

Fundamental researches

UDC 616-037; 57.087.1; 519.254

DOI: 10.26565/2313-6693-2021-43-01

HEART RATE VARIABILITY SERIES ANALYZING BY FUZZY LOGIC APPROACH

Raimondi G., Martynenko A., Barsi L., Maliarova L.

Introduction. Exercise can be defined as any structured and planned activity leading to an increase of energy expenditure, breathing and pulse rate. In the context of a correct lifestyle, a regular physical activity reduces the probability of cardiovascular events, diabetes and other possible related diseases. The aim of this study is to evaluate the neurovegetative cardiovascular regulation and the fluids distribution in healthy subjects undergoing dynamic and isometric training regimes. We have employed Heart Rate Variability (HRV) analysis by various mathematical methods that are classified as Time Domain (TD), Frequency Domain (FD) and Nonlinear (NM). We incorporated currently existing HRV indicators into a unified Fuzzy Logic (FL) methodology, which in turn will allow to integrally assessing each metric and HRV results as a whole.

Objective. The goal of this study is to verify the response of the ANS before and after the execution of different training in the clearest view by our Fuzzy Logic approach to Heart Rate Variability series analysing. Our Fuzzy Logic algorithm incorporate into a single view of each metric, – Time Domain, Frequency Domain, Nonlinear Methods and HRV as a whole.

Materials and methods. 24 young subjects aged between 20 and 30 (11 males and 13 females) have been enrolled. Exclusion criteria are: tobacco use; BMI > 25 kg/m²; cardiovascular diseases; blood pressure ≥ 140/90 mmHg; chronic pathologies; sport competition. Each of the examined subjects underwent four different tests and analyses: before the beginning of the isotonic training, which has been carried out by 30-minute run each day for a period of 20 days, and after the end of the training, both in upright and supine position; before the beginning of the isometric training, which has been carried out by lifting a 2-kg weight for 30 minutes per day for a period of 20 days, and after the end of the training, both in upright and supine position.

Conclusion. HRV is a complex phenomenon, study of which requires various approaches and methods. However, a comprehensive view of HRV is only possible when there is a technology similar to Fuzzy Logic, one that allows combining all used methods and approaches into an integral assessment. In this article, we showed the Fuzzy Logic approach for series of Heart Rate Variability records and we can assert that: the training through exercises of dynamic type could reduce the cardiovascular risk, thus confirming the importance of a correct lifestyle; the isometric exercise generally produces an increase of the indexes of the sympathetic activity and then an increase of the cardiovascular risk with reduced cardioprotection; the Base state (before training) showing the biggest distance from abnormality because the Norm HRV values were defined for calm body state – before any training or disturbances; FL distances after Isometric training showing the worst distance from abnormality.

KEY WORDS: heart rate variability, fuzzy logic

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Gianfranco Raimondi, MD, PhD, Prof., Sapienza University of Rome (Italy), 5, Piazzale Aldo Moro, Rome, Italy, 00185; e-mail: gianfrancoraimondi@uniroma1.it

Martynenko Alexander, D. Sc., Professor, Department of Hygiene and Social Medicine, V. N. Karazin Kharkiv National University, 6, Svobody sq., Kharkiv, Ukraine, 61022; e-mail: Alexander.v.martynenko@karazin.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0609-2220>

L. Barsi, PhD, Sapienza University of Rome (Italy), 5, Piazzale Aldo Moro Rome, Italy, 00185.

Maliarova Liudmila, Assistant, Department of hygiene and social medicine, V. N. Karazin Kharkiv National University School of Medicine, 6, Svobody sq., Kharkiv, Ukraine, 61022, e-mail: l.v.maliarova@karazin.ua

For citation:

Raimondi G, Martynenko A, Barsi L, Maliarova L. HEART RATE VARIABILITY SERIES ANALYZING BY FUZZY LOGIC APPROACH. The Journal of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series «Medicine». 2021: 43; P. 5–12. DOI: 10.26565/2313-6693-2021-43-01

INTRODUCTION

Exercise can be defined as any structured and planned activity leading to an increase of energy expenditure, breathing and pulse rate. In the context of a correct lifestyle, a regular physical activity reduces the probability of cardiovascular events, diabetes and other possible related diseases. The aim of this study is to evaluate the neurovegetative cardiovascular regulation and the fluids distribution in healthy subjects undergoing dynamic and isometric training regimes. We have employed Heart Rate Variability (HRV) analysis by various mathematical methods that are classified as Time Domain (TD), Frequency Domain (FD) and Nonlinear (NM) [1, 2]. Diversity of methods and approaches to analysis of HRV is stemming from complexity and nonlinearity of the phenomenon itself, as well as from greater diversity of physiological reactions of an organism, both in normal and pathological states. Initially mentioned in [1] are 11 indicators of TD, 7 indicators of FD, 6 indicators of NM and 5 ways of graphical analysis of NM. However, during the 25 years of HRV development and improvement since [1] had been published, the number of HRV indicators has increased significantly. This is especially true for the area of NM, where the number of distinct variants of NM indicators has increased multi-fold. Thus, for example, in [3] there are 42 various HRV indicators discussed for the area of NM. A good review of HRV metrics and norms is provided in [4], in which it is highlighted that every one of the reviewed HRV metrics – TD, FD and NM, has its own distinct features and advantages. We incorporated currently existing HRV indicators into a unified Fuzzy Logic (FL) methodology [5], which in turn will allow to integrally assess each metric and HRV results as a whole. There are more advanced topics of FL applications for HRV [6, 7, 8, 9, 10]. Therefore, the goal of this study is to verify the response of the ANS before and after the execution of different training in the clearest view.

MATERIALS AND METHODS

24 young subjects aged between 20 and 30 (11 males and 13 females) have been enrolled. Exclusion criteria are: tobacco use; BMI > 25 kg/m²; cardiovascular diseases;

blood pressure $\geq 140/90$ mmHg; chronic pathologies; sport competition. Each of the examined subjects underwent four different tests and analyses:

- before the beginning of the isotonic training, which has been carried out by 30-minute run each day for a period of 20 days, and after the end of the training, both in upright and supine position.
- before the beginning of the isometric training, which has been carried out by lifting a 2-kg weight for 30 minutes per day for a period of 20 days, and after the end of the training, both in upright and supine position.

A 5-minute resting ECG was recorded through CardiolabTM by which we have performed the linear analysis of HRV both in the time domain (classical statistical analysis) and in the frequency domain (spectral analysis), and later for 5 minutes during the Tilt-Test. Later, the tachogram was evaluated by Kubios for the nonlinear analyses (Poincarè Plot and DFA) and by own methods for Entropy [11] and Correlation Dimension D2 [12]. Also, the body composition was evaluated through the body impedance analysis (AKERN) in the enrolled subjects, in supine position in relaxed state for 4–5 minutes.

We used the advantages of Fuzzy Logic (FL) to incorporate various not always accurately defined data, received from observing a system, into a unified mathematical model of a fuzzy logical argument about state of the system. In our case, we define the extent of belonging to normal state both for each distinct HRV metric – TD, FD and NM, and for a patient's HRV in general. Membership functions of any HRV index are presented on [1]. We compare the notion of 'Norm' with a mean value of HRV, established on standard records of RR-intervals. Notions of 'Abnormal Low' or 'Abnormal High' are compared with values of indices, which are away from a mean M value by a parameter of 3σ . Statistically, it corresponds to 99,8 % of confidence level of validity of statement about abnormal value of a parameter. According to presented defuzzification rules [5]:

$$FL = \begin{cases} -1 \forall Value < M - 3\sigma \\ \frac{2sign(Value-M)(M-Value)}{3\sigma} + 1 \\ -1 \forall Value > M + 3\sigma \end{cases}$$

we calculate FL scores of all HRV indicators. Mean values of FL scores for each metric and for all HRV indicators will define the extent of validity of argument about normalcy of state of each metric and of the whole HRV.

RESULTS AND DISCUSSION

We demonstrate the advantages of the proposed FL approach by analyzing HRV series: in Base (before training) and after Dynamic and Isometric training for Clinostatic and Orthostatic positions in Tilt tests. There

are over a hundred of total number of diagrams for analyzing without our FL approach and all of them shows different behaviors. Even our FL approach for different HRV domains, – TD, FD and NL shows unclear view (see left part of Fig. 1 and Fig. 2). This is accented for the problem of understanding of complexed and different indexes. Only our final FL compression (see right part of Fig. 1 and Fig. 2) shows clear view for complex changes of HRV series.

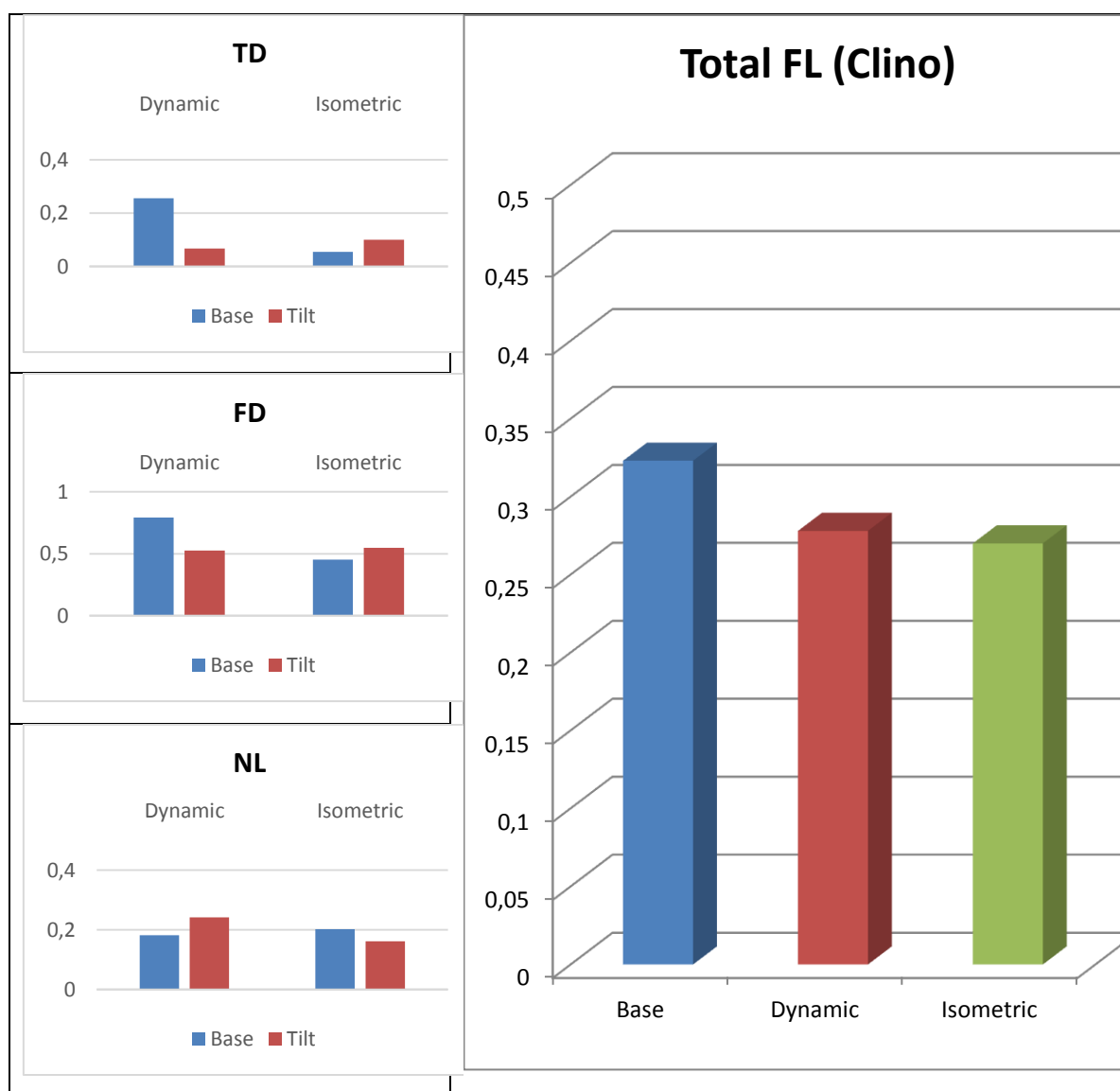


Fig. 1. Clinostatic position: left side – FL distances from abnormal state for TD, FD, NL in Dynamic/Isometric, Base/Tilt; right side – total FL distances from abnormal state of HRV for Base/Dynamic/Isometric.

Of all considered examples of FL analysis, the worst result is demonstrated after Isometric training, – there are the smallest distances to abnormal state for both Clinostatic and Orthostatic positions. The

Base state (before training) showing the biggest distance from abnormality (Fig. 1 and Fig. 2) because the Norm HRV values were defined for calm body state – before any training or disturbances.

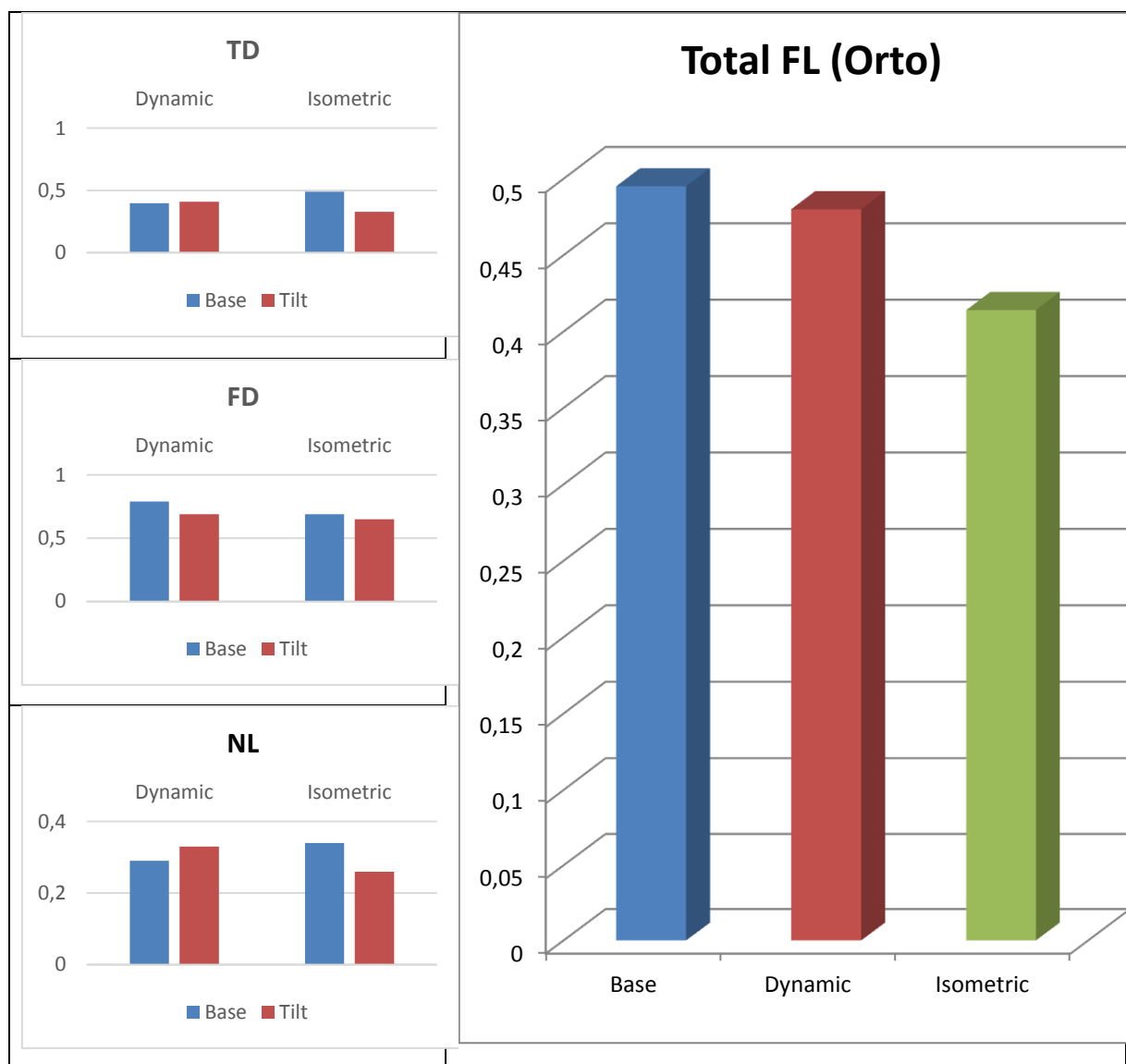


Fig. 2. Orthostatic position: left side – FL distances from abnormal state for TD, FD, NL in Dynamic/Isometric, Base/Tilt; right side – total FL distances from abnormal state of HRV for Base/Dynamic/Isometric

CONCLUSIONS

HRV is a complex phenomenon, study of which requires various approaches and methods. However, a comprehensive view of HRV is only possible when there is a technology similar to Fuzzy Logic, one that allows to combine all used methods and approaches into an integral assessment. In this article, we showed the Fuzzy Logic approach for series of Heart Rate Variability records.

The results of our research we can show in a combined view (Fig. 3) as the distances from abnormal HRV state (Fuzzy Logic scores) for Clino and Orto positions in Base state (ClinoB and OrtoB) and after Dynamic (ClinoD and OrtoD) and Isometric (ClinoI and OrtoI) exercising. This is the advancing of proposed FL method that combines in one view all different HRV indicators from different domains: TD, FD and NM. Naturally, we can deeply research FL results for each domain separately.

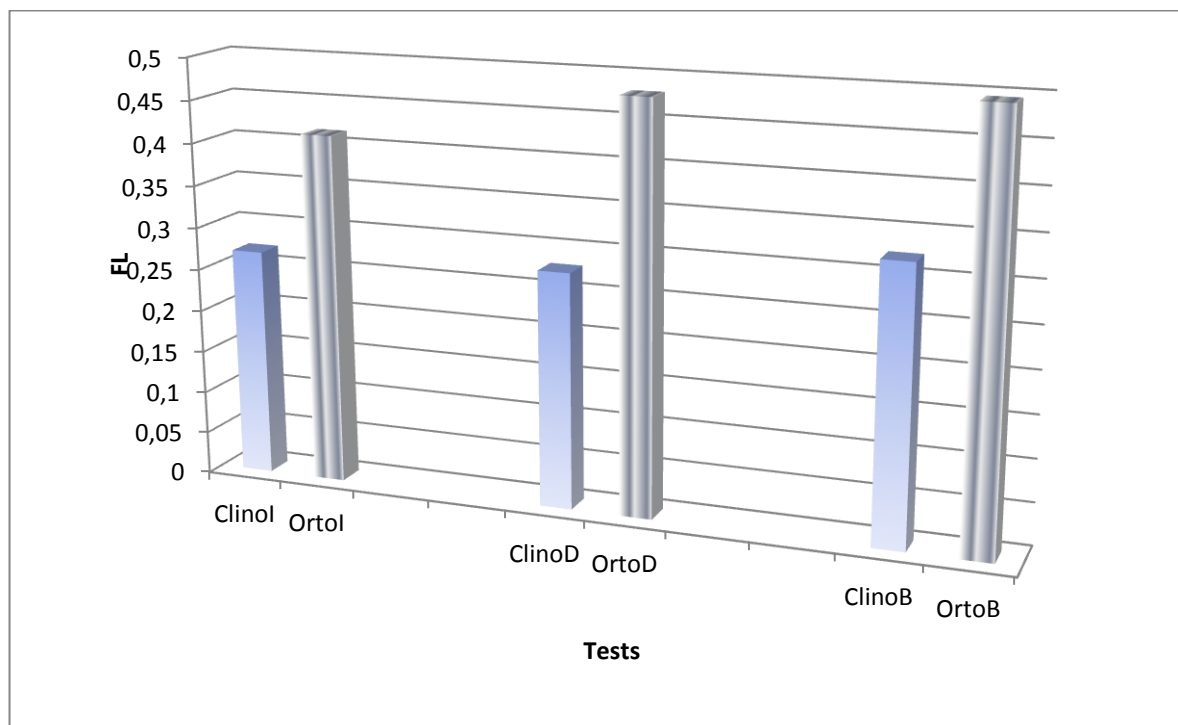


Fig. 3. Distances from abnormal HRV state (Fuzzy Logic scores) for Clino and Orto positions in Base state (ClinoB and OrtoB) and after Dynamic (ClinoD and OrtoD) and Isometric (ClinoI and OrtoI) exercising.

In conclusion, we can assert that:

- the training through exercises of dynamic type could reduce the cardiovascular risk, thus confirming the importance of a correct lifestyle. This is confirmed by training effect that showing as the biggest Clino to Orto excursion on the Fig. 3 – the sympathetic activity in Tilt test are increasing over the Base;
- the isometric exercise generally produces an increase of the indexes of the sympathetic activity and then an increase of the cardiovascular risk with reduced

cardioprotection. This is confirmed by showing as the smallest Clino to Orto excursion on the Fig. 3 – the sympathetic activity is dumping in Tilt test;

- the Base state (before training) showing the biggest distance from abnormality (Fig. 1 and Fig. 2) because the Norm HRV values were defined for calm body state – before any training or disturbances;
- FL distances after Isometric training showing the worst distance from abnormality (Fig. 1 and Fig. 2).

REFERENCES

1. Task force of the European society of cardiology and the North American society of pacing and electrophysiology. Heart rate variability – standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*. 1996; 93 (5): 1043–1065. Doi: <https://doi.org/10.1161/01.CIR.93.5.1043>
2. Yabluchansky N, Martynenko A. Heart Rate Variability for clinical practice. Kharkiv, Univer. Press. 2010: 131 p. [in Russ.] Depository: <http://dspace.univer.kharkov.ua/handle/123456789/1462>
3. Voss A, Schroeder R, Heitmann A, Peters A, Perz S. Short-Term Heart Rate Variability – Influence of Gender and Age in Healthy Subjects. *PLoS ONE*. 2015; 10 (3): e0118308. Doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118308>
4. Shafner F, Ginsberg JP. An Overview of Heart Rate variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*. 2017; 5 (258): 1–17. Doi: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2017.00258>.
5. Martynenko A, Raimondi G, Budreiko N, Maliarova L. Fuzzy logic approach for heart rate variability. *J. V. N. Karazin Khark. Nat. Univ., Ser. Med.* 2021; 42: 5–13. Doi: <https://doi.org/10.26565/2313-6693-2021-42-01>

6. H.ChuDuc, T.NguyenDuc, T.LaiHuuPhuong. Neuro-Fuzzy Approach to Heart Rate Variability Analysis. International Journal of Bioscience, Biochemistry and Bioinformatics, 2013, Vol. 3, No. 5: 456–459. DOI: 10.7763/IJBBB.2013.V3.255
7. T. Tanaka et al. Wearable health monitoring system by using fuzzy logic heart-rate extraction. IEEE World Automation Congress 2012, 2012, pp. 1–4.
8. Liu C, Li K, Zhao L, Liu F, Zheng D, Liu C, Liu S. Analysis of heart rate variability using fuzzy measure entropy. Comput Biol Med. 2013 Feb; 43 (2): 100–8. doi: 10.1016/j.compbiomed. 2012.11.005. Epub 2012 Dec 27. PMID: 23273774.
9. Morsi, Iman, Yahia Zakria Abd El Gawad. Fuzzy logic in heart rate and blood pressure measuring system. 2013 IEEE Sensors Applications Symposium Proceedings (2013): 113–117. DOI:10.1109/SAS.2013.6493568
10. A.J. Dahalan at all. Heart rate events classification via explainable fuzzy logic systems. IAES International Journal of Artificial Intelligence (IJ-AI) Vol. 10, No. 4, December 2021, pp. 1036–1047 ISSN: 2252-8938, DOI: 10.11591/ijai.v10.i4.pp1036–1047
11. Martynenko A, Raimondi G, Budreiko N. Robust entropy estimator for heart rate variability. Klin.inform.telemed. 2019; 14 (15): 67–73. Doi: <https://doi.org/10.31071/kit2019.15.06>
12. Martynenko A. Robust correlation dimension estimator for heart rate variability. Klin.inform.telemed. 2020; 15 (16) 1–7. Doi: <https://doi.org/10.31071/kit2020.16.06>

АНАЛІЗ СЕРІЙ ЗАПИСІВ ВСР ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Раймонді Д., Мартиненко О., Барсі Л., Малярова Л.

Вступ. Вправу можна визначити як будь-яку структуровану та заплановану діяльність, що веде до збільшення витрати енергії, дихання та частоти пульсу. У контексті правильного способу життя регулярна фізична активність знижує ймовірність серцево-судинних захворювань, діабету та інших можливих захворювань. Метою цього дослідження є оцінка нейровегетативної серцево-судинної регуляції та розподілу рідини у здорових суб'єктів, що проходять режими динамічних та ізометричних тренувань. Ми використовували аналіз варіабельності серцевого ритму (ВСР) на основі різних математичних методів, які класифікуються як методи тимчасової області (TD), частотної області (FD) та нелінійні (NM). Ми включили існуючі в даний час показники ВСР у єдину методологію нечіткої логіки (FL), яка, у свою чергу, дозволяє комплексно оцінювати кожен групу методів та результати ВСР загалом.

Мета. Мета цього дослідження – проаналізувати та візуалізувати реакцію ВНС до та після виконання різних тренувань у найбільш чіткому вигляді за допомогою нашого підходу нечіткої логіки до аналізу серії записів ВСР. Наш алгоритм нечіткої логіки поєднує в єдиному поданні кожен метрику – тимчасову область, частотну область, нелінійні методи та ВСР загалом.

Матеріали та методи. До дослідження було включено 24 молодих людей віком від 20 до 30 років (11 чоловіків та 13 жінок). Критерії виключення: вживання тютюну; $IMT > 25 \text{ кг/м}^2$; серцево-судинні захворювання; артеріальний тиск $\geq 140/90$ мм рт. ст. хронічні патології; спортивні змагання. Кожен із піддослідних пройшов чотири різних випробування і аналізу: перед початком ізотонічного тренування, яке виконувалося щоденним 30-хвилинним бігом протягом 20 днів, і після закінчення тренування як у вертикальному, так і лежачому положенні. позиція; перед початком ізометричного тренування, яка виконувалася підняттям ваги 2 кг протягом 30 хвилин на день протягом 20 днів, і після закінчення тренування як у вертикальному, так і лежачому положенні.

Результати і висновки. ВСР – складне явище, вивчення якого потребує різних підходів та методів. Однак повне уявлення про ВСР можливе лише за наявності технології, аналогічної нечіткої логіки, яка дозволяє об'єднати всі методи і підходи, що використовуються, в єдину оцінку. У цій статті ми продемонстрували підхід нечіткої логіки для серії записів варіабельності серцевого ритму і можемо стверджувати, що тренування за допомогою вправ динамічного типу може знизити ризик серцево-судинних захворювань, тим самим підтверджуючи важливість правильного способу життя; ізометричні вправи зазвичай спричиняють підвищення показників симпатичної активності, а потім підвищення ризику серцево-судинних захворювань при зниженні кардіозахисту; базовий стан (до тренування), що показує найбільшу відстань до відхилення від норми, тому що значення норми ВСР було визначено для спокійного стану тіла – до будь-якого тренування чи порушень; Найгірші дистанції до анормального стану демонструються після ізометричного тренування.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: варіабельність серцевого ритму, нечітка логіка

ИНФОРМАЦИЯ ПРО АВТОРІВ

Ж. Раймонди, д. мед. н., проф., Римський університет Ла Сапієнца (Італія), Piazzale Aldo Moro, 5, Рим, Італія, 00185, e-mail: gianfrancoraimondi@uniroma1.it

Мартиненко Олександр, д. фіз-мат. н., професор кафедри гігієни та соціальної медицини Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, пл. Свободи, 6, Харків, Україна, 61022, e-mail: Alexander.v.martynenko@karazin.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0609-2220>

Л. Барсі, доктор філософії, Римський університет Ла Сапієнца (Італія), Piazzale Aldo Moro 5, Рим, Італія, 00185.

Малярова Людмила, асистент кафедри гігієни та соціальної медицини Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022, e-mail: l.v.maliarova@karazin.ua

Для цитування:

Раймонді Д, Мартиненко О, Барсі Л, Малярова Л. АНАЛІЗ СЕРІЙ ЗАПИСІВ ВСР ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Медицина». 2021;43; С. 5–12; DOI: 10.26565/2313-6693-2021-43-01

АНАЛІЗ СЕРІЙ ЗАПИСІВ ВСР С ПОМОЦЬЮ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Раймонді Д., Мартиненко А., Барсі Л., Малярова Л.

Введение. Упражнение можно определить как любую структурированную и запланированную деятельность, ведущую к увеличению расхода энергии, дыхания и частоты пульса. В контексте правильного образа жизни регулярная физическая активность снижает вероятность сердечно-сосудистых заболеваний, диабета и других возможных связанных заболеваний. Целью этого исследования является оценка нейровегетативной сердечно-сосудистой регуляции и распределения жидкости у здоровых субъектов, проходящих режимы динамических и изометрических тренировок. Мы использовали анализ variability сердечного ритма (BCR) на основании различных математических методов, которые классифицируются как методы временной области (TD), частотной области (FD) и нелинейные (NM). Мы включили существующие в настоящее время показатели BCR в единую методологию нечеткой логики (FL), которая, в свою очередь, позволяет комплексно оценивать каждую группу методов и результаты BCR в целом.

Цель. Цель этого исследования – проанализировать и представить реакцию ВНС до и после выполнения различных тренировок в наиболее четком виде с помощью нашего подхода нечеткой логики к анализу серии записей BCR. Наш алгоритм нечеткой логики объединяет в едином представлении каждую метрику – временную область, частотную область, нелинейные методы и BCR в целом.

Материалы и методы. В исследование были включены 24 молодых человека в возрасте от 20 до 30 лет (11 мужчин и 13 женщин). Критерии исключения: употребление табака; ИМТ > 25 кг/м²; сердечно-сосудистые заболевания; артериальное давление \geq 140/90 мм рт. ст. хронические патологии; спортивные соревнования. Каждый из испытуемых прошел четыре различных пробы и анализа: перед началом изотонической тренировки, которая выполнялась ежедневным 30-минутным бегом в течение 20 дней, и после окончания тренировки как в вертикальном, так и в лежачем положении, позиция; перед началом изометрической тренировки, которая выполнялась поднятием веса 2 кг в течение 30 минут в день в течение 20 дней, и после окончания тренировки как в вертикальном, так и в лежачем положении.

Результаты и выводы. BCR – сложное явление, изучение которого требует различных подходов и методов. Однако полное представление о BCR возможно только при наличии технологии, аналогичной нечеткой логики, которая позволяет объединить все используемые методы и подходы в единую оценку. В этой статье мы продемонстрировали подход нечеткой логики для серии записей variability сердечного ритма и можем утверждать, что: тренировка с помощью упражнений динамического типа может снизить риск сердечно-сосудистых заболеваний, тем самым подтверждая важность правильного образа жизни; изометрические упражнения обычно вызывают повышение показателей симпатической активности, а затем повышение риска сердечно-сосудистых заболеваний при снижении кардиозащиты; базовое состояние (до тренировки), показывающее наибольшее расстояние до отклонения от нормы, потому что значения нормы BCR были определены для спокойного состояния тела – до любой тренировки или нарушений; наихудшие дистанции до аномального состояния демонстрируются после изометрической тренировки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: variability сердечного ритма, нечеткая логика

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ж. Раймонди, д. мед. н., проф., Университет Рима «Сапиенза», Piazzale Aldo Moro, 5, Рим, Италия, 00185, e-mail: gianfrancoraimondi@uniroma1.it

Мартыненко Александр, д. физ-мат. н., профессор кафедры гигиены и социальной медицины Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 6, Харьков, Украина, 61022, e-mail: Alexander.v.martynenko@karazin.ua, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-0609-2220>

Л. Барси, доктор философии, Университет Рима «Сапиенза», Piazzale Aldo Moro, 5, Рим, Италия, 00185.

Малярва Людмила, ассистент кафедры гигиены и социальной медицины Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 6, Харьков, Украина, 61022, e-mail: l.v.maliarova@karazin.ua

Conflicts of interest: author has no conflict of interest to declare.

Конфлікт інтересів: відсутній.

Конфликт интересов: отсутствует.

Отримано: 01.09.2021 року
Прийнято до друку: 30.10.2021 року
Received: 01.09.2021
Accepted: 30.10.2021