



**DIAGNOSTYKA USZKODZEŃ
CHRZĄSTKI STAWOWEJ
NA PODSTAWIE GENEROWANYCH
PROCESÓW
WIBROAKUSTYCZNYCH**

CEL – analiza możliwości diagnozowania stanu chrząstki stawowej na podstawie generowanych procesów wibroakustycznych



<https://zdrowie.gazeta.pl/Zdrowie/7,140283,24143773,chrzastka-stawowa-co-to-takiego-i-jakie-pelni-funkcje-w-organizmie.html>

Obiekt badań – staw kolanowy



Prawidłowa chrząstka stawowa

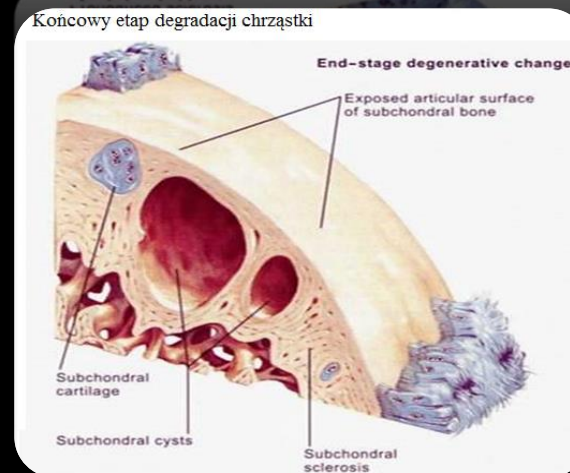
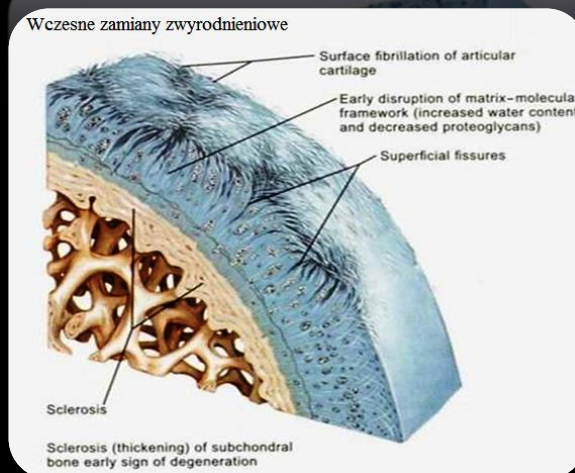
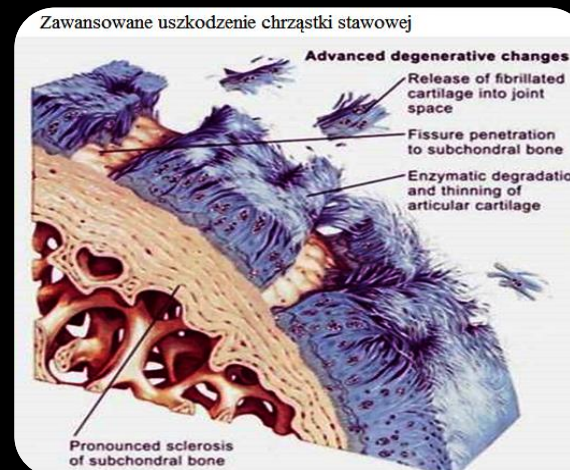
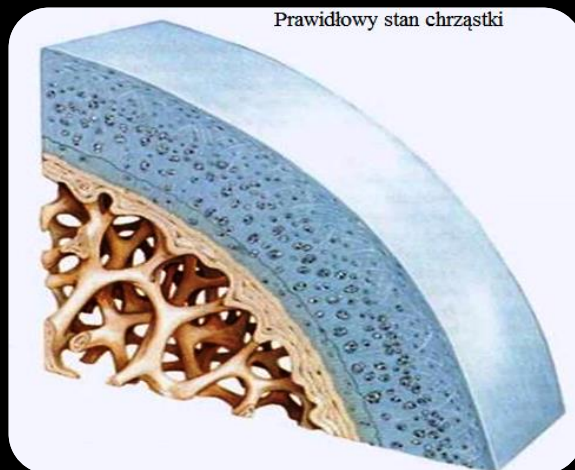
<http://zdrowie.gazeta.pl/Zdrowie/7,140283,22967816,budowa-kolana.html>



Z biotribologicznego i mechanicznego punktu widzenia przyczyną rozpoczynającą niszczenie biołożyska w stawie kolanowym jest :

- zmiana własności mazi stawowej (płynu smarnego)
- brak mazi w stawie
- deformacja kości stawu lub pęknięcie kości
- lokalne zniszczenie chrząstki stawowej
- uszkodzenie torebki stawowej

Chondromalacja - rozmiękanie chrząstki, choroba prowadząca do destrukcji tkanki chrzęstnej





Dotychczasowy sposób zaspokajania przedmiotowej potrzeby:

Aktualnie -Typowe badanie to **laparoscopia**

Kwalifikacja poziomu rozwoju choroby zależna jest od źródła naukowego

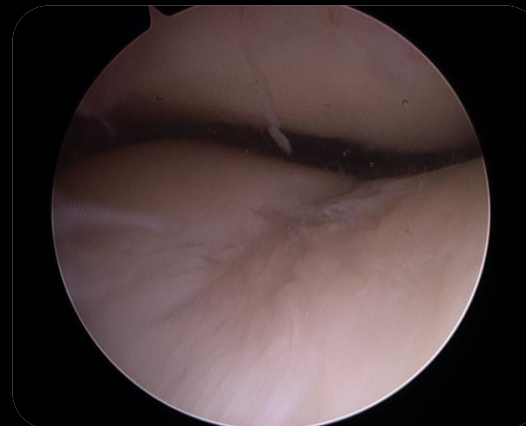
Jedną z metod oceny stanu tkanki chrzęstnej jest np. 4-stopniowa skala chondromalacji według Outerbridge'a:

- **0** – chrząstka prawidłowa
- **I stopień** – splaszowacenie i zmiękczenie (obrzęk),
- **II stopień** – pęknięcia i fragmentacja niepełnej grubości (szczeliny $<1,25$ mm),
- **III stopień** – pęknięcia pełnej grubości (szczeliny $>1,25$ mm) sięgające do kości podchrzęstnej bez odstąpienia kości,
- **IV stopień** – ubytki odsłaniające kość podchrzęstną.

Praktyka lekarska – badanie laparoskopowe



I stopień zmian zwyrodnieniowych



II stopień zmian zwyrodnieniowych



III stopień zmian zwyrodnieniowych



IV stopień zmian zwyrodnieniowych

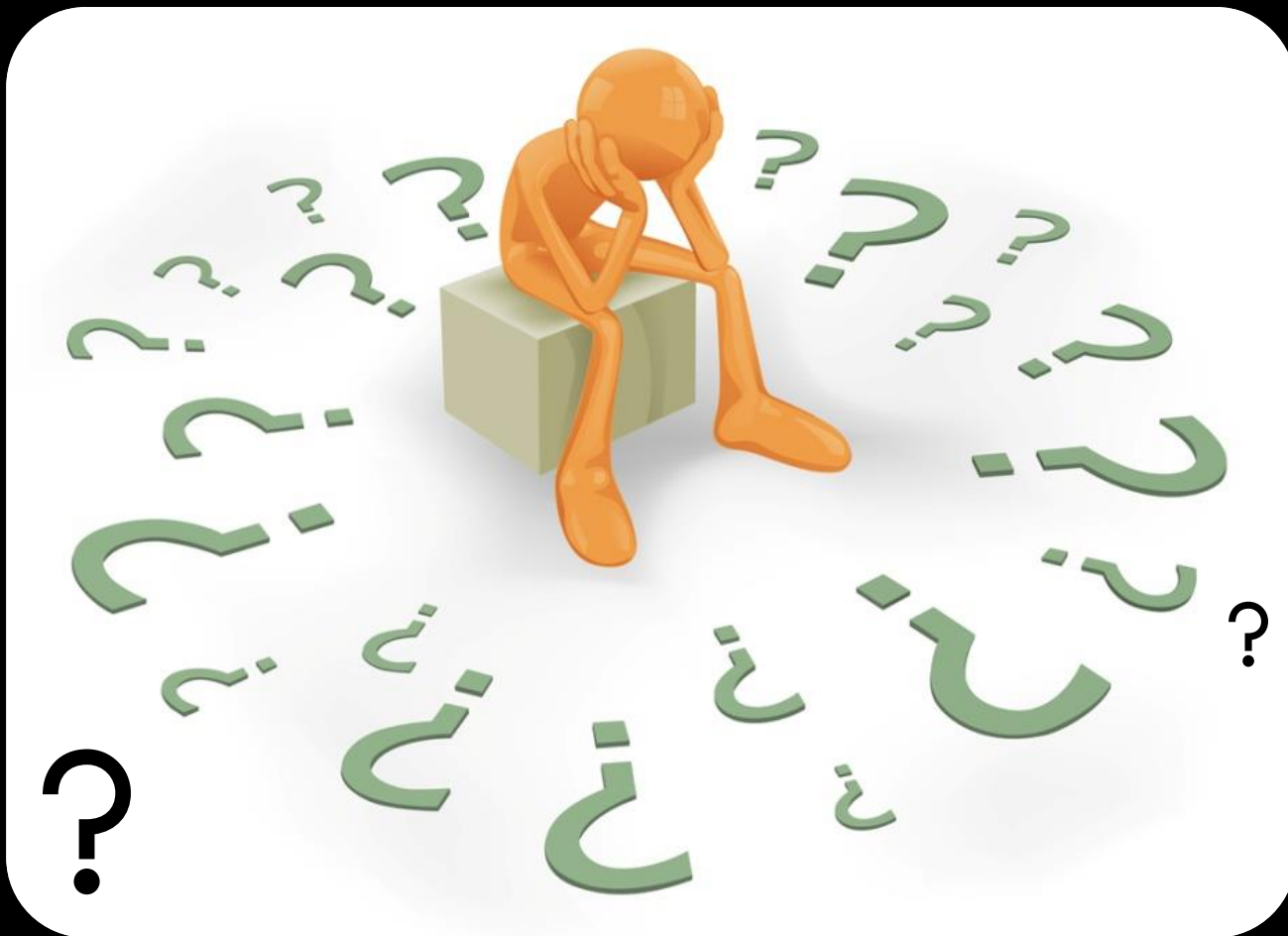


Zidentyfikowana potrzeba rynkowa

- I. Choroba zwyrodnieniowa stawów jest najczęstszą chorobą układu ruchu; częstość jej występowania zwiększa się wraz z wiekiem. Ze względu na prognozy demograficzne dotyczące starzenia się populacji oraz dane związane ze zwiększeniem częstości występowania nadwagi i otyłości, które sprzyjają rozwojowi OA, w najbliższej przyszłości należy oczekiwać epidemii tej choroby.
- II. Według prognoz w Europie populacja po 65. roku życia zwiększy się z 75 milionów w 2005 roku do 135 milionów w 2050 roku, co stanowić będzie około 30% ludności. Według GUS do roku 2029 liczba Polaków po 65 roku życia zwiększy się niemal 2-krotnie i będzie wynosiła >8 mln
- III. Według szacunków roczne koszty związane z chorobami układu ruchu wynoszą 1–2,5% produktu krajowego brutto w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, Wielkiej Brytanii, Francji i Australii.



Zasadnym jest pytanie: jaką technologię
wybrać do masowych badań przesiewowych ???





➤ **Badanie kliniczne?**

➤ **USG?**

- Tanie; Czas rzeczywisty; Obrazowanie wielopłaszczyznowe. Pomiary bezpośrednie. Umożliwia wizualizację ruchu. Brak udziału promieniowania jonizującego
- Wynik zależny od użytkownika; Głębokość tkanek i ich właściwości mają wpływ na propagację dźwięku

➤ **MRI?**

- Trójwymiarowe obrazowanie stawów. Monitorowanie wielu tkanek. Dobry kontrast tkanek, bezpośrednie pomiary. Brak użycia promieniowania jonizującego
- Wysoki koszt. Złożoność badań. Długie czasy akwizycji, czasochłonna analiza

➤ **Artroskopia?**

- Aktualnie brak zastosowania w praktyce klinicznej. Wymagane szersze badania!!

➤ **RTG?**

- Niedrogie, szybkie, proste, łatwe do zastosowania
- Obrazy 2D, pomiary pośrednie, ekspozycja na promieniowanie

➤ **Fonoartrografia**

(b. akustyczne głównie żuchwy)

➤ **Tomografia komputerowa**

- Obrazy wielopłaszczyznowe 3D. Dobra rozdzielczość
- Wyższe narażenie na promieniowanie; może być potrzebny środek kontrastowy



Zidentyfikowana potrzeba rynkowa

- IV. Nieinwazyjne metody diagnostyki (np. tomografia a zwłaszcza artrografia stawu kolanowego z obligatoryjnym podaniem kontrastu z użyciem rezonansu magnetycznego) wiążą się z generowaniem wysokich kosztów, ograniczoną dostępnością jak również niewystarczającą dokładnością w przypadku diagnozowania uszkodzeń powierzchni stawowych,
- V. W przypadku metod inwazyjnych (np. Artroskopia) zawsze istnieje ryzyko wystąpienia powikłań związanych z interwencją chirurgiczną.
- VI. Dotychczas podejmowane próby oceny stopnia uszkodzenia na podstawie generowanych procesów wibroakustycznych w oparciu o diagnostykę obrazową, która nie daje całkowitej pewności diagnostycznej jak również nie zawsze pozwala na precyzyjną lokalizację zmian zwyrodnieniowych.



Podsumowanie stanu wiedzy:

- Choroby zwyrodnieniowe stawów są jedną z najczęstszych przyczyn niepełnosprawności na całym świecie.
- Z powodu bardzo ograniczonej zdolności gojenia chrząstki stawowej, leczenie powstałych uszkodzeń stawów jest niezwykle trudne, czasochłonne i kosztowne. **Im wcześniejsze wykrycie, tym koszty mniejsze a skutki łatwiejsze do leczenia.**
- Jak wspomniano, występowanie zmian zwyrodnieniowych stanowi poważny problem natury ekonomicznej. Ekonomiczny wymiar choroby zwyrodnieniowej stawów jest zagadnieniem kompleksowym.



Podsumowanie stanu wiedzy:

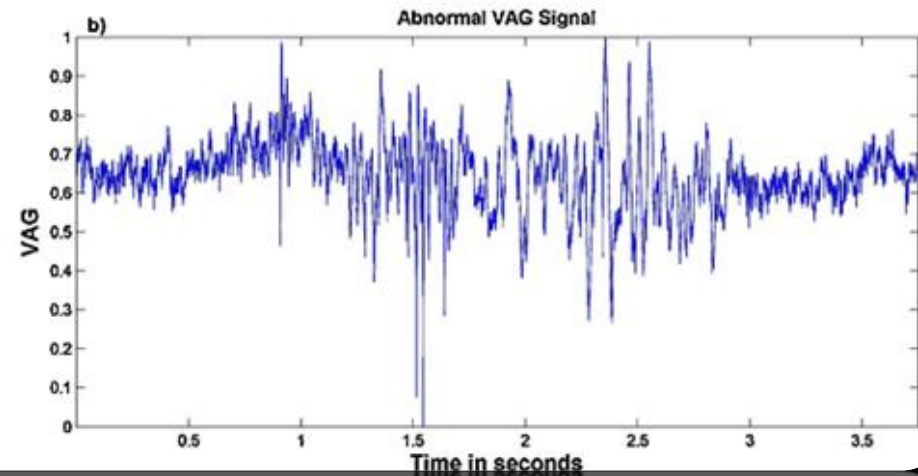
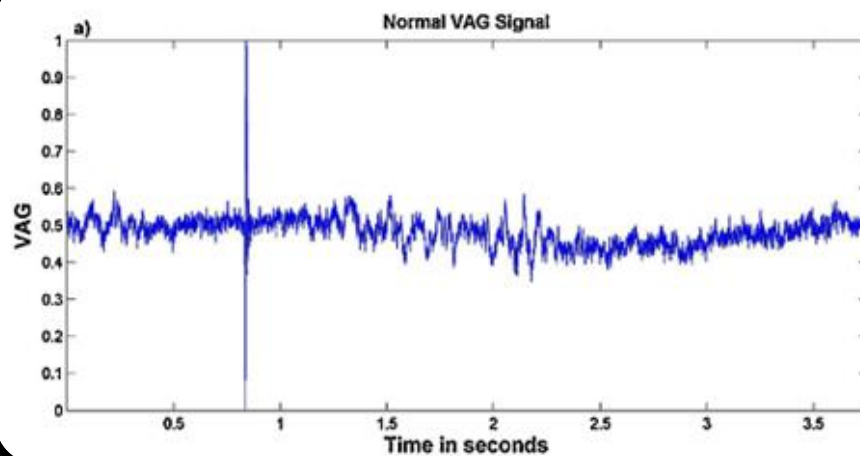
Wszystkie te czynniki uzasadniają potrzebę opracowania nieinwazyjnej, taniej metody monitorowania stanu i diagnostyki drganiowej powierzchni stawowych, umożliwiającej przeprowadzenie masowych badań przesiewowych na dużych grupach populacyjnych.

Na etapie wspomnianych badań przesiewowych, obsługa potencjalnego systemu oceny stanu powinna być możliwa do dokonania przez odpowiednio przeszkolonego technika, na wzór np. badania EKG a wynik badania powinien być przesłanką do dalszych działań odpowiedniego lekarza specjalisty.



Istota proponowanej metody

Z aktualnego stanu wiedzy wynika, że podczas ruchu elementów stawu kolanowego, generowany jest sygnał wibroakustyczny, którego parametry zależą znacząco od stopnia uszkodzenia chrząstki stawowej.



Sygnał drganiowy charakterystyczny dla chrząstki stawu kolanowego, w stanie:
a) normalnym, b) w znacznym stopniu uszkodzenia

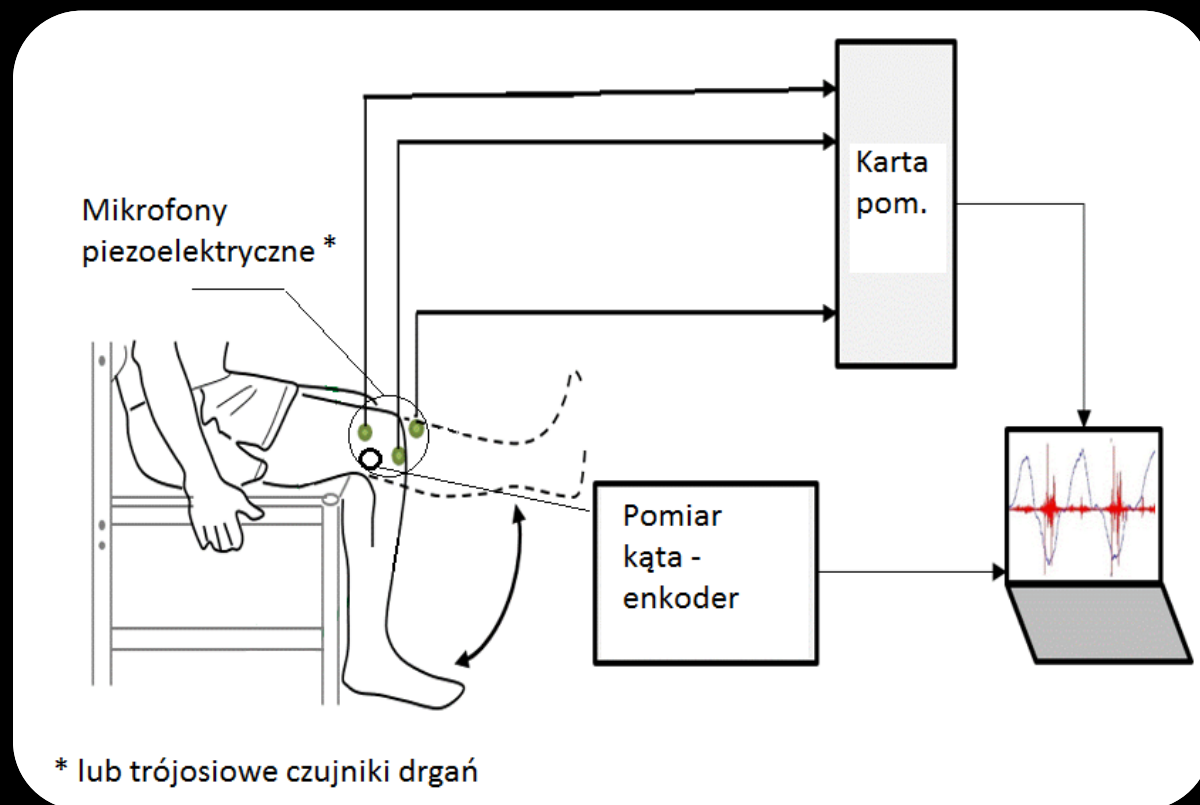
Źródło: [Keo Sik Kim i inni]

Istota proponowanej metody cd.

TESTOWY UKŁAD POMIAROWY:

Idea pomiaru:

- w sąsiedztwie miejsca generowania sygnału pomiarowego (drganiowego lub akustycznego) lokowane będą adekwatne czujniki
- identyfikacja parametrów ruchu kości w węźle tarcia (stawie) poprzez zastosowanie enkodera



* lub trójosiowe czujniki drgań

* lub trójosiowe czujniki drgań

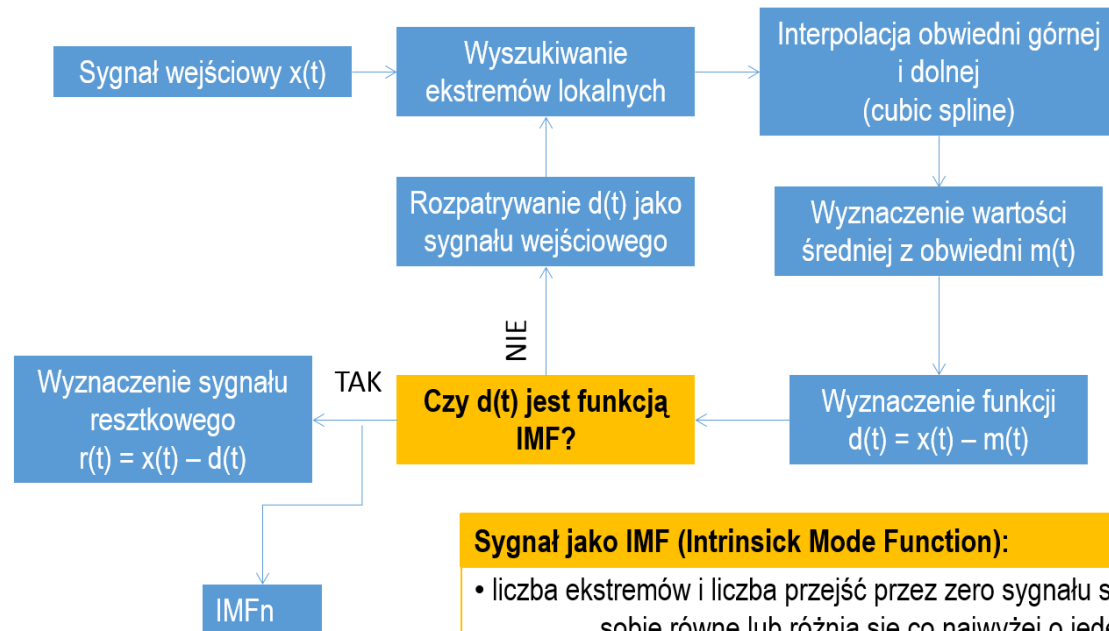


Istota proponowanej metody cd.

Proponowana procedura przetwarzania sygnału nieliniowego z użyciem algorytmu EMD

Empirical Mode Decomposition (EMD)

Empiryczna dekompozycja sygnału



Sygnał jako IMF (Intrinsic Mode Function):

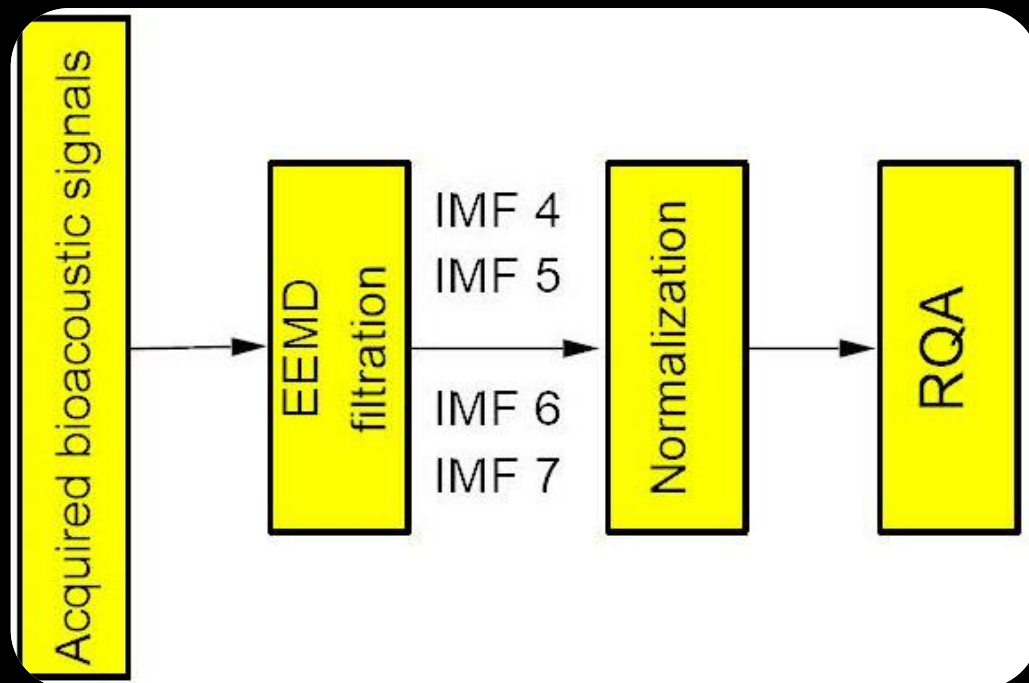
- liczba ekstremów i liczba przejść przez zero sygnału są sobie równe lub różnią się co najwyżej o jeden
- średnia wartość obwiedni interpolujących lokalne maksima i minima jest równa zero



Istota proponowanej metody cd.

(*Wariant II – algorytm EMD + RQA* (Recurrence Quantification Analysis))

Schemat przetwarzania sygnałów wibroakustycznych w metodzie II



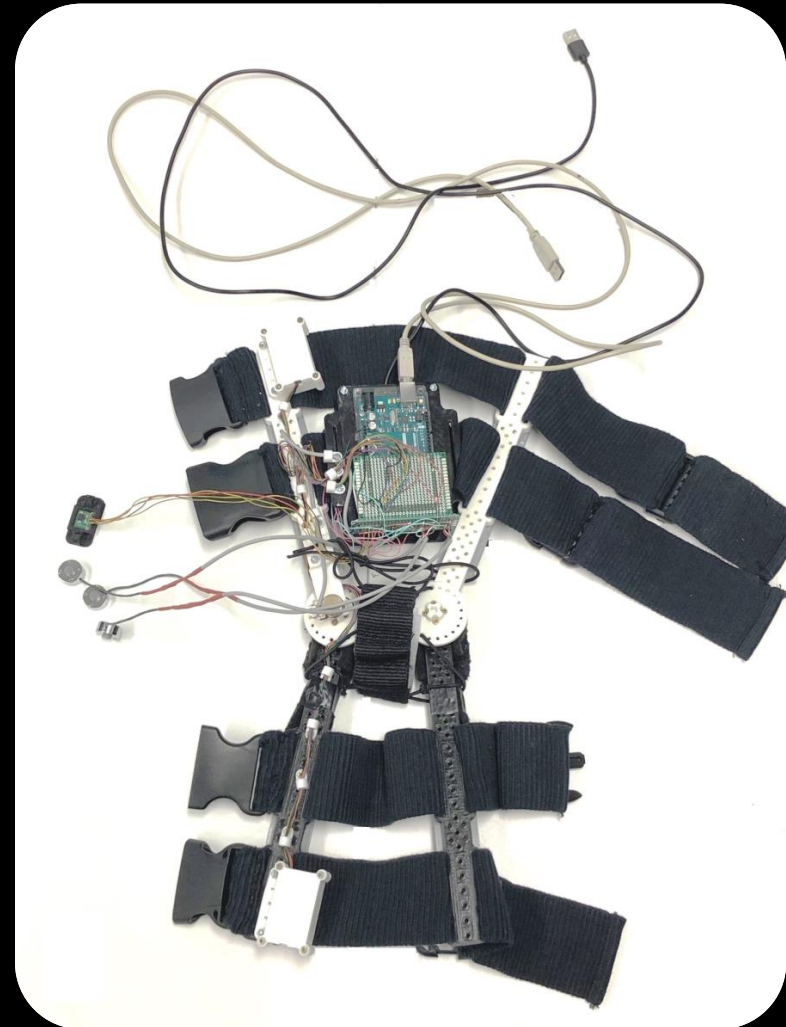
W oparciu o dostępne dane literaturowe oraz badania własne – selekcja istotnych informacyjnie IMF (IMF4-IMF7)



Elementy składowe opracowanego demonstratora

(prototyp):

- orteza z zamocowanymi sensorami wibracji/ efektów akustycznych, położenia i kąta obrotu kolana,
- karty pomiarowe, oraz:
- sprzęt komputerowy służący do prowadzenia pomiarów zdefiniowanych parametrów fizycznych,
- systemy dedykowanego oprogramowania do wizualizacji oraz analizy danych.





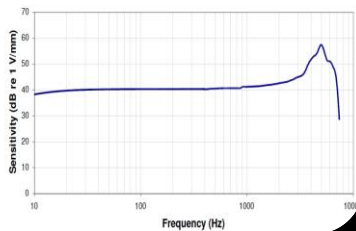
Elementy składowe opracowanego demonstratora

(prototyp) cd.:

CONTACT MICROPHONE CM-01B

CHARACTERISTICS	Min	Typ	Max	Units
Sensitivity		40		V/mm
Lower Limiting Frequency (-3 dB)		8		Hz
Upper Limiting Frequency (+3 dB)		2.2		kHz
Resonance Frequency		5		kHz
Spring Constant		20		N/m
Electronic Noise		1		mV _{pk-pk}
Supply Voltage	4	5	30	V-DC
Supply Current		0.1		mA
Operating Temperature	+5		+60	°C
Storage Temperature	-20		+85	°C

Typical Frequency Response



Analog Input

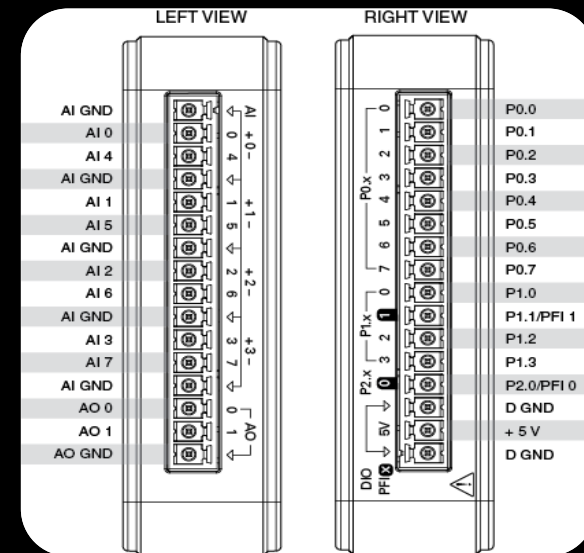
Number of channels

Differential.....4

Single-ended.....8

ADC resolution.....16-bit

Maximum sample rate (aggregate).....50 kS/s





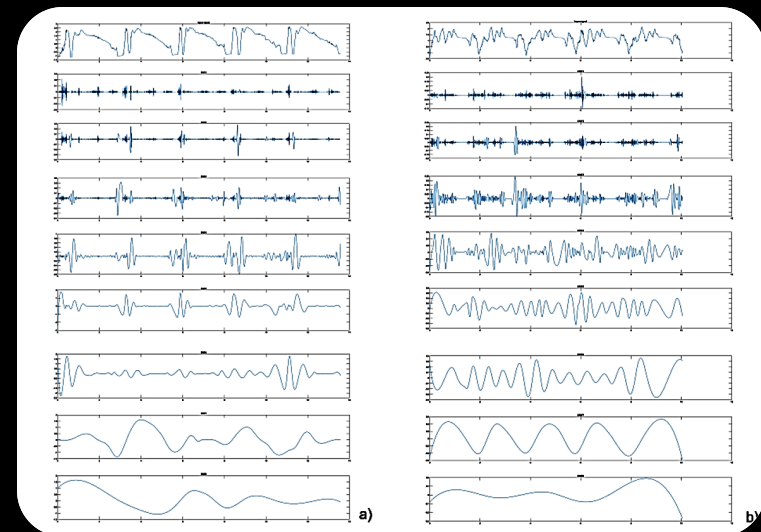
Wyniki dotychczasowych badań pilotażowych, wg *Wariant I* (z użyciem EMD)

Sygnał akustyczny

Przetwarzanie sygnału z użyciem algorytmu EMD (adaptacyjnej dekompozycji sygnału pierwotnego na funkcje składowe, tzw. IMF (ang. Intrinsic Mode Function)

Rozkład na 15 IMF, analiza w zakresie 1-10 IMF, przykład wybranych IMF.

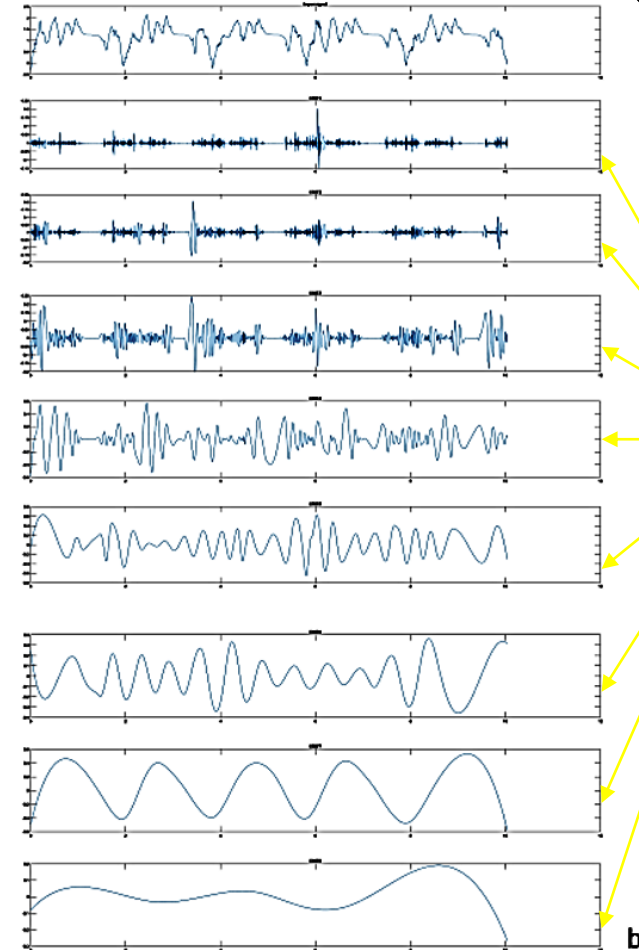
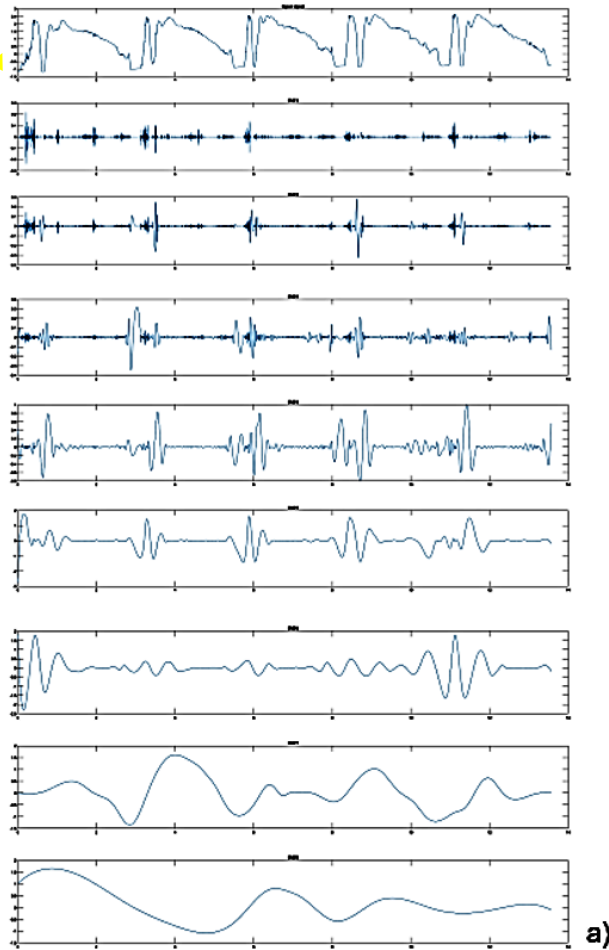
- a) Sygnał dla kolana zdrowego
- b) Sygnał dla kolana w zaawansowanym stanie chorobowym (chondromalacia)





Wyniki dotychczasowych badań pilotażowych, wg *Wariant I* (z użyciem EMD)

Sygnał akustyczny

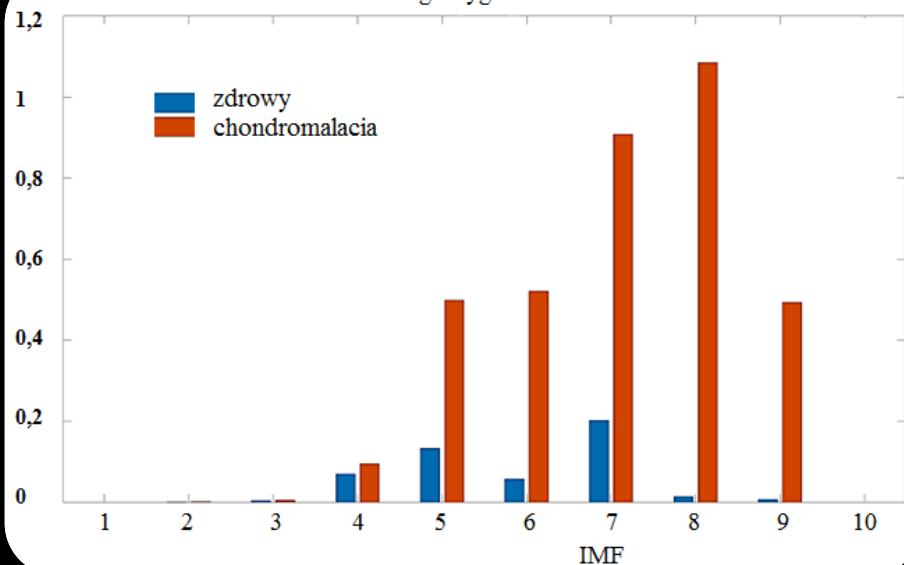


IMFi

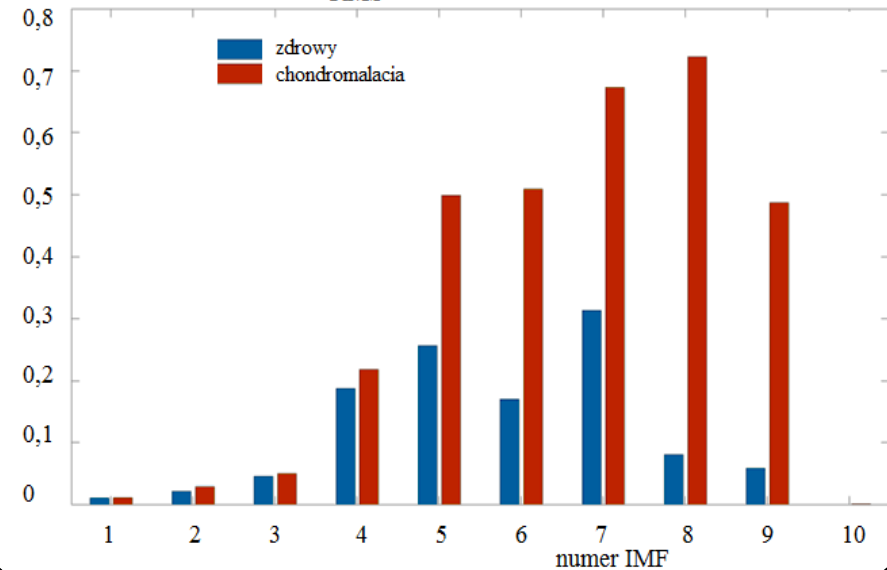


Wyniki dotychczasowych badań pilotażowych, wg *Wariant I* (z użyciem *EMD*)

Energia sygnału



RMS



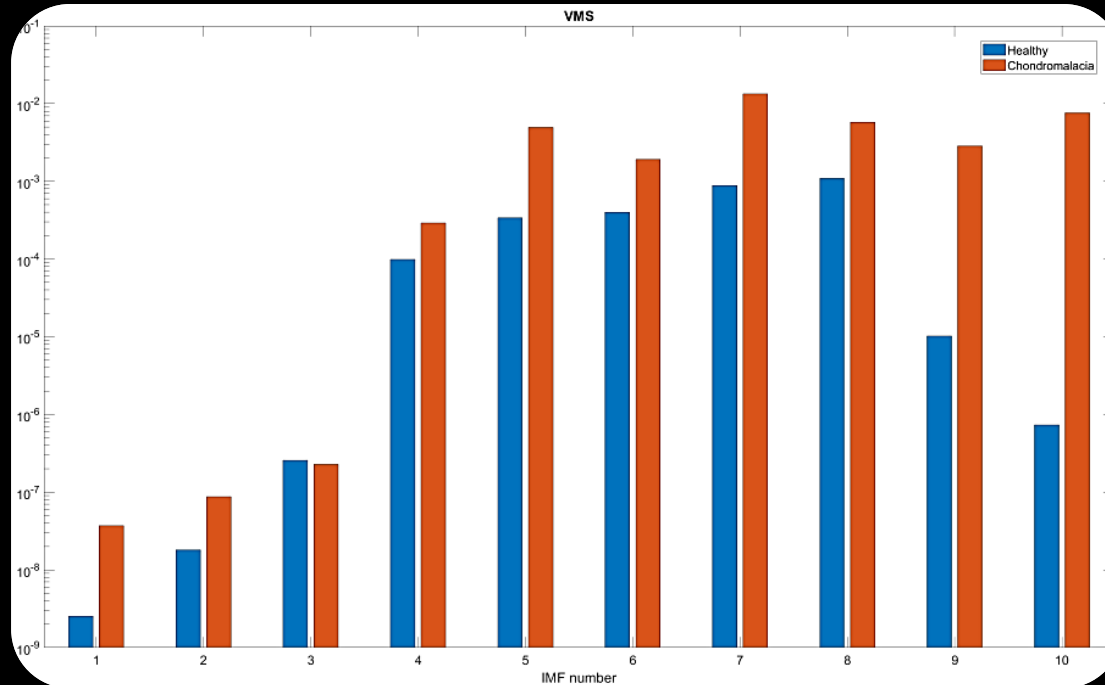
$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n)|^2$$

Wartość skuteczna sygnału

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n)}$$



Wyniki dotychczasowych badań pilotażowych, wg *Wariant I* (z użyciem *EMD*)



Wariancja z populacji:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{\mu})^2}{N}$$

gdzie:

σ^2 - wariancja

$\bar{\mu}$ - średnia z populacji

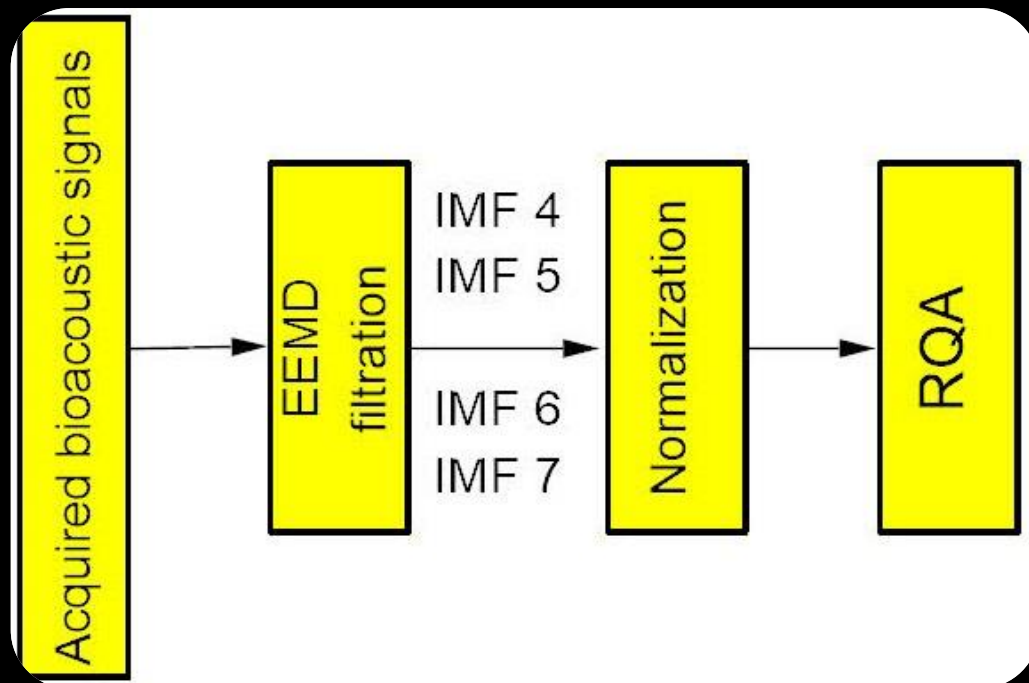
X - kolejna obserwacja w populacji

N - liczba osób w populacji



Istota proponowanej metody cd. (Wariant II – algorytm EMD + RQA (Recurrence Quantification Analysis))

Schemat przetwarzania sygnałów wibracousticycznych w metodzie II



W oparciu o dostępne dane literaturowe oraz badania własne – selekcja istotnych informacyjnie IMF (IMF4-IMF7)



Istota proponowanej metody cd. (Wariant II – algorytm EMD +RQA (Recurrence Quantification Analysis))

Jednym z nowoczesnych narzędzi do analizy sygnałów nieliniowych jest **diagram rekurencyjny**. Oparta na nim ilościowa analiza rekurencji pozwala na: stwierdzenie losowości albo determinizmu badanego układu wraz z określeniem wielkości tego determinizmu, obliczenie wartości entropii informacyjnej systemu, ocenę stacjonarności/niestacjonarności procesu oraz jego regularności bądź chaotyczności.



Istota proponowanej metody cd.

(Wariant II – algorytm EMD +RQA (Recurrence Quantification Analysis))

Do najważniejszych wielkości charakteryzujących diagram rekurencyjny należą:

- 1) **Recurrence Rate (RR)** procentowy stosunek liczby stanów rekurencyjnych, czyli powtarzalnych (czarnych kropek na diagramie) do liczby wszystkich stanów systemu,
- 2) **Determinism (DET)** procent punktów rekurencyjnych tworzących segmenty liniowe (fragmenty linii) równoległe do głównej przekątnej diagramu; ogólnie, obecność takich linii ujawnia, że badany system (proces, zjawisko) jest deterministyczny, a wartość DET jest miarą stopnia determinizmu,



Istota proponowanej metody cd.

(*Wariant II – algorytm EMD +RQA* (Recurrence Quantification Analysis))

3) **Imax**; długość najdłuższej występującej na diagramie linii równoległej do głównej jego przekątnej. Wartość Imax jest proporcjonalna do odwrotności największego dodatniego wykładnika Lapunowa i może być użyta jako estymator dolnej granicy sumy dodatnich wykładników Lapunowa. Im niższa wartość Imax, tym bardziej chaotyczny jest proces deterministyczny,

4) **Trend (TREND)** współczynnik regresji liniowej wartości RR w funkcji odległości od głównej przekątnej diagramu; wielkość ta dostarcza informacji o niestacjonarności badanego procesu (mała wartość TREND wskazuje na jego stacjonarność), a w szczególności o istnieniu bądź nieistnieniu liniowego bądź periodycznego trendu zmian przebiegu procesu,



Istota proponowanej metody cd.

(*Wariant II – algorytm EMD +RQA* (Recurrence Quantification Analysis))

5) **Entropy (ENTR)** entropia Shannona [15] będąca średnią miarą informacji związaną z rozkładem prawdopodobieństwa długości segmentów liniowych na diagramie równoległych do głównej przekątnej; wielkość ENTR odzwierciedla złożoność diagramu ze względu na linie diagonalne (wysoka wartość ENTR jest typowa dla zachowań periodycznych układu dynamicznego, niska odpowiada układom chaotycznym, a bardzo niska (zerowa bądź bliska zero) nieskorelowanemu szumowi),

6) **Laminarity (LAM)**, ukazuje procentowy udział stanów rekurencyjnych, czyli powtarzalnych (czarnych kropek na diagramie) tworzących linii wertykalnych w strukturze w diagramu. Linie poziome wskazują na intermitencje badanego układu (zachowanie pewnych układów złożonych, oznaczające przełączanie układu).



Wyniki dotychczasowych badań pilotażowych, wg *Wariant II* (z użyciem *EMD + RQD*)

Type	RR	DET	ENTR	LAM	TT
ChO	127,500	99,996	8,159	99,997	196,306
HO	80,211	99,969	7,030	99,983	70,267
ChC	86,245	99,980	7,511	99,988	124,636
HC	65,757	99,967	6,946	99,982	43,623

Recurrence Quantification Analysis:

ChO- chondromalacja, otwarty łańcuch kinematyczny;

HO- zdrowy, otwarty łańcuch kinematyczny;

ChC- chondromalacja, zamknięty łańcuch kinematyczny;

HC- zdrowy, zamknięty łańcuch kinematyczny



- Proponowana metoda diagnostyczna spełniła oczekiwania – Badania wstępne pokazują, że możliwe i skuteczne jest diagnozowanie potencjalnego uszkodzenia chrząstki stawowej z użyciem tzw. vibroartrografii, czy badań sygnału akustycznego
- Zaproponowana metoda jest nieinwazyjną metodą badań diagnostycznych, możliwą do zastosowania w warunkach badań przesiewowych
- Rodzaj używanego w badaniach łańcucha kinematycznego ma istotne znaczenie dla prawidłowości prowadzenia testów diagnostycznych i uzyskiwanych wyników
- Filtracja sygnału z uwagi na występujące częstotliwości rozróżnienie stopnia uszkodzenia powierzchni stawowych od występujących artefaktów pochodzących np. od napięcia mięśniowego, przemieszczeń rzepki, itp.



Dotychczasowe publikacje z zakresu badań

Opublikowane:

1. Application of acoustic signal processing methods in detecting differences between open and closed kinematic chain movement for the knee joint / Robert Karpiński, Anna Machrowska, Marcin Maciejewski
// Applied Computer Science.- 2019, vol. 15, nr 1, s. 36-48
2. Diagnostic factors for opened and closed kinematic chain of vibroarthrography signals / Anna Machrowska, Robert Karpiński, Przemysław Krakowski, Józef Jonak
// Applied Computer Science.- 2019, vol. 15, nr 3, s. 34-44

Zgłoszone:

1. A preliminary study on the use of EEMD-RQA algorithms in the detection of degenerative changes in knee joints / by Józef Jonak, Robert Karpiński, Anna Machrowska , Przemysław Krakowski and Marcin Maciejewski
2. Bioacoustic signal processing methods in detecting cartilage degeneration of knee joint a preliminary study/ by Józef Jonak, Robert Karpiński, Anna Machrowska, Przemysław Krakowski and Marcin Maciejewski



- W. George Kernohan, David E. Beverland, Gerald F. McCoy, Alistair Hamilton, Peter Watson & Rab Mollan (1990) Vibration arthrometry, *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 61:1,70-79, DOI: 10.3109/17453679008993071
- Rangayyan R., WU Y.: Analysis of Vibroarthrographic Signals with Features Related to Signal Variability and Radial-Basis Functions. *Annals of Biomedical Engineering*, Vol. 37, No. 1, January 2009, pp. 156–163, DOI: 10.1007/s10439-008-9601-1
- Shanshan Yang, Suxian Cai, Fang Zheng, Yunfeng Wu, Kaizhi Liu, Meihong Wu, Quan Zou, Jian Chen: Representation of fluctuation features in pathological knee joint vibroarthrographic signals using kernel density modeling method. *Medical Engineering & Physics*, Volume 36, Issue 10, October 2014, Pages 1305-1311 <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2014.07.008>
- Keo Sik Kim, Jeong Hwan Seo, Jin U Kang, and Chul Gyu Song. An enhanced algorithm for knee joint sound classification using feature extraction based on time-frequency analysis. *Computer methods and programs in biomedicine*, 94(2):198–206,2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmpb.2016.01.020>

DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ !!!

Diagnostyka uszkodzeń chrząstki stawowej na podstaw generowanych procesów wibroakustycznych

POLITECHNIKA LUBELSKA
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Mechatroniki
prof. dr hab. inż. Józef Jonak
mgr inż. Robert Karpiński
mgr inż. Anna Machrowska
Katedra Elektroniki i Technik Informatycznych
dr inż. Marcin Maciejwski

Projekt „Politechnika Lubelska – Regionalna Inicjatywa Doskonałości”
– finansowany ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego



Ministerstwo
Nauki
i Szkolnictwa
Wyższego

