

Wstęp

Elastografia MR (MRE) to stosunkowo nowa, nieinwazyjna metoda diagnostyczna o ogromnym potencjale, umożliwiająca ocenę właściwości biomechanicznych tkanek miękkich w organizmie człowieka. Dzięki pomiarowi parametrów biofizycznych, takich jak sztywność tkanek, MRE pozwala na ocenę ryzyka wystąpienia oraz stopnia zaawansowania wielu procesów patologicznych, w tym włóknienia, stanów zapalnych czy nowotworów. MRE łączy w sobie elementy fizyki, mechaniki, informatyki i medycyny, co czyni ją techniką interdyscyplinarną, a zarazem skomplikowaną i czasochłonną w interpretacji. Do tego, pomimo dynamicznego rozwoju tej technologii, wpływ wielu czynników, w tym fizjologicznych, na uzyskiwane w MRE parametry biomechaniczne nie został jeszcze w pełni poznany. Dodatkowo wykonalność badania w dużym stopniu zależy od współpracy pacjenta oraz użytego sprzętu. Badanie MRE zaleca się wykonywać na wstrzymanym oddechu, co nie zawsze jest możliwe, zwłaszcza u pacjentów z trudnościami oddechowymi, a komercyjnie dostępny nadajnik pasywny jest przeznaczony głównie do badania dużych narządów, takich jak wątroba czy śledziona, co ogranicza zastosowanie MRE w innych obszarach anatomicznych.

Cel badań

Celem badań było wniesienie wkładu w rozwój techniki MRE przez: a) ocenę wpływu posiłku oraz zawartości żelaza wątrobowego na zmierzoną sztywność wątroby u zdrowych ochotników, b) opracowanie algorytmu umożliwiającego wykonanie badania MRE wątroby podczas swobodnego oddychania dzięki redukcji artefaktów ruchowych, c) opracowanie algorytmu do automatycznej segmentacji mięśnia sercowego w MRE serca, oraz d) zaprojektowanie dedykowanego nadajnika umożliwiającego elastografię MR ślinianek przyusznych.

Material i metody

Wpływ posiłku i zawartości żelaza wątrobowego na wartość sztywności wątroby został oceniony w grupie 100 zdrowych ochotników. U wszystkich uczestników wykonano badania laboratoryjne krwi i dokonano pomiaru sztywności tkanki wątrobowej przy pomocy MRE na czczo i w jednym lub kilku odstępach czasowych po spożyciu posiłku. Dodatkowo wyznaczono parametr $R2^*$, korelujący z zawartością żelaza wątrobowego. Przeprowadzono analizę statystyczną mającą na celu ocenę korelacji między badanymi parametrami.

Do opracowania algorytmu redukującego artefakty ruchowe związane z oddychaniem przebadano grupę 41 ochotników, których zbadano dwukrotnie – przy wstrzymanym oraz swobodnym oddechu. Wytrenowano sieć neuronową opartą o architekturę SegNet, która na podstawie obrazów surowych uzyskanych przy swobodnym oddychaniu generowała obrazy zbliżone do obrazów referencyjnych, czyli obrazów uzyskanych w badaniach ze wstrzymanym oddechem. Następnie obrazy te zostały poddane inwersji w celu wygenerowania map sztywności, które zostały porównane z mapami referencyjnymi.

Algorytm do automatycznej segmentacji mięśnia sercowego w MRE serca został opracowany w oparciu o dane pochodzące z grupy 16 zdrowych ochotników. Przetestowano 3 podejścia do uczenia sieci neuronowych, 4 kombinacje danych wejściowych oraz 7 architektur sieci neuronowych. Zadaniem opracowywanych modeli było wygenerowanie maski mięśnia sercowego odpowiadającej masce referencyjnej narysowanej ręcznie.

Zaprojektowanie dedykowanego nadajnika pasywnego opierało się o konieczność doprowadzenia źródła wibracji możliwie blisko do badanego obszaru. Nowy nadajnik wykonano z elastycznych materiałów i można go zamocować bezpośrednio na twarzy osoby badanej przy pomocy taśmy z rzepem. Nadajnik ten przetestowano na grupie 3 zdrowych ochotników zarówno metodą 2D MRE jak i 3D MRE.

Wyniki

Nie wykryto korelacji pomiędzy wartościami sztywności wątroby zmierzonymi za pomocą MRE na czczo w badanej grupie zdrowych wolontariuszy a wartościami parametru $R2^*$ - $r = -0.04$, $p = 0.68$. Stwierdzono jednak istotny statystycznie ($p < 0.01$) poposiłkowy wzrost sztywności wątroby, który utrzymywał się nawet do 2 godzin i 30 minut po spożyciu posiłku.

Algorytm redukujący artefakty ruchowe oparty na sztucznej inteligencji istotnie poprawił jakość map sztywności uzyskanych przy swobodnym oddychaniu. Wartość sztywności wątroby uzyskana w ten sposób (5.67 ± 1.58 kPa, zakres 4.45–9.34 kPa) była bliższa wartości referencyjnej (4.90 ± 1.41 kPa, zakres 3.41–7.84 kPa) niż wartość uzyskana w badaniu bez korekcji (7.59 ± 1.11 kPa, zakres 6.58–10.09 kPa).

Opracowany algorytm automatycznej segmentacji mięśnia sercowego wykazał się wysoką dokładnością segmentacji (współczynnik Dice'a = 0.77 ± 0.07 , przecięcie nad unią = 0.63 ± 0.09 , precyzja = 0.68 ± 0.08 , czułość = 0.90 ± 0.07 , specyficzność = 0.99 ± 0.01 , AUROC = 0.95 ± 0.03 , odległość Hausdorffa = 2.67 ± 0.19), znacząco przyspieszając interpretację badania MRE serca.

Zaprojektowany pasywny nadajnik umożliwił przeprowadzenie elastografii MR ślinianek przyusznych zarówno w 2D, jak i 3D MRE, wykazując wykonalność takiego badania. W przypadku 3D MRE udało się przeprowadzić badanie z użyciem wibracji o częstotliwości 120 Hz, co znacząco zwiększa wiarygodność pomiaru sztywności, lepkości i innych parametrów biofizycznych ślinianek.

Wnioski

Wniosek główny:

Opracowane rozwiązania eliminują istotne ograniczenia metody elastografii rezonansu magnetycznego i stanowią znaczący krok w kierunku dalszego rozwoju tej techniki.

Wnioski z realizacji celów szczegółowych:

1. Wyznaczono wpływ spożycia posiłku oraz zawartości żelaza wątrobowego na wartość sztywności wątroby zmierzoną za pomocą elastografii MR.
2. Opracowano algorytm oparty na architekturze SegNet, redukujący artefakty ruchowe w badaniu MRE spowodowane oddychaniem osoby badanej.
3. Opracowano model oparty na uczeniu głębokim, umożliwiający automatyczną segmentację mięśnia sercowego w badaniu MRE serca.
4. Stworzono nowy, dedykowany nadajnik pasywny umożliwiający wykonanie badania MRE oraz wiarygodną ocenę sztywności, lepkości oraz innych parametrów biofizycznych ślinianek przyusznych.

Słowa kluczowe: MRE, parametry biofizyczne narządów ludzkich, sztywność, lepkość.

