

Czy jest możliwa automatyczna interpretacja EKG za pomocą zdjęcia wykonanego smartfonem?

Is it possible to take an ECG photo and analyse it automatically with a smartphone?

Emanuel Tataj¹, Andrzej Cacko^{1,2}, Grzegorz Karczmarewicz¹, Kacper Pawlik¹, Gabriela Parol²

¹Zakład Informatyki Medycznej i Telemedycyny Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego

²I Katedra i Klinika Kardiologii Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego

Streszczenie

Wstęp. Obecnie brakuje narzędzi umożliwiających szybką digitalizację i wspierającą interpretację papierowych zapisów elektrokardiograficznych (EKG). Powszechność urządzeń typu smartfonu sugeruje ich wykorzystanie w praktyce jako narzędzi wspomagających interpretację zapisów EKG. Celem pracy jest określenie możliwości wykorzystania darmowej aplikacji mobilnej i urządzenia typu smartfonu w ocenie częstotliwości zespołów QRS i osi elektrycznej serca jako podstawy do bardziej zaawansowanych analiz.

Materiał i metody. Do analizy zakwalifikowano 50 zapisów 12-odprowadzeniowego EKG wykonanych z przesuwem 25 mm/s aparatami różnych producentów. Każdy z zapisów oceniło jako diagnostyczny dwóch kardiologów, którzy ponadto ocenili częstotliwość zespołów QRS, oś elektryczną serca, czas QT, amplitudę i czas trwania zespołów QRS i załamek T. Następnie przeprowadzono automatyczną interpretację zapisów EKG za pomocą aplikacji edukacyjnej eEKG (dostępna bez opłat w sklepach *AppStore* i *Google Play*) i telefonu iPhone 5s; zdjęcia krzywych EKG wykonano zgodnie z instrukcją aplikacji. Zestawiono wyniki oceny ekspertów i automatycznej interpretacji. Przyjęto 10-procentową granicę dopuszczalnego błędu dla oceny częstotliwości zespołów QRS przez aplikację.

Wyniki. Łącznie zinterpretowano 600 krzywych EKG pod kątem częstotliwości zespołów QRS i 50 zapisów EKG pod kątem osi elektrycznej serca. Jako diagnostyczne aplikacja zakwalifikowała 573 (95,5%) próby oceny częstotliwości zespołów QRS i 26 (52%) prób oceny osi elektrycznej serca. Odsetek zgodnych rozpoznań wynosił 82% w przypadku częstotliwości zespołów QRS i 96% w przypadku osi elektrycznej serca. Wykazano istotną korelację między czasem QT, amplitudą załamek T i stosunkiem amplitud zespołów QRS i załamek T a efektywnością automatycznej interpretacji krzywej EKG.

Wnioski. Efektywna digitalizacja i automatyczna interpretacja zapisu EKG w zakresie oceny częstotliwości zespołów QRS i osi elektrycznej serca są możliwe za pomocą aplikacji mobilnej i urządzenia typu smartfon.

Słowa kluczowe: interpretacja EKG, smartfon, rozpoznawanie obrazu

Folia Cardiologica 2018; 13, 2: 190–195

Wstęp

Obecnie w Polsce jest aktywnych ponad 50 mln kart SIM, w tym coraz większa liczba działa w urządzeniach typu

smartfon [1]. Specyfikacje techniczne telefonów komórkowych umożliwiają przeprowadzenie z ich wykorzystaniem złożonych analiz danych, również interpretacji obrazów w czasie rzeczywistym. Powszechność urządzeń takich jak

Adres do korespondencji: dr n. med. Andrzej Cacko, Zakład Informatyki Medycznej i Telemedycyny, Warszawski Uniwersytet Medyczny, ul. Banacha 1a, 02–097 Warszawa, tel. 22 658 29 97, e-mail: andrzej.cacko@wum.edu.pl

smartfon uzasadnia próby wykorzystania tych narzędzi w wspomaganie procesów diagnostycznych i terapeutycznych. Szczególnie interesująca jest możliwość wykorzystania smartfonów w automatycznej ocenie zapisu elektrokardiograficznego (EKG).

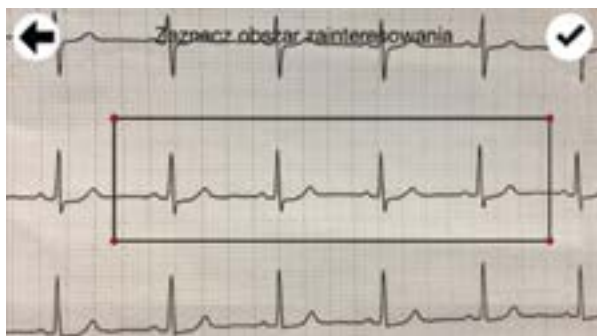
Generowanie zapisu EKG polega na graficznej prezentacji sygnałów elektrycznych zbieranych z powierzchni ciała. Automatyczne algorytmy dostępne od lat w aparatach EKG przeprowadzają złożone wnioskowanie na podstawie cyfrowego zapisu potencjałów [2, 3]. Lekarz dysponujący graficznym zapisem EKG dokonuje analogowych pomiarów i na ich podstawie dokonuje rozpoznania elektrokardiograficznego. Automatyczna interpretacja już wydrukowanego (analogowego) zapisu EKG za pomocą jakiegokolwiek urządzenia wymaga odwrócenia przedstawionego wcześniej procesu, czyli digitalizacji (zamiany na cyfrowy) zapisu. Rozwiązanie najbardziej przyjazne użytkownikowi to wykorzystanie aparatu fotograficznego wbudowanego w smartfon.

Wydaje się, że odpowiedniej jakości zdjęcie zapisu EKG wykonane smartfonem powinno pozwolić na automatyczną ocenę parametrów krzywej. Według obecnej wiedzy pierwszym elementem automatycznej analizy powinno być rozpoznanie zespołu QRS i jego morfologii [4]. Na podstawie tych parametrów możliwe jest określenie częstotliwości zespołów QRS i oceny osi elektrycznej serca.

Celem pracy było określenie możliwości wykorzystania aplikacji mobilnej i urządzenia typu smartfonu w ocenie częstotliwości zespołów QRS i osi elektrycznej serca.

Material i metody

Automatyczną analizę EKG przeprowadzono za pomocą aplikacji mobilnej eEKG (wersja 4.2) dostępnej bezpłatnie w sklepach *AppStore* i *Google Play*. Tę aplikację edukacyjną można uruchamiać na urządzeniu mobilnym z systemem iOS lub Android. Opracowano ją dla lekarzy; jeden z modułów jest przeznaczony do automatycznej analizy zdjęcia krzywej EKG wykonanego smartfonem (ryc. 1).



Rycina 1. Ekran aplikacji ze zdjęciem zapisu elektrokardiograficznego

Do analizy zakwalifikowano 50 zapisów 12-odprowadzeniowego EKG wykonanych z przesuwem 25 mm/s aparatami różnych producentów w Pracowni Elektrokardiografii I Katedry i Kliniki Kardiologii Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Dwóch kardiologów niezależnie zweryfikowało czytelność zapisu – potwierdzono diagnostyczny zapis w odniesieniu do każdego z odprawień. Następnie eksperci obliczyli częstotliwość zespołów QRS i ocenili oś elektryczną serca. Oceniono również amplitudę zespołów QRS i załamek T, stosunek amplitud zespołów QRS i załamek T oraz szerokość zespołów QRS i czas QT.

Każde z 12 odprawień wszystkich analizowanych zapisów EKG oceniono za pomocą aplikacji eEKG w zakresie automatycznej oceny częstotliwości zespołów QRS. Jako dopuszczalną rozbieżność między wynikiem automatycznej analizy a średnią pomiarów dwóch ekspertów przyjęto wartość 10%. Do oceny osi elektrycznej serca konieczna jest interpretacja kolejno odprawień I, II i aVF. Postępowano zgodnie z instrukcją automatycznej analizy zamieszczoną w aplikacji, starając się uzyskać najlepszą możliwą jakość zdjęcia. Wszystkie zdjęcia wykonywano w wystandaryzowanych warunkach, zapewniając oświetlenie dwoma źródłami światła o mocy 40 W każde. Analizę przeprowadzono z wykorzystaniem urządzenia z systemem operacyjnym iOS (*iPhone 5s*).

Analiza statystyczna

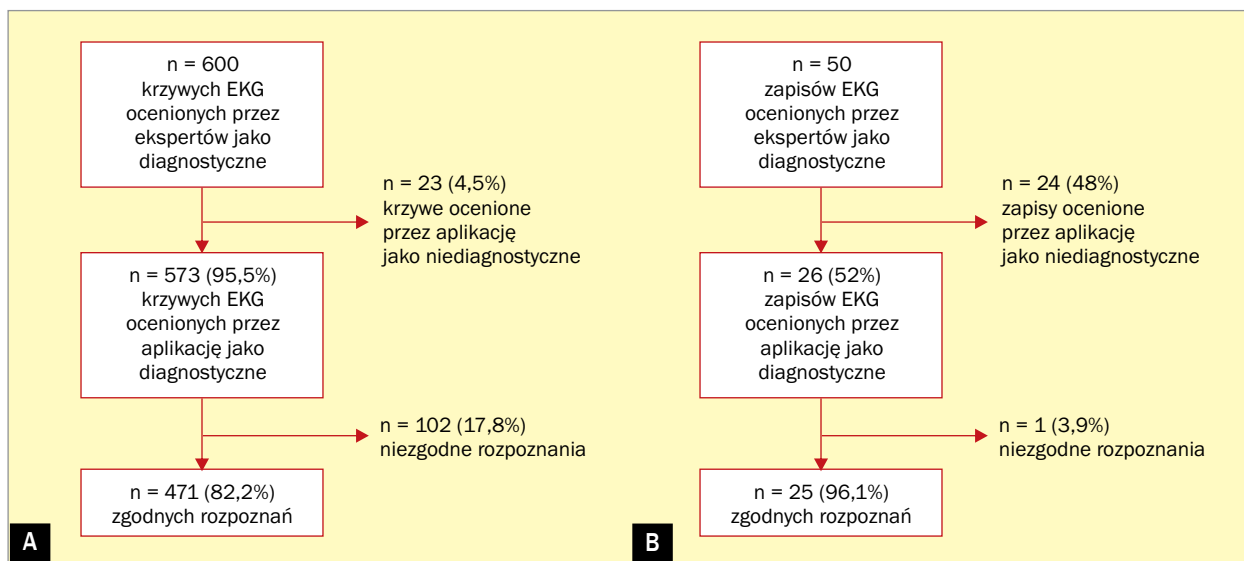
Analizę statystyczną wykonano za pomocą programu *Statistica v. 12*. Zmienne ilościowe przedstawiono jako wartość średnią \pm odchylenie standardowe, natomiast zmienne jakościowe jako liczbę i odsetek. Istotność różnicy między zmiennymi ilościowymi określano z użyciem testu U Manna-Whitneya, a między zmiennymi jakościowymi – za pomocą testu χ^2 . Za każdym razem jako istotną statystycznie określano wartość p poniżej 0,05.

Wyniki

W ramach badania wykonano automatyczną ocenę 600 odprawień w zakresie częstotliwości zespołów QRS. Oś elektryczną serca oceniono w 50 próbach – zapisach EKG.

Automatyczna ocena częstotliwości zespołów QRS była możliwa w 573 (95,5%) próbach; w 27 przypadkach zdjęcie zostało zakwalifikowane przez algorytm aplikacji mobilnej jako niediagnostyczne. Wśród zdjęć ocenionych przez aplikację jako diagnostyczne zgodność automatycznej analizy i oceny ekspertów uzyskano w 471 (82% wcześniej ocenionych jako diagnostyczne) próbach (ryc. 2A).

Ocena osi elektrycznej serca przez aplikację była możliwa w 26 (52%) przypadkach; w 24 przypadkach zapisy odprawień konieczne do przeprowadzenia analizy zostały ocenione jako niediagnostyczne. Tylko w jednym przypadku odnotowano rozbieżność między



Rycina 2A, B. Rekrutacja (A) pojedynczych krzywych zapisu elektrokardiograficznego (EKG) do analizy częstotliwości zespołów QRS i (B) 12-odprowadzeniowych standardowych zapisów EKG do analizy osi elektrycznej serca

Tabela 1. Porównanie krzywych zapisu elektrokardiograficznego (EKG) prawidłowo i nieprawidłowo zinterpretowanych przez aplikację względem częstotliwości zespołów QRS

Parametr	Rozpoznanie		p
	Prawidłowe (n = 471)	Nieprawidłowe (n = 102)	
	Średnia ± odchylenie standardowe		
Czas trwania zespołu QRS [ms]	107,3 ± 29,1	113,9 ± 33,2	0,156
Czas QT [ms]	400,8 ± 52,4	422,1 ± 70	0,009
Amplituda zespołu QRS [mm]	7,5 ± 3,7	7,6 ± 5,9	0,065
Amplituda załamka T [mm]	1,7 ± 1,4	2,6 ± 2,3	< 0,001
Stosunek amplitud zespołu QRS i załamka T	8,1 ± 9,4	4,4 ± 3,5	< 0,001

automatycznym wynikiem oceny osi elektrycznej serca i analizą ekspertów (ryc. 2B).

Wykazano istotną korelację między parametrami EKG a efektywnością automatycznej oceny częstotliwości zespołów QRS (tab. 1). Prawidłowo zinterpretowane krzywe charakteryzowały istotnie krótszy średni czas QT (401 v. 422 ms; p = 0,009), istotnie mniejsza amplituda załamka T (1,7 v. 2,6 mm; p < 0,001) i istotnie większy stosunek amplitudy zespołu QRS do amplitudy załamka T (8,1 v. 4,4; p < 0,001) niż w próbach zinterpretowanych nieprawidłowo (ryc. 3).

Dyskusja

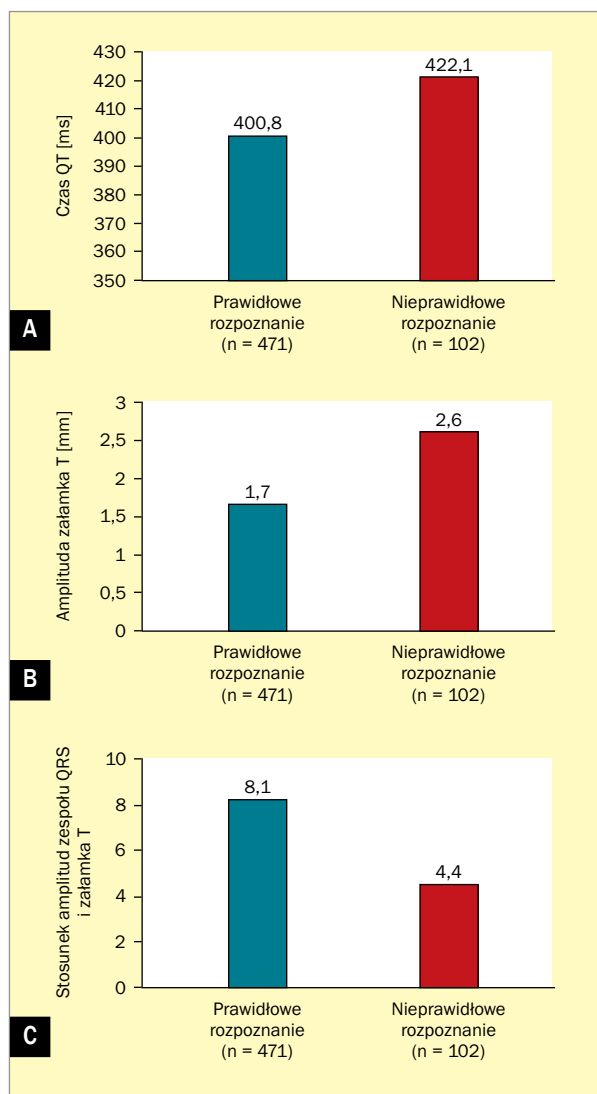
Niniejsza publikacja jest pierwszą znaną autorom próbą zastosowania urządzenia typu smartfonu w celu digitalizacji i automatycznej interpretacji zapisu EKG.

Nowoczesne technologie w coraz większym stopniu wpływają na codzienne czynności. Również w medycynie

coraz powszechniej wykorzystuje się wyroby medyczne oparte na najnowszych rozwiązaniach telekomunikacyjnych, algorytmach automatycznej oceny danych, rozszerzonej lub wirtualnej rzeczywistości. Jednocześnie, według raportu Medscape z 2016 roku, mimo że większość lekarzy postuluje szersze wprowadzanie nowoczesnych technologii, to obecnie co 3. lekarz ogranicza ich wykorzystanie do telekonsultacji [5].

Automatyczna analiza cyfrowego zapisu jest powszechnie dostępna jako funkcja w aparatach EKG. Jest również wykorzystywana w automatycznych zewnętrznych defibrylatorach do rozpoznania tachyarytmii komorowej i kwalifikacji do defibrylacji oraz zewnętrznych i implantowanych rejestratorach arytmii. Warunkiem certyfikacji algorytmów automatycznego rozpoznawania zapisu EKG pozostaje potwierdzenie efektywności rozpoznawania podstawowych elementów krzywej [6].

Czas jednostkowej rejestracji EKG w diagnostyce arytmii lub omdleń wydłuża się coraz bardziej. W rekomendacjach



Rycina 3A–C. Porównanie krzywych zapisu elektrokardiograficznego (EKG) prawidłowo i nieprawidłowo zinterpretowanych przez aplikację względem częstotliwości zespołów QRS – parametry wykazujące istotne statystycznie różnice: **A.** Czas QT; **B.** Amplituda załamka T; **C.** Stosunek amplitud zespołu QRS i załamka T

Europejskiego Towarzystwa Kardiologicznego (ESC, *European Society of Cardiology*) z 2018 roku zmniejszono klasę zaleceń dla standardowych 24-godzinnych ambulatoryjnych rejestracji EKG w diagnostyce omdleń na rzecz zewnętrznych i wszczepialnych rejestratorów arytmii [7]. Dostępność urządzeń umożliwiających długoterminową rejestrację EKG w sposób przyjazny dla pacjenta jest coraz większa. Przy tym ilość danych rejestrowanych w czasie długoterminowego (od kilku tygodni do kilku lat) monitorowania EKG warunkuje zastosowanie dodatkowych algorytmów rozpoznających zaburzenia rytmu serca [8].

Przesyłanie zapisu EKG (również standardowego 12-odprowadzeniowego) wykorzystuje się od dawna i stanowi podstawę powszechnie dziś wykorzystywanych rozwiązań:

telemetrii, telekonsultacji chorych z podejrzeniem ostrego zespołu wieńcowego, telerehabilitacji kardiologicznej [9]. Pozostaje bez wątpliwości fakt, że cyfrowy zapis EKG można przesłać za pomocą sieci telekomunikacyjnej bez istotnego ograniczenia ilości danych [10].

Niemniej należy zwrócić uwagę na to, że w obecnie wykorzystywanych rozwiązaniach mamy do czynienia z transmisją i/lub automatyczną interpretacją danych cyfrowych zebranych przez urządzenie pomiarowe. Aparat EKG przetwarza rejestrowany sygnał elektryczny na zapis cyfrowy, który jest analizowany/przesyłany do oddalonego odbiorcy. W przypadku narzędzia ocenianego przez autorów punktem wyjścia do analizy EKG był zapis krzywych na papierze. Użytkownik, wykonując smartfonem zdjęcie analogowego badania, rozpoczyna proces przetwarzania danych w formę cyfrową. Kluczowym zagadnieniem ocenianym w niniejszej pracy jest efektywność procesu digitalizacji papierowego zapisu EKG, a następnie rozpoznania zespołów QRS przez urządzenie mobile w tak uzyskanym cyfrowym zapisie [4]. Świadczy to o unikatowości badanego narzędzia. Przy tym stwierdzona efektywność w rozpoznawaniu zespołów QRS (walidowana prawidłowością oceny częstotliwości zespołów QRS) i ich morfologii (walidowana prawidłowością oceny osi elektrycznej serca) jest co najmniej obiecująca.

W dotychczasowych publikacjach postulowano opracowanie narzędzia na urządzenia mobilne, które – wspomagając proces diagnostyczny na podstawie analizy EKG – mogłoby ułatwić stratyfikację ryzyka chorych na izbę przyjęć oraz usprawnić rozpoznawanie najczęstszych arytmii i stanów zagrożenia życia [11, 12]. Przy tym błędny wynik automatycznej interpretacji podany przez urządzenie medyczne może zmylić lekarza i zwiększyć liczbę nieprawidłowych rozpoznań medycznych [13, 14]. Oceniane przez autorów rozwiązanie nie pozwoliło na automatyczną interpretację wszystkich ocenianych zapisów EKG – szczególnie w przypadku osi elektrycznej serca jedynie połowa zapisów EKG została zakwalifikowana przez aplikację jako diagnostyczna. Niemniej odsetek prawidłowych rozpoznań zapisów zakwalifikowanych jako diagnostyczne był zadowalający.

Należy podkreślić trudności, jakie stoją przed digitalizacją zapisów, między innymi rozpoznania zespołu QRS, załamka T i załamka P, następnie określenia ich wzajemnych relacji, amplitudy, czasu trwania i morfologii. Wyniki przeprowadzonych prób wskazują, że stopień trudności digitalizacji i automatycznej interpretacji zapisu EKG zależy od samego kształtu krzywej: amplitudy zespołów QRS i załamka T, czasu QT.

Potwierdzenie skuteczności metod szybkiej digitalizacji zapisu EKG pozwoli na kolejne ważne zastosowanie tej technologii – generowanie dużych zbiorów zapisów EKG do uczenia maszynowego [15]. Prowadzone są liczne rejestry chorych. W wielu przypadkach dane, również zapisy EKG, są gromadzone retrospektywnie i dostępne

jedynie w formie papierowej. „Ręczna” ocena zapisu EKG przeprowadzona przez badacza uniemożliwia wykorzystanie nowoczesnych metod uczenia maszynowego, które mogłyby analizować zapis EKG i relacje między poszczególnymi elementami krzywej. Być może, jest to jedna z przyczyn niepowodzeń w poszukiwaniach cech zapisu EKG swoistych dla zwiększonego ryzyka nagłej śmierci sercowej [16].

Studiując literaturę przedmiotu, można odnaleźć innowacyjne rozwiązania służące ułatwieniu oceny lub dostępu do badania EKG w trakcie zabiegów medycznych. Zapis EKG (również rejestrowany w czasie rzeczywistym) może być prezentowany z wykorzystaniem *Google Glass* lub innych narzędzi oferujących technologię rozszerzonej rzeczywistości. W kolejnych próbach potwierdzono czytelność prezentacji treści medycznych (m.in. krzywej EKG) za pomocą rozszerzonej rzeczywistości [17]. W zakresie pomiarów funkcji życiowych i telemetrii EKG jakość i czytelność danych prezentowanych w rozszerzonej rzeczywistości jest porównywalna z obrazem na standardowym na monitorze [18]. Obecnie technologia rozwija się w celu umożliwienia czytelnej prezentacji trójwymiarowych grafik (np. rekonstrukcji obrazu tomografii komputerowej) w rozszerzonej rzeczywistości podczas zabiegów operacyjnych. Warszawski Uniwersytet Medyczny ma własne pozytywne doświadczenia z wykorzystania rozszerzonej rzeczywistości, między innymi podczas zabiegów elektrofizjologicznych [19].

Warto zwrócić uwagę na fakt, że oceniana przez autorów niniejszego opracowania aplikacja na urządzenia mobilne to stosunkowo proste narzędzie. Digitalizacja zapisu EKG i wykonanie podstawowych analiz nie wymaga dodatkowych urządzeń; w całości odbywa się na

urządzeniu mobilnym i nie jest związane z dodatkowymi kosztami. Sama aplikacja jest prosta w obsłudze. Oceniane rozwiązanie wyróżnia się na tle wymienianych wcześniej, które wymagają dodatkowych urządzeń do rejestracji danych i dokonują analizy dopiero po transmisji danych na serwer, wymagając transferu danych poza urządzenie.

Ograniczeniem pracy jest wielkość próby. Wykorzystanie 50 zapisów 12-odprowadzeniowego EKG pozwoliło na 50-krotną ocenę osi elektrycznej serca. W przypadku oceny częstotliwości zespołów QRS każde z odprowadzeń interpretowano osobno, uzyskując łączną liczbę 600 prób. Niemniej należy podkreślić starania autorów o wiarygodność zastosowanej metodologii badania, między innymi wystandaryzowane warunki wykonywania zdjęć zapisów EKG, dwóch ekspertów niezależnie oceniających zapis EKG. Badanie pozwoliło potwierdzić stawianą przez autorów hipotezę o przydatności analizowanego narzędzia i wskazało metodę dalszych weryfikacji.

Wnioski

Efektywna ocena częstotliwości zespołów QRS i osi elektrycznej serca za pomocą aplikacji mobilnej i urządzenia typu smartfonu jest możliwa. Wyniki badania potwierdzają przydatność telefonu komórkowego typu smartfonu wyposażonego w aparat fotograficzny w digitalizacji i automatycznej interpretacji zapisu EKG.

Konflikt interesów

Emanuel Tataj – konsultacja merytoryczna podczas opracowywania aplikacji eEKG, Andrzej Cacko – konsultacja merytoryczna podczas opracowywania aplikacji eEKG.

Abstract

Introduction. Nowadays there are no tools enabling fast digitalization and supporting interpretation of paper ECG recordings. Popularity and availability of devices like smartphone could be used in clinical practice as tools enhancing the interpretation of ECG recordings. The aim of the study is to determine possibilities of using free mobile application and smartphone in assessment of QRS frequency and electrical axis of the heart as a basis for more advanced analysis.

Materials and methods. Fifty recordings of 12-lead ECG at 25 mm/s generated by devices of various producers were qualified for the analysis. Each of the recordings was assessed as diagnostic by two cardiologists, who also measured the frequency of QRS complexes, electrical axis of the heart, duration of QT, amplitude and duration of QRS complexes and T waves. Afterwards, automatic interpretation of ECG recordings was performed with educational mobile application eEKG (available for free at AppStore and Google Play) and iPhone 5s. The pictures of ECG waveforms were taken according to instruction of the application. The results of expert assessment and automatic interpretation were compared. The 10% acceptable margin of error was established for assessment of frequency of QRS complexes by the application.

Results. Six hundred ECG waveforms (12 leads in every ECG recording) were analysed for frequency of QRS complexes and 50 ECG recordings were analyzed for electrical axis of the heart. The application qualified as diagnostic 573 (95.5%) attempts of QRS frequency assessment and 26 (52%) attempts of electrical axis of the heart assessment. The assessment was accurate in 82% of attempts for QRS complexes frequency assessment and in 96% of attempts for electrical axis of the heart assessment. Significant correlation was proven between QT duration, T wave amplitude, ratio of amplitudes of QRS complexes and T waves and effectiveness of automatic interpretation of ECG waveform.

Conclusions. Effective digitalisation and automatic interpretation of ECG recording in assessment of frequency of QRS complexes and electrical axis of the heart is possible with mobile application and smartphone type device.

Key words: ECG interpretation, smartphone, picture recognition

Folia Cardiologica 2018; 13, 2: 190–195

Piśmiennictwo

1. Urząd Komunikacji Elektronicznej, Raport o stanie rynku telekomunikacyjnego w 2016 roku, Warszawa, czerwiec 2017, https://www.uke.gov.pl/download/gfx/uke/pl/defaultaktualnosci/36/16/1/raport_o_stanie_ryнку_telekomunikacyjnego_w_2016_roku_www.pdf (10.03.2018).
2. Meyer C, Fernández Gavela J, Harris M. Combining algorithms in automatic detection of QRS complexes in ECG signals. *IEEE Trans Inf Technol Biomed.* 2006; 10(3): 468–475, indexed in Pubmed: 16871713.
3. de Champlain F, Boothroyd LJ, Vadeboncoeur A, et al. Computerized interpretation of the prehospital electrocardiogram: predictive value for ST segment elevation myocardial infarction and impact on on-scene time. *CJEM.* 2014; 16(2): 94–105, indexed in Pubmed: 24626114.
4. Zidelmal Z, Amirou A, Adnane M, et al. QRS detection based on wavelet coefficients. *Comput Methods Programs Biomed.* 2012; 107(3): 490–496, doi: 10.1016/j.cmpb.2011.12.004, indexed in Pubmed: 22296976.
5. Medscape Report. <http://www.medscape.com/features/slideshow/public/technology-in-medicine#page=23> (10.03.2018).
6. International Standard ICE 60601-2-51, Medical electrical equipment. Part 2-51: Particular requirements for safety, including essential performance, of recording and analysing single channel and multichannel electrocardiographs. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2003.
7. de Lange FJ, Moya A, Sutton R, et al. Task Force for the Diagnosis and Management of Syncope, European Society of Cardiology (ESC), European Heart Rhythm Association (EHRA), Heart Failure Association (HFA); Heart Rhythm Society (HRS). Guidelines for the diagnosis and management of syncope (version 2009). *Eur Heart J.* 2009; 30(21): 2631–2671, doi: 10.1093/eurheartj/ehp298, indexed in Pubmed: 19713422.
8. Hwan Bae M, Hoon Lee J, Heon Yang D, et al. Erroneous computer electrocardiogram interpretation of atrial fibrillation and its clinical consequences. *Clin Cardiol.* 2012; 35(6): 348–353, doi: 10.1002/clc.22000, indexed in Pubmed: 22644921.
9. Grabowski M, Cacko A, Opolski G. Telemedycyna w optymalizacji diagnostyki i leczenia chorych z ostrym zespołem wieńcowym – projekt Kardionet. In: Piotrowicz R, Różyło W. ed. *Telekardiologia, cz. 1.: Wybrane zastosowania kliniczne.* TeleInterMed, Warszawa 2014: 39–46.
10. Clark E, Sejersten M, Clemmensen P, et al. Effectiveness of electrocardiogram interpretation programs in the ambulance setting. *Computers in Cardiology.* 2009; 36: 117–120.
11. Leutheuser H, Gradl S, Kugler P, et al. Comparison of real-time classification systems for arrhythmia detection on Android-based mobile devices. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2014; 2014: 2690–2693, doi: 10.1109/EMBC.2014.6944177, indexed in Pubmed: 25570545.
12. Haeberlin A, Roten L, Schilling M, et al. Software-based detection of atrial fibrillation in long-term ECGs. *Heart Rhythm.* 2014; 11(6): 933–938, doi: 10.1016/j.hrthm.2014.03.014, indexed in Pubmed: 24632179.
13. Hillson SD, Connelly DP, Liu Y. The effects of computer-assisted electrocardiographic interpretation on physicians' diagnostic decisions. *Med Decis Making.* 1995; 15(2): 107–112, doi: 10.1177/0272989X9501500202, indexed in Pubmed: 7783570.
14. Bogun F, Anh D, Kalahasty G, et al. Misdiagnosis of atrial fibrillation and its clinical consequences. *Am J Med.* 2004; 117(9): 636–642, doi: 10.1016/j.amjmed.2004.06.024, indexed in Pubmed: 15501200.
15. Shameer K, Johnson KW, Glicksberg BS, et al. Machine learning in cardiovascular medicine: are we there yet? *Heart.* 2018 [Epub ahead of print], doi: 10.1136/heartjnl-2017-311198, indexed in Pubmed: 29352006.
16. Waldmann V, Bougouin W, Karam N, et al. Paris-SDEC investigators. Characteristics and clinical assessment of unexplained sudden cardiac arrest in the real-world setting: focus on idiopathic ventricular fibrillation. *Eur Heart J.* 2018 [Epub ahead of print], doi: 10.1093/eurheartj/ehy098, indexed in Pubmed: 29566157.
17. Jeroudi OM, Christakopoulos G, Christopoulos G, et al. Accuracy of remote electrocardiogram interpretation with the use of Google Glass technology. *Am J Cardiol.* 2015; 115(3): 374–377, doi: 10.1016/j.amjcard.2014.11.008, indexed in Pubmed: 25482681.
18. Schaer R, Salamin F, Jimenez Del Toro OA, et al. Live ECG readings using Google Glass in emergency situations. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2015; 2015: 315–318, doi: 10.1109/EMBC.2015.7318363, indexed in Pubmed: 26736263.
19. Rymuza B, Grodecki K, Kamiński J, et al. Holographic imaging during transcatheter aortic valve implantation procedure in bicuspid aortic valve stenosis. *Kardiol Pol.* 2017; 75(10): 1056, doi: 10.5603/KP.2017.0195, indexed in Pubmed: 29057443.