

Varijabilnost srčanog ritma zasnovana na teoriji kaosa i nelinearnoj dinamici

Heart rate variability based on chaos theory and non-linear dynamics

Goran Krstajić*

Poliklinika za prevenciju kardiovaskularnih bolesti i rehabilitaciju, Zagreb, Hrvatska

Institute for Cardiovascular Diseases Prevention and Rehabilitation, Zagreb, Croatia

Šve je više dokaza da srce u normalnim fiziološkim uvjetima nije periodični oscilator, kardiovaskularne funkcije nisu stacionarne, a tradicionalni pokazatelji varijabilnosti srčanog ritma (VSR) nisu uvijek u mogućnosti otkriti suptilne ali važne promjene u radu srca.^{1,2} Nekoliko novih metoda objektivizacije srčanog ritma, zasnovane na nelinearnoj dinamici i teoriji kaosa, razvijene su glede kvantificiranja dinamike fluktuacije srčanog ritma.^{3,4}

VSR odražava modulaciju autonomnog i drugih fizioloških sustava i njegovo određivanje iz EKG zapisa za vrijeme snimanja elektrokardiografije, testa opterećenja ili 24-satnog dinamičkog elektrokardiograma predstavlja korisnu metodu za kliničke i znanstvene svrhe.^{5,6}

Tradicionalne linearne statističke metode (u vremenskoj i frekvencijskoj domeni) omogućavaju ograničene informacije o promjeni VSR, poglavito jer su i nelinearni mehanizmi također uključeni u nastanak dinamike srčanog ritma.^{7,8}

Kaos označava vrstu vremenskog ponašanja u kojem razlika između dva stanja u početku raste eksponencijalno s vremenom. Kaotični sustav je izrazito osjetljiv na početno stanje i nepredvidljiv u dugoj vremenskoj skali, gdje je početno stanje rijetko poznato s apsolutnom preciznošću. Sustavi koje nalazimo u prirodi pokazuju karakteristike nelinearnog i kaotičnog ponašanja. Kaos se može pojaviti u dinamičkom sustavu koji je modeliran determinističkim nelinearnim jednadžbama. Takav dinamički sustav može evoluirati u statičko stanje, oscilatorno stanje, nestabilno stanje te kaos, koji predstavlja nepravilne oscilacije slične stohastičnom ili slučajnom ponašanju. Svi sustavi mogu se prikazati kao linearni, blizu stanja ravnoteže. Međutim, ako kontinuirani "dotok" energije bude dostatan da se sustav dovoljno pobudi, on postaje nelinearan pa čak i kaotičan.⁹

Kaos se može lakše razumjeti kada se uspoređuje s druga dva oblika ponašanja; slučajnim, nekontroliranim sustavom i sustavom periodičnosti. Slučajno ponašanje nikada se ne ponavlja u istom obliku i ono je nepredvidivo i neorganizirano. Tipičan primjer je elektrokardiografski zabilježen normalan sinusni ritam. Ako znamo amplitudu, frekvenciju i fazu sinusnog vala, u svakom trenutku možemo predvidjeti pojavnost i amplitudu sinusnog vala. Kaos se razlikuje od ponašanja periodičnosti i slučajnosti, no istovremeno sadrži i karakteristike oba sustava. Iako kaotično ponašanje izgleda neorganizirano, slučajno ponašanje, ono je zapravo determinističko, periodično ponašanje. Najvažniji kriteriji kaotičnog ponašanja su sljedeći:

There is increasing evidence to suggest that the heart is not a periodic oscillator under normal physiologic conditions, and the commonly employed moment statistics of heart rate variability (HRV) may not be able to detect subtle, but important changes in heart rate time series.^{1,2} Therefore several new analysis method of heart rate behaviour, motivated by nonlinear dynamics and chaos theory, have been developed to quantify the dynamics of heart rate fluctuations.^{3,4}

HRV reflects the modulation of cardiac function by autonomic and other physiological systems, and its measurements from ECG recordings during the resting ECG or the exercise ECG testing or 24-hours ECG may be the useful methods for both clinical and scientific purposes.^{5,6}

Traditional linear statistical measures (time and frequency domain) provide limited information about HRV, mostly because non-linear mechanisms seem to be also involved in the genesis of HR dynamics.^{7,8}

Chaos, in the technical sense, is used to denote a type of time evolution in which the difference between two states that are initially closely similar grows exponentially over time. All systems have been shown to be linear, close to any static equilibrium, unless or until there is a continuous injection of energy to excite the system enough to make non-linearity appreciable and chaos possible. Chaos also requires a dissipative mechanism to prevent the system from blowing apart.⁹

Chaos is more easily understood through a comparison with randomness and periodicity. Random behaviour never repeats itself and is inherently unpredictable and disorganised. Unlike random behaviour, periodic behaviour is highly predictable, because it always repeats itself over some finite time interval. A sine wave is a typical example. If we know the amplitude, frequency and phase of a sine wave at any instant, we can predict the wave perfectly at any other point in time. Chaos is distinct from periodicity and randomness, but has characteristics of both. It looks disorganised, but is actually organised. The most important criteria for chaotic behaviour are summarised as follows:

1. Chaos is deterministic and aperiodic and it never repeats itself exactly. There are no identifiable cycles that recur at regular intervals.
2. Most chaotic systems have sensitive dependence on the initial conditions. In other words, very small differences in

1. Kaos može biti deterministički i neperiodičan. Za razliku od Newtonovih zakona fizike kaotično ponašanje se nikada točno ne ponavlja. Nema vidljivih ciklusa koji kruže u regularnim vremenskim intervalima;

2. Kaotični sustavi vrlo su ovisni o početnim stanjima. To znači da vrlo male promjene u početnom stanju mogu rezultirati velikim razlikama u kasnijem vremenskom periodu.

3. Kaotično ponašanje je ograničeno. Kako sustav postaje kontroliran, ponašanje biva ograničeno i predvidivost raste;

4. Kaotično ponašanje ima krajnji oblik. Kaotično ponašanje u cjelini ima definitivnu formu dok dijelovi obrazaca imaju slični oblik.⁹

Nove studije na većem broju ispitanika mogu pomoći za ispitivanje kliničkih promjene kod fraktalnih mjerenja VSR kao rizičnih čimbenika. U konačnici, dinamička analiza može dopuniti analizu otkrivanja kardiovaskularnih bolesti, kao i eventualnu korist od lijekova koji utječu na promjenu VSR.

Ključne riječi: varijabilnost srčanog ritma, nelinearna dinamika, teorija kaosa.

the initial conditions will later result in large differences in behaviour.

3. Chaotic behaviour is constrained. Although a system appears random, the behaviour is bounded, and does not wander off to infinity.

4. Chaotic behaviour has a definite form. The behaviour is constrained, and there is a particular pattern to the behaviour.⁹

We continuously need the further studies in larger population to further more define the clinical utility of new fractal measurements of HRV for risk stratification. We could make a conclusion that dynamic analysis of HRV could enhance detection of cardiovascular disease as well as the benefit of using some cardiovascular drugs in relation to changes of HRV.

Key words: heart rate variability, nonlinear dynamics, chaos theory.

*Corresponding author — E-mail:

goran.krstacic@zg.t-com.hr

Literature

1. Vesa J. Longitudinal changes and prognostic significance of cardiovascular autonomic regulation assessed by heart rate variability and analysis of non-linear heart rate dynamics (dissertation). University of Oulu, Finland, 2003.
2. Huikuri HV. Heart rate variability in coronary artery disease. *J Intern Med*. 1995;237:349-57.
3. Tulppo MP, Makikallio TH, Seppanen T, Laukkanen RT, Huikuri HV. Vagal modulation of heart rate during exercise: effects of age and physical fitness. *Am J Physiology*. 1998;74:424-9.
4. Goldberger AL. Non-linear dynamics for clinicians: chaos theory, fractals, and complexity at the bedside. *Lancet* 1996;347:1312-4.
5. Huikuri HV, Makikallio TH, Perkiomaki J. Measurement of heart rate variability by methods based on nonlinear dynamics. *J Electrocardiol*. 2003;36 Suppl:95-9.
6. Krstacic G. Ispitivanje nelinearne dinamike kratkih vremenskih serija kod bolesnika sa stabilnom anginom pectoris (disertacija). Zagreb: Medicinski fakultet; 2002.
7. Krstacic G, Krstacic A, Smalcelj A, Milicic D, Jembrek-Gostovic M. The "Chaos Theory" and non-linear dynamics in heart rate variability analysis: does it work in short time series in patients with coronary heart disease? *Ann Noninvasive Electrocardiol*. 2007;12(2):130-6.
8. Martinis M, Knezevic A, Krstacic G, Vargovic E. Changes in the Hurst exponent of heartbeat intervals during physical activity. *Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys*. 2004;70(1 Pt 1):012903.
9. Glass L. Chaos and heart rate variability. *J Cardiovasc Electrophysiol*. 1999;10(10):1358-60.