moll. Jak już wspomniano, brane pod uwagę są sygnatury początku utworu i jego końca, a także sygnatura uzyskana w wyniku zsumowania wszystkich sygnatur danego dzieła muzycznego.

Kolejne kroki proponowanego algorytmu detekcji trybu tonalnego utworu:

1. Ustalenie pary tonacji paralelnych, a tym samym osi trybu dur/moll utworu, zgodnie z algorytmem, którego opis znaleźć można w pracach [17, 20, 21, 22].
2. Wyznaczenie sygnatur kwintowych dla kolejnych okien czasowych utworu. W ramach prowadzonych eksperymentów przyjęto szerokość okna równą podstawie metrycznej danego utworu. Tworząc sygnatury analizowano licznosci poszczególnych dźwięków, pomijając czasy ich trwania.
3. Wyznaczenie wartości kątów:
 - α_1 – kąt pomiędzy wektorem charakterystycznym sygnatury kwintowej a osią trybu dur/moll, uzyskany dla sygnatury opisującej pierwsze okno analizowanego utworu;
 - α_k – kąt pomiędzy wektorem charakterystycznym sygnatury kwintowej a osią trybu dur/moll, uzyskany dla sygnatury opisującej ostatnie okno analizowanego utworu;
 - α_c – kąt pomiędzy wektorem otrzymanym w wyniku zsumowania wektorów charakterystycznych uzyskanych dla wszystkich sygnatur kwintowych utworu a osią trybu dur/moll.
4. Wyznaczenie współczynnika β jako sumy wartości kątów uzyskanych w poprzednim punkcie, tj. $\beta = \alpha_1 + \alpha_k + \alpha_c$.
5. Wskazanie trybu tonalnego zgodnie z regułą:
 - tryb durowy, gdy $\beta > 0^\circ$;
 - tryb molowy, gdy $\beta < 0^\circ$;
 - brak decyzji, gdy $\beta = 0^\circ$.

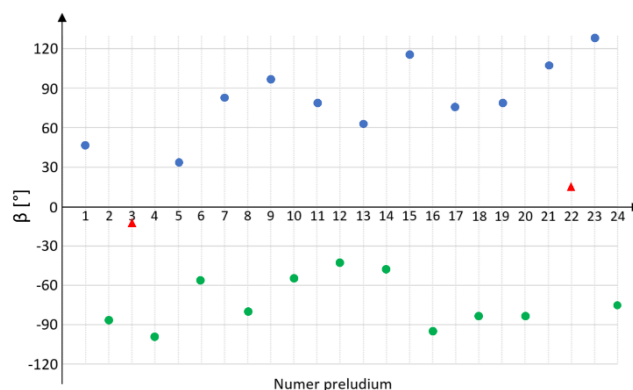
Wyniki eksperymentów

W celu potwierdzenia skuteczności rozpoznawania trybu tonalnego z użyciem zaproponowanego algorytmu, przeprowadzono eksperymenty w oparciu o cykl 24 preludiów op. 28 F. Chopina. Utwory te zostały skomponowane we wszystkich możliwych tonacjach, poczynając od tonacji bez znaków przykluczowych (C-dur, a-moll), z jednym krzyżykiem (G-dur, e-moll), z dwoma krzyżykami (D-dur, h-moll) itd. Utworom skomponowanym w tonacjach durowych przypisano numery nieparzyste, a w tonacjach molowych – parzyste. Wszystkie z rozważanych preludiów, reprezentowane w postaci symbolicznej (pliki MIDI), zostały przetransponowane odpowiednio do tonacji C-dur bądź a-moll. Do realizacji tego zadania wykorzystano program MuseScore. Pozwoliło to na ocenę skuteczności proponowanej metody bez obarczania jej ewentualnym błędem w określeniu tonacji utworu. Wykorzystane w eksperymentach pliki MIDI zaczerpnięto z ogólnodostępnych zbiorów muzycznych.

Analizie poddano każdy utwór, dzieląc go na fragmenty skojarzone z odcinkami czasowymi, odpowiadającymi podstawie metrycznej. Jako że wszystkie utwory zostały przetransponowane do tonacji C-dur bądź a-moll, osią trybu dur/moll była oś $As \rightarrow D$, tworząca z osią OX kąt równy 30° . Znając kierunek osi trybu dur/moll, wyznaczono kąt występujący pomiędzy nią a wektorem charakterystycznym pierwszej i ostatniej sygnatury kwintowej, odpowiednio α_1 i α_k . W kolejnym etapie wyznaczono wektor będący sumą wektorów charakterystycznych wszystkich sygnatur kwintowych utworu. Pozwoliło to na obliczenie trzeciego kąta, tj. α_c , opisującego odchylenie wspomnianego wektora wypadkowego od osi trybu dur/moll. Znając wartości kątów α_1 , α_k , α_c , możliwe stało się wyznaczenie sumy tych kątów, tj. $\beta = \alpha_1 + \alpha_k + \alpha_c$, na podstawie której podjęta została decyzja dotycząca trybu tonalnego utworu.

Biorąc pod uwagę istotę opracowanego algorytmu, warto zauważyć, że w przypadku utworów wyraźnie osadzonych w tonacjach, wartości kątów α_1 , α_k , α_c przyjmują identyczne znaki. W przypadku utworów rozpoczynających i kończących się w różnych tonacjach, znaki wartości kątów α_1 , α_k , α_c nie są jednakowe. W tego typu sytuacjach decyzja o trybie tonalnym zależy przede wszystkim od wartości kąta α_c , który skojarzony jest całym utworem. Zwykle wartość tego kąta ma decydujący wpływ na właściwe określenie trybu tonalnego.

Wartości β uzyskane dla poszczególnych preludiów zobrazowano na wykresie z rysunku 6.



Rys. 6 Wartości β dla poszczególnych preludiów op. 28 F. Chopina.

Analizując wykres łatwo zauważyć, że dla zdecydowanej większości preludiów skomponowanych w tonacjach durowych, wartość β jest większa od 0 (punkty wyróżnione kolorem niebieskim). Wyjątek stanowi preludium nr 3, dla

którego $\beta = -12,98^\circ$. Przyczyna niewłaściwej decyzji dla tego utworu tkwi w złej interpretacji jego zakończenia. Preludium to kończy się długim arpeggio z ostatnim dźwiękiem akordu tonicznego, którym jest tercja. W przypadku preludium skomponowanych w tonacjach molowych (numery parzyste) błąd detekcji trybu tonalnego również dotyczył tylko jednego utworu (preludium nr 22). Tym razem niewłaściwą decyzję wiązać można z nietypowym początkiem utworu oraz z zakończeniem w postaci akordu z przednutką, dodatkowo wykonanego w postaci arpeggio.

Warto podkreślić, że błędne decyzje, zaobserwowane tylko dla 8,3% analizowanych utworów, wynikają z problemu doboru okien analizy. Trudności w analizie można spodziewać się w przypadku zmiany tempa, metody wykonawczej polegającej na wahanii tempa (rubato), czy też obecności różnego typu przednutek, tryli oraz arpeggio. Wszystkie te elementy są charakterystycznymi składnikami muzyki F. Chopina.

Wydaje się, że zaproponowana w pracy metoda detekcji trybu tonalnego może być skuteczniejsza po zaadaptowaniu jej do analizy utworów w formacie audio (np. wav). W tego typu reprezentacji w oknie analizy pojawia się wybrzmienia dźwięków z poprzednich okien, które mogą korzystnie wpłynąć na wykrywanie właściwych akordów.

Podsumowanie

W artykule zaproponowano metodę detekcji trybu tonalnego utworów muzycznych. Jej najważniejszym

nowatorskim elementem jest wnioskowanie oparte na teoretycznych aspektach muzyki oraz stosunkowo niska złożoność obliczeniowa. Prostota metody oraz jej skuteczność wynikają z odwołania się do koncepcji sygnatury kwintowej, której struktura odzwierciedla układ dźwięków opisujących koło kwintowe.

Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań. W ramach kolejnych prac planowane jest sprawdzenie możliwości detekcji trybu tonalnego w oparciu o analizę rozkładu punktów trajektorii kwintowej [24, 26, 27]. Trajektoria kwintowa obrazuje zmienność sygnatury kwintowej w czasie, co sprawia, że rozmieszczenie jej punktów powinno być ściśle powiązane z trybem tonalnym utworu. Planowana jest również adaptacja zaprezentowanej metody do potrzeb analizy utworów zapisanych w formatach audio. Oczekuje się, że dalsze prace doprowadzą do powstania efektywnego wskaźnika trybu tonalnego, który znajdzie zastosowanie w zautomatyzowanych procesach klasyfikacji muzyki w tych właśnie formatach.

Praca częściowo finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

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

LITERATURA

- [1] Kostrzewa D., Mazur W., Brzeski R., Wide Ensembles of Neural Networks in Music Genre Classification, International Conference on Computational Science ICCS 2021, Springer, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 13351, 2022, pp. 64-71.
- [2] Rosner A., Kostek B., Automatic music genre classification based on musical instrument track separation, Journal of Intelligent Information Systems., vol. 50, no. 2, 2018, pp. 363–384.
- [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] Longuet-Higgins H.C., Letter to a musical friend, The Music Review, 23, 244, 1962.
- [6] Bernardes G., Cocharro D., Caetano M., Guedes C., & Davies M. E. P., A Multi-Level Tonal Interval Space for Modelling Pitch Relatedness and Musical Dissonance, Journal of New Music Research, 45(4), 2016, pp. 281-294.
- [7] Harte C., Sandler M., & Gasser M., Detecting harmonic change in musical audio. In Proceedings of special 1st ACM workshop on Audio and music computing multimedia, 2006, pp. 21-26.
- [8] Euler L., Tentamen novae theoriae musicae ex certissimis harmoniae principiis dilucide expositae (in Latin). Saint Petersburg Academy, 1739, p. 147.
- [9] Longuet-Higgins H.C., Second letter to a musical friend, The Music Review, 23, 280, 1962.
- [10] Shepard R., Geometrical approximations to the structure of musical pitch, Psychological Review, 1982, 89, 305–333
- [11] Dawson M., Connectionist Representations of Tonal Music: Discovering Musical Patterns by Interpreting Artificial Neural Networks, AU Press, Athabasca University, 2018.
- [12] Deng J., Kwok Y-K., Large vocabulary automatic chord estimation using deep neural nets: Design framework, system variations and limitations., arXiv preprint arXiv:1709.07153, 2017.
- [13] Korzeniowski F., Widmer G., End-to-end musical key estimation using a convolutional neural network. In Proceedings of the 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), 2017, pp. 966–970.
- [14] Zhou X.-H., Lerch A., Chord Detection Using Deep Learning, Proceedings of ISMIR 2015, Malaga, 2015, pp. 52–58.
- [15] 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, Vol. 31, No. 1 2013, pp. 59-67.
- [16] Herremans D., Chew E., "Morpheus: generating structured music with constrained patterns and tension", IEEE Transactions on Affective Computing, Vol. 10, (4), 2019, pp. 520-523.
- [17] Kania D., Kania P., A key-finding algorithm based on music signature, Archives of Acoustics, Vol. 44, No 3, 2019, pp. 447-457.
- [18] Krumhansl C.L., Cognitive Foundations of Musical Pitch, New York: Oxford University Press, 1990, pp. 77-110.
- [19] Temperley D., Marvin E., Pitch-Class Distribution and Key Identification, Music Perception, Vol. 25, Issue 3, 2008, pp. 193–212.
- [20] Kania P., Kania D., Łukasiewicz T., A low complexity key-finding algorithm based on the signature of fifths, Archives of Acoustics, Vol. 49, No 4, 2024, pp. 491-505.
- [21] Kania P., Kania D., Łukasiewicz T., A hardware-oriented algorithm for real-time music key signature recognition, Applied Sciences, Computing and Artificial Intelligence, 11, 8753, 2021, pp.1-16.
- [22] Kania M., Łukasiewicz T., Kania D., Mościńska K., Kulisz J., A comparison of the music key detection approaches utilizing key-profiles with a new method based on the signature of fifths, Applied sciences 12 (21), 11261, 2022, pp. 1-18.
- [23] Łukasiewicz T., Kania D., A Music Classification Approach based on the Trajectory of Fifths, IEEE Access, Vol. 10, 2022, pp. 73494 – 73502 doi: 10.1109/ACCESS.2022.3190016.
- [24] Łukasiewicz T., Kania D., Trajectory of Fifths Based on Chroma Subbands Extraction – A New Approach to Music Representation, Analysis, and Classification, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 47, no. 3, pp. 2157-2169, March 2025, doi: 10.1109/TPAMI.2024.3519420.
- [25] Duan Z., Lu L., Zhang C., Audio tonality mode classification without tonic annotations, IEEE International Conference on Multimedia and Expo, Germany, 2008, pp. 1361-1364.
- [26] Kania D., Kania P., Łukasiewicz T., Trajectory of fifths in music data mining, IEEE Access, Vol. 9, 2021, 8751 – 8761.
- [27] Kania M., Kania D., Trajektoria kwintowa-dwuwymiarowa reprezentacja muzyki, Przegląd Elektrotechniczny, R. 98, Nr 6, 2022, ss.70-73