



SILESIAIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
THE AUTOMATICS, ROBOTICS AND INFORMATICS
DEPARTMENT OF DATA SCIENCE AND ENGINEERING

Poszerzone streszczenie rozprawy doktorskiej

Computer-Assisted Detection and Quantification of Low-Attenuation
Lung Patterns in CT Studies of COPD Patients.

Author: Marek Socha

Supervisor: Prof. dr hab. inż. Joanna Polańska

Gliwice, May 2025

Motywacja

Przewlekła obstrukcyjna choroba płuc (POChP) to postępujące schorzenie, które ogranicza przepływ powietrza, powodując objawy takie jak duszność, przewlekły kaszel, nadmierne wydzielanie śluzu i potencjalnie niewydolność oddechową. Palenie tytoniu i zanieczyszczenia powietrza to główne czynniki ryzyka POChP. Wczesna diagnoza i leczenie mają kluczowe znaczenie dla powstrzymania postępu choroby, a sztuczna inteligencja może pomóc w procesie diagnostycznym i terapeutycznym.

Ręczna segmentacja zmian rozedmowych w POChP jest czasochłonna i rzadko wykonywana, co prowadzi do braku publicznie dostępnych oznaczonych danych. Niedobór ten podważa wiarygodność rozwiązań uczenia głębokiego. Klasyczne metody są alternatywnym rozwiązaniem, ze względu na to, że wymagają mniejszej liczby oznaczonych zbiorów danych jednocześnie bazując na wiedzy eksperckiej, co zwiększa ich niezawodność i wyznacza wyraźne granice funkcjonalne.

Praca ma na celu opracowanie zautomatyzowanego systemu do analizy obrazów CT, wykrywania i oceny zmian o niskim tłumieniu, koncentrując się na pacjentach z POChP. System ma na celu ilościową analizę tych zmian, wykorzystując klasyczne metody w celu lepszego uogólnienia w porównaniu z sieciami neuronowymi.

Analizy przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej pozwoliły na sformułowanie następujących tez:

- Techniki nienadzorowanego uczenia się wykazują potencjał w wykrywaniu zmian o niskiej atenuacji w obrazowaniu tomografii komputerowej (CT), oferując skuteczną alternatywę dla podejść nadzorowanych poprzez wykorzystanie wewnętrznych struktur danych bez potrzeby stosowania adnotowanych, treningowych zbiorów danych.
- Objętość i rozkład przestrzenny obszarów rozedmowych zidentyfikowanych za pomocą zautomatyzowanych procesów wykrywania może służyć jako wstępne oszacowanie progresji POChP. Obszary te wykazują ilościowy i jakościowy związek z pomiarami spirometrycznymi zdefiniowanymi przez GOLD.
- Aby zminimalizować liczbę wyników fałszywie dodatnich w segmentacji zmian o niskiej atenuacji i zmian rozedmowych, kluczowe jest skonstruowanie trójwymiarowego modelu struktury dróg oddechowych.

Segmentacja płuc

Segmentacja płuc ma kluczowe znaczenie, ponieważ niedokładności mogą wpływać na diagnozę poprzez włączenie szumu lub pominięcie istotnych informacji. W literaturze metody segmentacji płuc dzieli się na pięć kategorii: oparte na progowaniu, oparte na regionach, wykorzystujące kształt lub model, prowadzone anatomią oraz oparte na uczeniu maszynowym.

Metody progowania cechują się stosunkowo dużą szybkością, jednak ich dokładność jest ograniczona ze względu na obecność naczyń w śródpiersiu, tchawicy oraz innych struktur, które stanowią czynniki zakłócające. Metody oparte na regionach, takie jak Region Growing i Watershed, są mniej wymagające obliczeniowo, ale podatne na zakłócenia. Metody oparte na kształcie lub modelu wykorzystują kształt płuc w celu uzyskania lepszych wyników, podczas gdy metody oparte na anatomii koncentrują się na strukturach wokół płuc w celu ograniczenia obszaru wyszukiwania, lepiej radząc sobie ze złożonymi przypadkami.

Metody uczenia maszynowego, w szczególności uczenie głębokie, są najbardziej skuteczne w segmentacji płuc. Architektura U-Net, zwłaszcza jej forma 3D, jest szeroko stosowana ze względu na jej wydajność. Modyfikacje U-Net, takie jak włączenie bloków uwagi, wykazują różne poziomy sukcesu, a ostatnie odkrycia sugerują, że oryginalna sieć U-Net działa dobrze, gdy jest trenowana na zróżnicowanym zbiorze danych.

Przetestowano działanie metody opartej na progowaniu, opartej na rozroście ograniczonym konturem oraz opartej na sieci neuronowej. W pracy stwierdzono, że podczas gdy tradycyjne metody zmagają się z nieprawidłowościami, sieci neuronowe, w szczególności U-Net, dobrze radzą sobie z kompleksowymi danymi szkoleniowymi, dzięki czemu nadają się do segmentacji płuc, która jest niezbędnym krokiem w analizie chorób.

Segmentacja dróg oskrzelowych

Segmentacja dróg oddechowych z obrazów TK płuc, przede wszystkim ma na celu ułatwienie dalszej analizy poprzez usunięcie obszarów o jednostkach Hounsfielda zbliżonych do tych znajdujących się w zmianach rozedmowych, a po drugie umożliwia analizę grubości ich ścianek. Metoda segmentacji wykorzystuje tubularną strukturę dróg oddechowych, charakterystyczną intensywność wokseli i otaczające ściany tkanek. Do segmentacji wykorzystywany jest algorytm szybkiego marszu z mapą podwójnego

gradientu.

Przewlekła obturacyjna choroba płuc (POChP) charakteryzuje się dwoma typami zmian: rozedmą płuc i zapaleniem oskrzelików. Badania wskazują, że choroba małych dróg oddechowych może objawiać się wcześniej, nawet u młodych palaczy, i znacząco wpływa na postęp POChP. Badania pokazują złożony związek między zapaleniem dróg oddechowych a rozedmą płuc, sugerując różnice w ścieżkach progresji choroby.

Zaproponowano metodę segmentacji dróg oddechowych na obrazach tomografii komputerowej (CT). Proces rozpoczyna się od wygenerowania masek śródpiersia i tchawicy, a następnie wykorzystuje metodę Gaussian Mixture Model (GMM) do identyfikacji wzorców tłumienia. Algorytm Fast Marching wykorzystuje dwa wygenerowane obrazy prędkości i punkty początkowe do identyfikacji dróg oddechowych, z dalszymi krokami w celu udoskonalenia segmentacji poprzez wyznaczenie ścian dróg oddechowych i identyfikację końcowych gałęzi za pomocą operacji morfologicznych.

Automatyczna procedura wykorzystuje kilka filtrów, takich jak filtr naczyńskiowy Sato bazujący na Hesjanie i służący do podkreślania struktury tubularnych. Do oceny jakości segmentacji zaproponowano nienadzorowaną metodę opartą na wartościach odstających Huberta, oznaczając segmentację dróg oskrzelowych jako prawidłową, wystarczającą lub wadliwą. Prawidłowa jakość segmentacji (ocena 5) stanowi 55,22% obrazów, przy wystarczającej jakości na poziomie 32,92% łącznie dla ocen 4 i 6. Wadliwe segmentacje są wykrywane przy użyciu analizy korelacji między cechami segmentacji a przypisanymi ocenami, przy czym objętość i liczba Eulera są istotnymi korelatami.

Pomimo skuteczności tej metody we wstępnym przetwarzaniu obrazów TK w celu wykrycia zmian rozedmowych i modelowania oskrzeli, napotyka ona wyzwania związane z dokładnym określeniem końcowych gałęzi sąsiadujących z miąższem płucnym ze względu na podobne wartości jednostek Hounsfielda (HU). Dalsze ulepszenia mogą obejmować alternatywne filtry w celu zwiększenia dokładności segmentacji. Dodatkowo, metoda zwraca maskę ścian oskrzeli wraz z segmentacją dróg oddechowych, wspierając szczegółową analizę diagnostyczną, szczególnie w kontekście POChP.

Segmentacja wzorów niskiego tłumienia

Literatura pokazuje, że metody segmentacji zmian rozedmowych w znacznej mierze opierają się głównie na technikach nienadzorowanych, a wczesne podejścia wykorzy-

stują proste algorytmy, takie jak progowanie i powiększanie regionu w celu identyfikacji i klasyfikacji stopnia zaawansowania choroby. Wraz z postępem w udostępnianiu danych i obliczeniach, najnowsze metody są bardziej wyrafinowane, przykładowo wykorzystują harmonizację poziomów szarości CT w celu ujednolicenia badań z różnych ośrodków i wykorzystują różne, nowe techniki uczenia maszynowego, takie jak grafowe sieci neuronowe, architektury oparte o moduły uwagi czy klasyczne architektury oparte o sieci konwolucyjne. Pomimo istnienia wielu podejść opartych na modelach głębokiego uczenia, nie powstała dotychczas na tyle różnorodna baza danych aby modele generalizowały poprawnie problem segmentacji zmian rozedmowych.

Zmiany rozedmowe charakteryzują się niejednorodnością pozycji oraz wielkości, jednak są relatywnie jednorodne w poziomach szarości. Pomimo tego stały próg segmentacji nie jest dobrym rozwiązaniem z racji na różnice wynikające z parametrów skanowania; poprawę segmentacji można uzyskać, stosując adaptacyjne techniki progowania. Dlatego zaproponowano potok segmentacji wykorzystujący adaptacyjne progowanie i gaussowskie modele mieszane, ukierunkowane na unikalne wartości niskiej atenuacji charakterystyczne dla zmian rozedmowych.

W badaniu ramach badań są możliwości dwóch metod adaptacyjnego progowania serii TK: Approximate Threshold Estimation (ATE) i Exact Threshold Estimation (ETE). Obie mają na celu wykorzystanie gaussowskich modeli mieszanych (GMM) do oszacowania progów segmentacji, różniąc się głównie procesami grupowania. ATE grupuje komponenty gaussowskie po dekompozycji GMM, podczas gdy ETE grupuje na podstawie progów uzyskanych później.

Metody zostały przetestowane na skanach TK płuc po wcześniejszym usunięciu drzewa oskrzelowego. Dekompozycja GMM została dostosowana do adaptacyjnego określania progów odcięcia, optymalizując ilość klastrów przy użyciu Bayesowskiego Kryterium Informacyjnego (BIC). Różnice w wartościach progowych rozedmy płuc między metodami ATE i ETE zostały przetestowane statystycznie przy użyciu testów Jarque-Bera, Wilcoxona i U Manna-Whitneya, ujawniając, że metoda ETE ma tendencję do zaniżania obszaru segmentacji w porównaniu z ATE. Metoda ATE została uznana za bardziej skuteczną ze względu na jej spójność w zakresie progowania i segmentacji.

Progi i segmentowane objętości analizowano w różnych grupach POChP (grupy GOLD). ATE wykazała wyższy wskaźnik klinicznie istotnych segmentacji, chociaż obie metody były zgodne z oczekiwanymi trendami w zakresie objętości zmian. Analiza sugeruje, że ATE jest lepsza do segmentacji zmian rozedmowych ze względu na niższe

wartości progowe i wyższą czułość.

Wyniki podkreślają potencjał obu metod do automatycznej, nienadzorowanej segmentacji zmian wykraczających poza rozedmę płuc, takich jak konsolidacje lub inne zmiany z kategorii wysokiej atenuacji, chociaż ATE wykazuje lepszą skuteczność i niezawodność w wychwytywaniu zmian rozedmowych.

Kwantyfikacja i grupowanie

Proponowana technika kwantyfikacji wykorzystuje wyniki segmentacji z poprzednich analiz do mapowania cech regionów zainteresowania (ROI) w przestrzeni 2D, oferując wizualne porównanie z wynikami spirometrii w standardzie GOLD. Tradycyjne metody, oparte na spirometrii i obliczeniach objętości, są niewystarczające do uchwycenia zakresu i rodzaju zniszczenia miąższu płucnego.

Prowadzone są badania w kierunku wykorzystania cech radiomicznych i sieci neuronowych do automatycznej i skutecznej klasyfikacji i określania stopnia zaawansowania POChP, wykorzystując zbiory danych, takie jak ECLIPSE i COPDGene. Metody kwantyfikacji różnią się, idąc od klasyfikacji przy użyciu klasyfikatorów logistycznych, przez maszyny wektorów nośnych, po grafowe sieci neuronowe do głębokiego uczenia się przy użyciu CNN. Podczas gdy sieci neuronowe zapewniają skuteczność, stanowią one wyzwanie w zakresie wyjaśnialności diagnostycznej. Cechy radiomiczne nie borykają się z tym problemem. Rozprawa doktorska wprowadza metodę, która nie zastępuje podejmowania decyzji medycznych, ale ma na celu zwiększenie zrozumienia poprzez przedstawienie relacji między przypadkami w przestrzeni 2D.

Na potrzebę metody, rozdzielono zmiany rozedmowe na w pełni połączone obszary, które zgrupowano stosując K-Means na podstawie ich lokalizacji. W ten sposób stworzono powiązane ze sobą regiony (ROI), na podstawie których wyodrębniono trzy zestawy cech: cechy radiomiczne, cechy oparte na konturach i cechy położenia przestrzennego, obliczając łącznie 156 cech na ROI. Cechy zostały poddawane wstępnemu przetwarzaniu, selekcji i osadzaniu przy pomocy metody UMAP. Wizualizacja map gęstości UMAP ujawniła klastry odpowiadające różnym klasyfikacjom GOLD choroby POChP. Klastry dla różnych grup GOLD wykazują różne charakterystyczne wzorce rozedmy płuc, z pewnym nakładaniem się klastrów dla grup GOLD 0, 1 i 2.

Przy pomocy w pełni połączonej sieci neuronowej utworzono model zdolny do trans-

formacji punktów na przestrzeń UMAP, na podstawie którego określono wagę poszczególnych cech radiomicznych metodą wartości SHAP. Do cech istotnie wpływających na osadzenie UMAP zaliczono cechy takie jak entropia przebiegu i długość mniejszej osi ROI. Cechy te pomagają odróżnić przypadki z rozedmą od przypadków bez rozedmy.

Ogólnie rzecz biorąc, metodologia zapewnia kompleksowe ramy do analizy POChP poprzez szczegółową ekstrakcję cech i wizualizację, oferując wgląd w heterogeniczny charakter postępu choroby.

Podsumowanie

Rozprawa doktorska bada potencjał nienadzorowanych metod wykrywania zmian o niskiej atenuacji na obrazach TK klatki piersiowej, w szczególności rozedmy płuc, przy użyciu bazy danych COPDGene. Badanie dotyczy wyzwań związanych z dokładnym określeniem zmian rozedmowych, które różnią się kształtem i rozmieszczeniem. Ze względu na brak ręcznie oznakowanych zbiorów danych do głębokiego uczenia, opracowano automatyczną metodę progowania w celu segmentacji zmian.

W celu zmniejszenia liczby obszarów fałszywie dodatnich przy segmentacji rozedmy płuc, stworzono metodę wykorzystującą dwie mapy prędkości w celu segmentacji dróg oddechowych cechujących się takimi samymi wartościami HU jak rozedma.

W badaniu zaproponowano algorytm oparty na mieszaninach Gaussa do automatycznej segmentacji zmian, który okazał się skuteczny w wykrywaniu małych zmian i dużych zmian rozedmowych. Pokazując trend łączący objętość zmian i spirometryczną klasyfikację GOLD.

Dodatkowo opracowano technikę opartą na metodzie osadzania UMAP w celu oceny relacji zmian rozedmowych i ich dopasowania do klasyfikacji GOLD. Podejście to wykazuje wyraźne różnice w podgrupach GOLD, demonstrując zależność utworzonych segmentacji ze stopniem zaawansowania choroby.

Badania pokazują siłę i zdolności nienadzorowanych klasycznych metod uczenia maszynowego. Wyniki mogą pomóc w diagnostyce różnicowej i analizie postępu choroby poprzez łatwą interpretację wyników, wspomaganą przez graficzną reprezentację danych.