

Podsumowanie rozprawy doktorskiej

Majid Kazemi Kozani

Tytuł: Rozpoznawanie zdarzeń i rekonstrukcja obrazu w kamerze Comptonowskiej w zastosowaniu do monitorowania terapii protonowej

Terapia hadronowa jest uznaną techniką leczenia nowotworów złośliwych opartą na elektromagnetycznym oddziaływaniu jonów z materią. W przeciwieństwie do konwencjonalnej radioterapii, naładowane cząstki, takie jak protony i ciężkie jony, podczas penetracji przez materię deponują maksimum energii (tzw. pik Bragga) na końcu swojej trajektorii. Ta właściwość pozwala na skuteczne niszczenie guza nowotworowego podczas leczenia. Większość energii jest deponowana w obszarze guza przy jednocześnie znacznie zmniejszonej dawce w otaczającej zdrowej tkance. Ta właściwość sprawiła, iż terapia hadronowa stała się lepszą opcją terapeutyczną w porównaniu z konwencjonalną radioterapią. Jednak ze względu na między- i wewnątrz-frakcyjne zmiany anatomiczne w ludzkim ciele, konieczne jest zróżnicowanie energii wiązki protonów i ciężkich jonów poprzez zastosowanie stosunkowo dużych marginesów bezpieczeństwa w planach leczenia. Dlatego rozwój monitoringu w czasie terapii hadronowej jest jednym z najważniejszych wyzwań, co może spowodować zmniejszenie marginesów bezpieczeństwa co prowadzi do skuteczniejszego leczenia. Ponieważ wszystkie protony pierwotne są zatrzymywane w tkance, jedynym sposobem kontrolowania depozytu dawki jest rejestracja cząstek wtórnych, takich jak promieniowanie gamma emitowanych natychmiastowo po zajściu reakcji jądrowych. Dobra korelacja pomiędzy emisją promieniowania gamma a zasięgiem padającej wiązki protonów sprawiła, że rejestracja promieniowania gamma stała się jedną z najbardziej obiecujących opcji monitorowania terapii hadronowej.

Celem projektu SiFi-CC jest opracowanie metody monitorowania online rozkładu dawki w terapii protonowej. Opracowywana metoda oparta jest na rejestracji promieniowania gamma emitowanego z tkanki pacjenta podczas napromieniania. W tym celu konstruowany jest prototyp kamery Comptonowskiej, zbudowanej z włókien scyntylicyjnych z ciężkich materiałów. W pracy użyto ustaloną wcześniej konstrukcję detektora oraz wykonane przy wykorzystaniu oprogramowania Geant4 zaawansowane symulacje Monte-Carlo odpowiedzi detektora.

Moja działalność, jako członka grupy badawczej SiFi-CC, była skoncentrowana na rozwoju platformy programistycznej do uczenia maszynowego i rekonstrukcji obrazu. Aby uzyskać szczegółowy wgląd w oczekiwaną odpowiedź detektora SiFi-CC, kluczowe jest wdrożenie takiego oprogramowania już w początkowej fazie.

Najważniejsza część mojej rozprawy poświęcona jest opracowanej platformie programistycznej do klasyfikacji pseudo-danych generowanych w symulacjach wykonanych przy wykorzystaniu oprogramowania Geant4. Symulacje odpowiedzi systemu detekcyjnego przeprowadzono dla punktowego skanowania wiązką protonów o energii 180 MeV padającą na fantom PMMA. Promieniowanie gamma emitowane ze wzbudzonych jąder oddziaływało z materiałem proponowanego detektora SiFi-CC dostarczając informacji o współrzędnych tego

oddziaływania oraz zdeponowanej energii. Do analizy otrzymanych pseudo-danych wykorzystano oprogramowanie do uczenia maszynowego oparte na zestawie narzędzi do wielowymiarowej analizy danych TMVA, opracowywanych w CERN. Biorąc pod uwagę prawdopodobieństwa różnych procesów oddziaływania promieniowania gamma w detektorze, kombinacje pozycji oddziaływania i zdeponowanych energii przypisuje się albo do rozpraszania Comptona, albo do tła. W pracy zbadano wydajność trzech różnych modeli uczenia maszynowego, w tym wzmocnionego drzewa decyzyjnego (BDT), wielowarstwowej sieci neuronowej perceptronu (MLP) i k-najbliższych sąsiadów (k-NN). Okazało się, że klasyfikator ze wzmocnionym drzewem decyzyjnym (BDT) wyróżnia się w separacji sygnału i tła w porównaniu z pozostałymi dwoma modelami. W związku z tym w fazie analizy klasyfikator BDT został wykorzystany do identyfikacji zdarzeń rozpraszania Comptona. Stabilność działania i niezawodność klasyfikatora wzmocnionego drzewa decyzyjnego (BDT) zbadano w fazie analizy przy użyciu dobrze znanych metryk oceny, takich jak przypomnienie, wydajność i czystość.

Kolejna część rozprawy dotyczy rekonstrukcji pozycyjnego profilu emisji promieniowania gamma, zawierającego informacje o rozkładzie dawki zdeponowanej w terapii protonowej. W tym celu przygotowano zostało oprogramowanie oparte na algorytmie maksymalnej wiarygodności w trybie List-Mode (LM-MLEM). Następnie algorytm LM-MLEM został wykorzystany do rekonstrukcji pozycji źródła gamma. Pozwoliło to określić maksymalną krawędź piku Bragga dla wiązki protonów zatrzymywanych w fantomie. Dzięki zastosowaniu uczenia maszynowego otrzymano bardzo dobrą selekcję zdarzeń rozpraszania Comptona w stosunku do zdarzeń stanowiących tło. Dzięki temu uzyskano bardzo dobrą zgodność pomiędzy położeniem zrekonstruowanej krawędzi dystalnej a położeniem tej krawędzi otrzymanej w symulacjach. Ostatecznie pokazano, że możliwe jest określenie położenia krawędzi dystalnej z rozdzielczością wynoszącą 3.5 mm FWHM. Wyniki pracy pokazują, że wykorzystanie prototypu SiFi-CC jest obiecującym podejściem do określenia położenia dystalnej krawędzi piku Bragga. Opracowane w pracy metody umożliwiają również optymalizację konfiguracji prototypu kamery Comptonowskiej, co może pozwolić na jeszcze lepsze określenie położenia dystalnej krawędzi piku Bragga. Ponadto opracowane oprogramowanie można zastosować również do rzeczywistych danych mierzonych przy użyciu detektora SiFi-CC. Powinno to pozwolić na dokładne monitorowanie terapii protonowej, co doprowadzi do ograniczenia skutków ubocznych.