



Wirtualna radioterapia – nowe narzędzie w procesie edukacji fizyków medycznych

Virtual radiotherapy – a new tool in education process of medical physicists

Krzysztof Buliński^{1, 2}, Tomasz Kuszewski^{1, 2}, Katarzyna Wnuk^{1, 2}, Piotr Kędzierawski^{2, 3},
Janusz Braziewicz^{1, 2}, Krzysztof Śłosarek^{3, 4}

¹ Instytut Fizyki, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, ul. Akademicka 7, 25-406 Kielce, tel. +48 606 820 118, e-mail: krzysztofbu@onkol.kielce.pl

² Świętokrzyskie Centrum Onkologii w Kielcach, ul. Prezydenta Stefana Artwińskiego 3, 25-734 Kielce

³ Collegium Medicum, Uniwersytet Jana Kochanowskiego, al. IX Wieków Kielc 19a, 25-516 Kielce

⁴ Narodowy Instytut Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie, Państwowy Instytut Badawczy, Oddział w Gliwicach, ul. Wybrzeże AK 15, 44-101 Gliwice

Wprowadzenie

Nie będzie nadużyciem stwierdzenie, że aparatura terapeutyczna stosowana w radioterapii powinna być wykorzystywana przede wszystkim do leczenia chorych. To prawda. Czy jednak za „wszelką cenę”? Oczywiście, że nie. Nie można stosować w leczeniu aparatury [1], która nie została zweryfikowana przez osoby do

tęgo upoważnione, w tym przypadku przez fizyków medycznych. Z praktyki zawodowej wiemy, że pojawia się nieustanny „konflikt”: leczyć chorych czy sprawdzać działanie akceleratora, weryfikować plan leczenia. Jest to „konflikt wirtualny”, ponieważ prawo w tym zakresie jest jednoznaczne i nie daje nam możliwości interpretacji. Aparat terapeutyczny musi być dopuszczony do pracy klinicznej przez osoby upoważnione, a plan leczenia

154

Streszczenie

Fizyk medyczny to zawód, który wymaga umiejętności zastosowania metod fizyki w medycynie. Jeżeli dziedziną medycyny jest radioterapia, wówczas należy nauczyć się wykorzystania metod pomiarowych promieniowania jonizującego (dozymetria kliniczna) oraz informatyki (systemy planowania leczenia) w praktyce klinicznej. W procesie dydaktycznym wymagane jest wykorzystanie sprzętu medycznego, który jest w codziennym użytku. Pojawia się konflikt (pozorny), czy aparatura medyczna ma być wykorzystywana do celów edukacyjnych, czy też leczenia chorych. W okresie, kiedy informatyka i związana z nią technologia bardzo dynamicznie się rozwijają, kwestią czasu było pojawienie się wirtualnych akceleratorów, symulatorów. Rozwiązanie to bardzo ułatwia, z punktu widzenia organizacji pracy, proces szkolenia nie tylko fizyków medycznych, ale również lekarzy oraz elektroradiologów obsługujących aparaty terapeutyczne w radioterapii.

Słowa kluczowe: akcelerator, fantom pomiarowy, system planowania leczenia, wirtualna radioterapia

Summary

Medical physicist is a profession that requires the ability to apply physics methods in medicine. If the field of medicine is radiotherapy, then you should learn how to use radiation measurement methods (clinical dosimetry) and computer science (treatment planning systems) in clinical practice. The teaching process requires the use of medical equipment that is in use daily. There is a conflict (an apparent one) whether medical equipment is to be used for educational purposes or for treating patients. In the period when IT and related technology is developing very dynamically, it was just the matter of time when virtual accelerators, simulators appear. In such virtual reality we can use these programs to move virtual accelerator's gantry, collimator... This solution greatly facilitates, from the point of view of work organization, the training process not only of medical physicists, but also doctors and technicians in radiotherapy.

Key words: accelerator, measurement phantom, treatment planning system, virtual radiotherapy

otrzymano / received:

15.06.2020

poprawiono / corrected:

23.06.2020

zaakceptowano / accepted:

26.06.2020



w technikach dynamicznych powinien być sprawdzony przed rozpoczęciem leczenia [2]. Aby aparat terapeutyczny pracował poprawnie, a cały proces leczenia chorego był wykonany zgodnie z założeniami terapeutycznymi, konieczna jest wysoka i specjalistyczna wiedza lekarzy, fizyków medycznych czy elektroradiologów, którą można uzyskać w czasie procesu szkolenia, treningu z wykorzystaniem aparatury stosowanej w praktyce [3, 4]. Wracając do „konfliktu interesów”: leczyć chorych czy wykonywać pomiary mocy dawek, rozkładów dawek, czy też szkolić studentów. Z punktu widzenia organizacji pracy rzeczywiście może to być problem. O ile sprawa jest jednoznaczna w przypadku awarii aparatu, który musi (wymogi prawa) być sprawdzony przed ponownym uruchomieniem, to zatrzymanie pracy aparatu w celach edukacyjnych jest już wątpliwe. Nie wspominamy już o sytuacji, kiedy akcelerator w czasie zajęć dla studentów ulegnie awarii i nie może być wykorzystany do leczenia chorych. Drugi aspekt szkolenia fizyków medycznych to planowanie leczenia [5]. Ćwiczenia takie można przeprowadzić po godzinach pracy, ale na bazach danych, w których zgromadzone są dane dotyczące leczonych chorych. Przypadkowa ingerencja w plan leczenia chorego może mieć bardzo poważne konsekwencje. Prowadząc zajęcia edukacyjne w ośrodku klinicznym, nie jest możliwe przeprowadzenie jeszcze jednego bardzo ważnego procesu – konfiguracji systemów planowania leczenia [6]. Trudności w dostępie do aparatury medycznej spowodowały, że pojawiły się rozwiązania, które dała nam informatyka – wirtualizację procesu leczenia i planowania radioterapii oraz dozymetrii klinicznej [7, 8, 9]. Wykorzystując rozwiązania wirtualnej rzeczywistości, można przeprowadzić dowolne ćwiczenia i symulacje związane z dozymetrią kliniczną, jak i planowaniem rozkładu dawki w radioterapii, nie zajmując aparatury, która może być używana do leczenia chorych [9, 11, 12].

Etapy radioterapii

Radioterapia to dziedzina medycyny najbardziej (?) uzależniona od osób, które nie ukończyły studiów medycznych. Pracowników, którzy wykorzystują metody niemedyczne w leczeniu chorych. Zanim chory rozpocznie proces leczenia (napromieniania) musi przejść przez kilka etapów związanych z jego przygotowaniem do terapii. Zakładamy, że pacjent, który został zakwalifikowany do leczenia promieniowaniem jonizującym (radioterapia), ma już postawioną diagnozę. Lekarz wie, jaki to jest nowotwór, gdzie jest zlokalizowany, jaki jest przewidziany protokół leczenia. Podjęta jest już decyzja o sposobie leczenia, czy jest to samodzielna radioterapia, czy jest to leczenie skojarzone (chemioterapia, chirurgia...). To ważne, ponieważ decyzja ta, uzależnia konsekwencje czasowe prowadzonych etapów leczenia. Pierwszą procedurą przygotowania chorego do radioterapii jest wykonanie systemu unieruchomienia [13]. To ważny etap, często bagatelizowany, a niestety. Dlaczego? Ponieważ stałe ułożenie chorego w czasie seansu terapeutycznego jest gwarancją, że dawka będzie podana w sposób powtarzalny, oczywiście zakładamy, że zgodnie z przygotowanym planem leczenia.

Radioterapia trwa zazwyczaj kilka tygodni (z wyłączeniem radiochirurgii), a seans terapeutyczny trwa kilkanaście minut, dlatego też system unieruchomienia chorego powinien być dla niego wygodny. Pacjent nie może być w pozycji uciążliwej, stwarzającej ból. Powinna ona być pozycją naturalną, aby przez cały proces leczenia była ona odtwarzalna. Drugi etap to badania obrazowe w pozycji terapeutycznej, czyli z systemem unieruchomienia. Badania obrazowe dedykowane do planowania radioterapii to przede wszystkim tomografia komputerowa. Badanie niezbędne w wyliczaniu rozkładu dawki dostarcza bowiem informacji o gęstości tkanek, narządów anatomicznych. Pozostałe badania, tj. rezonans magnetyczny czy pozytonowa tomografia emisyjna, są wykonywane w zależności od wymagań związanych ze zdefiniowaniem objętości do napromieniania. Oczywiście można i należy wykorzystać diagnostyczne badania obrazowe, jednak nie są one podstawą planowania rozkładu dawki ze względu na ułożenie chorego, zazwyczaj niezgodne z ułożeniem „terapeutycznym”. Drugim ważnym powodem, w przypadku badania tomografią komputerową, jest (najczęściej) brak kalibracji tomografu komputerowego, określenie zależności HU od gęstości. Transfer wszystkich badań obrazowych do systemu planowania leczenia to kolejna procedura przygotowania chorego do radioterapii. W systemie planowania leczenia wykonuje się fuzję badań, również diagnostycznych i przygotowanie konturów narządów anatomicznych (narządów krytycznych) oraz objętości do napromieniania (GTV, CTV, PTV) [14]. W tym miejscu należy przypomnieć, że analizę statystyczną dawki można wykonać tylko w tych strukturach, które zostały „okonturowane”. Tylko objętości „okonturowane” mogą być włączone w proces optymalizacji wyliczania rozkładu dawki. Kolejnym etapem jest wybór techniki i geometrii wiązek, zdefiniowanie objętości, w której będzie wyliczona dawka terapeutyczna. Etapem kończącym komputerowe planowanie leczenia to zaakceptowanie przez lekarza rozkładu dawki. Tak przygotowany rozkład dawki musi być sprawdzony przez drugiego fizyka medycznego. Jeżeli techniką leczenia jest IMRT/VMAT, konieczne jest przygotowanie planu weryfikującego obliczone rozkłady dawek [15, 16]. Przed rozpoczęciem leczenia pacjenta plan powinien zostać zweryfikowany dozymetrycznie [17]. Eksport wszystkich parametrów leczenia (liczby jednostek monitorowych, geometrii wiązek, ...) do bazy danych aparatu terapeutycznego kończy etap przygotowania chorego do radioterapii. Oczywiście należy dodać, że część pacjentów ma wykonaną symulację warunków napromieniania, chociaż coraz częściej jest ona zastąpiona przez wirtualną symulację [18]. W uzasadnionych przypadkach symulacja wykonywana jest na aparacie terapeutycznym, przed pierwszą frakcją promieniowania. Studenci fizyki medycznej, elektroradiologii powinni zapoznać się ze wszystkimi procedurami przygotowania chorego do radioterapii. Dla fizyków medycznych komputerowe wyliczanie rozkładu dawki jest etapem, który należy bardzo starannie przećwiczyć. W szczególności przeprowadzić symulację błędów, nie tylko na etapie obliczeń rozkładów dawek, ale również na etapie konfiguracji modelu obliczeniowego.



Rola fizyka medycznego – edukacja

Praca fizyka medycznego rozpoczyna się w chwili zainstalowania aparatu terapeutycznego (pomijamy testy akceptacyjne). A kończy – ?? W praktyce – zawsze jesteśmy potrzebni, również wtedy, kiedy pacjent poddany jest napromienianiu. Naszą pracą można podzielić na związaną z pomiarami dawek i obliczaniem rozkładu dawek. Po zakończeniu instalacji aparatu fizycy wspólnie z inżynierami serwisu wykonują pomiary i sprawdzają parametry pracy rekomendowane przez producenta [1, 2]. Ten etap ma potwierdzić, że zainstalowany aparat spełnia wymagania zdefiniowane w umowach zakupu. To bardzo istotny moment, ponieważ zmierzone parametry są referencyjne dla przyszłych pomiarów. Po odbiorze aparatu terapeutycznego (testy akceptacyjne zostały przeprowadzone) należy wykonać szereg pomiarów wymaganych przez producenta systemu planowania leczenia. Precyzja wykonania tych pomiarów rzutuje na modelowanie wiązek promieniowania. Od dokładności wykonanych pomiarów zależy zgodność pomiędzy obliczonym a zmierzonym rozkładem dawek. Oczywiście pomijamy tutaj rodzaj algorytmu obliczeniowego, który ma wpływ na te różnice, ale na precyzję obliczeń związanych z wprowadzonymi danymi fizycy wykonujący pomiary mają bardzo znaczący wpływ. Zazwyczaj na ćwiczeniach prowadzący zwracają szczególną uwagę na kilka aspektów, które mają wpływ na dokładność otrzymanych wyników, np. ustawienia wodnego analizatora pola, położenie komory jonizacyjnej... Robimy to dlatego, że pomiary dozymetryczne są bardzo czasochłonne i powtarzanie ich jest ze względu na dostępność akceleratora – niemożliwe. W praktyce szpitalnej zbiór tak zmierzonych wielkości jest eksportowany do systemu planowania leczenia. Na tej podstawie przygotowuje się model obliczeniowy, który jest walidowany przed rozpoczęciem klinicznego stosowania oprogramowania [13]. Oczywiście w czasie ćwiczeń laboratoryjnych wprowadzanie danych do systemu planowania leczenia, używanego w praktyce klinicznej, jest niemożliwe. Byłyby to działania bardzo niebezpieczne, ponieważ rozkłady dawek planowane są dla leczonych pacjentów. Studenci zatem nie mają możliwości oceny wpływu wykonanych pomiarów na różnice pomiędzy wyliczonymi i zmierzonymi rozkładami dawek. Najczęściej po raz pierwszy wykonują je w swoim miejscu pracy. Dobrze, jeżeli tę czynność wykonują pod nadzorem starszego, bardziej doświadczonego fizyka medycznego. Zdarzają się jednak takie sytuacje, kiedy pozbawieni są tej możliwości i muszą sami zmierzyć się z rzeczywistością. Ten proces wprowadzania danych pomiarowych do systemu planowania leczenia jest bardzo ważny. Pomyłka na tym etapie skutkuje tym, że wszyscy pacjenci leczeni na podstawie tak przygotowanego modelu będą leczeni błędnie. W czasie ćwiczeń związanych z komputerowym planowaniem rozkładu dawki, zwracamy również uwagę na kilka ważnych aspektów, np. wpływ sposobu normalizacji na dawkę, ale możliwość oceny wpływu błędu (intencjonalnie wygenerowanego) na leczenie chorego jest niemożliwa. Niemożliwa jest również ocena

dozymetrii portalowej, która została wykonana na błędnych założeniach, ponieważ pomiar mapy fluencji jest wykonany na podstawie obliczeń, w tym przypadku błędnych. Oznacza to, że dozymetria portalowa najprawdopodobniej potwierdzi dobrą zgodność z błędnymi obliczeniami.

Ćwiczenia dla studentów powinny być prowadzone na systemach planowania leczenia, które nie są w użytku klinicznym. Tylko wówczas można pozwolić sobie na symulację błędów na różnym poziomie planowania leczenia. Niestety, żadna uczelnia w naszym kraju nie dysponuje akceleratorami, które dedykowane są tylko do celów edukacyjnych. Co zatem pozostaje, aby można było nie tylko wykonać poprawnie pomiary, wprowadzić je do systemu planowania leczenia, przygotować model obliczeniowy i napromienić chorego? Wydaje się, że dobrym rozwiązaniem jest wirtualizacja radioterapii [19, 20, 21]. Pozwala ona bowiem na symulację błędów i ocenę jej wpływu na proces leczenia.

Wirtualne szkolenia

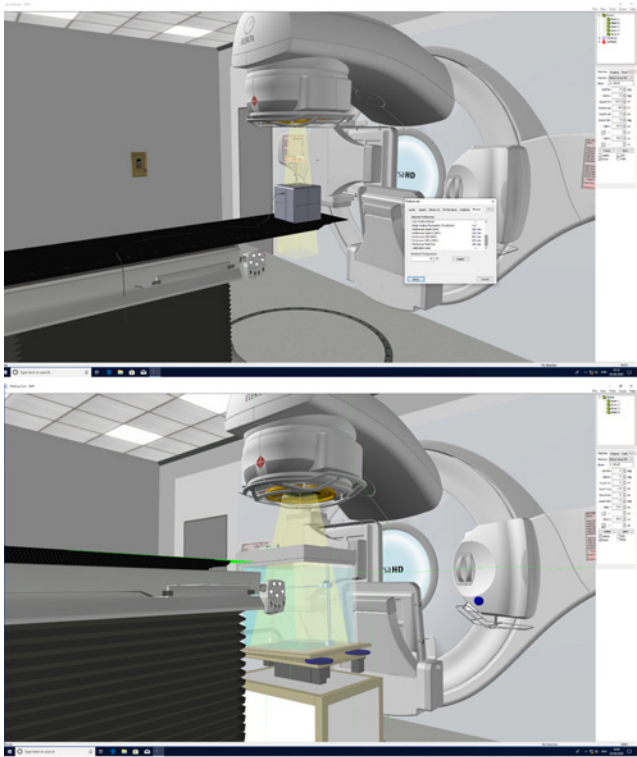
Laboratorium „Wirtualna Radioterapia” – to nazwa pierwszego w Polsce oprogramowania zainstalowanego w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Jana Kochanowskiego w Kielcach [7].

Składa się ono z trzech elementów: symulatora VERT i dwóch pracowni planowania leczenia, tj. RayStation oraz ProSoma. Oprogramowanie VERT to w pełni wirtualna radioterapia [22, 23]. Pozwala ono na symulację 3D stosowanych w radioterapii aparatów do napromieniania zewnętrznymi wiązkami promieniowania jonizującego: fotonowego, elektronowego i protonów. Mogą być one wirtualnie generowane przez akceleratory firmy Varian Medical Systems, Elekta, Accuray oraz innych producentów. Można wizualizować fantomy pomiarowe (Rys. 1), w których zostaną wykonane pomiary: dawek czy też rozkładów dawek.

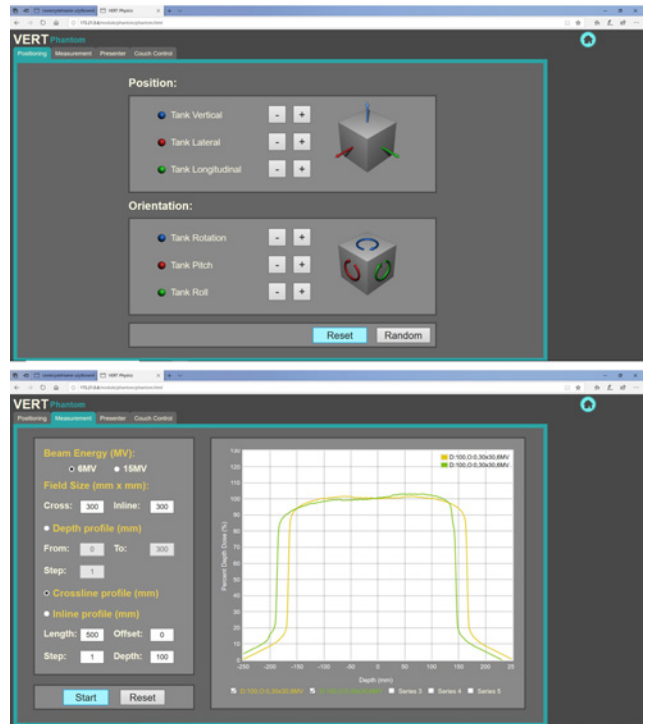
Oprogramowanie umożliwia symulację błędów, np. nieprecyzyjne ustawienie fantomu pomiarowego sprzętowych lub błędnego ułożenia pacjenta w trakcie teleradioterapii wraz z wizualizacją ich konsekwencji (Rys. 2).

Oprogramowanie umożliwia ocenę wpływu wykonanych pomiarów dozymetrycznych na modelowanie wiązek terapeutycznych. W systemach planowania leczenia, stosowanych w praktyce klinicznej, mamy możliwość trójwymiarowej prezentacji narządów anatomicznych. Nie jest to opcja zarezerwowana dla wybranych sytuacji, ale możliwość wizualizacji 3D pacjenta, struktur anatomicznych na stole aparatu terapeutycznego na tle całego aparatu wraz z geometrią pomieszczenia – to już opcja zarezerwowana dla omawianego oprogramowania VERT.

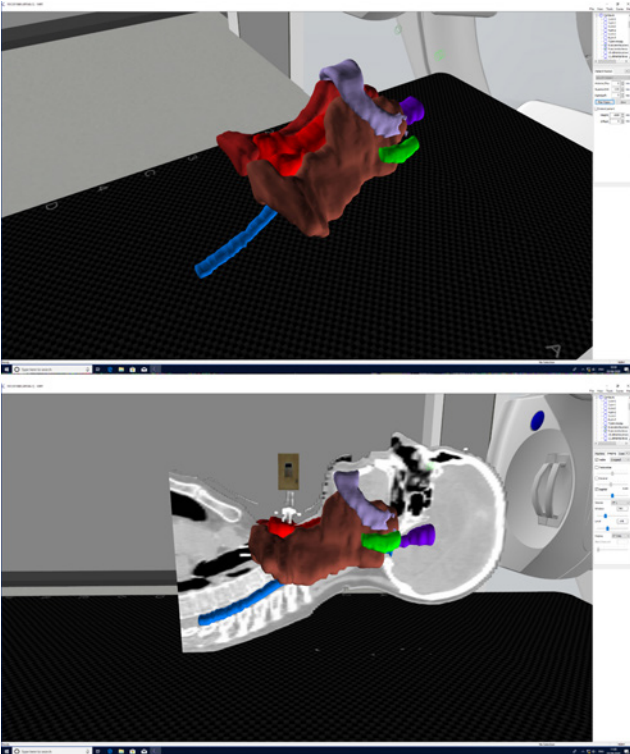
Trójwymiarowa prezentacja budowy anatomicznej ciała pacjenta (Rys. 3), rozkład dawki w ciele pacjenta (Rys. 4) dla dowolnego planu napromieniania, efekty błędnej i prawidłowo zrealizowanej teleradioterapii – to narzędzie przydatne w procesie uczenia nie tylko fizyków medycznych, ale również lekarzy i elektroradiologów.



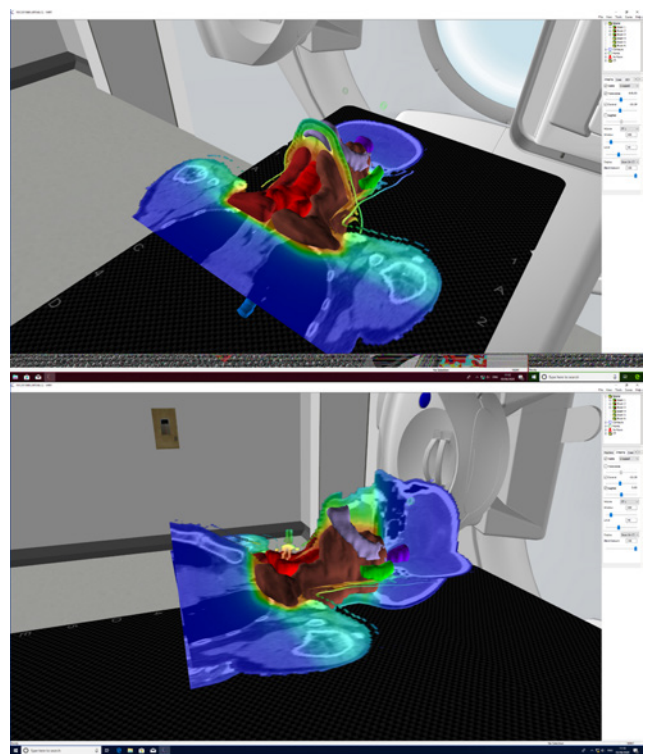
Rys. 1 Oprogramowanie VERT umożliwia wybór fantomu wodnego (analyzera pola) lub statego w celu pomiaru dawki lub jej rozkładu
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 2 Precyzja ustawienia fantomu pomiarowego, np. analizatora pola, ma wpływ na wartości pomiarowe. Ukośne ustawienie fantomu może spowodować, że zmierzona funkcja profilu nie będzie symetryczna. Może to prowadzić do błędnej interpretacji wyników i w konsekwencji do błędnej regulacji pracy akceleratora
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 3 Trójwymiarowa prezentacja narządów anatomicznych znacznie ułatwia ocenę wzajemnego ich położenia. Daje to możliwość oceny, czy wymagania terapeutyczne związane z rozkładem dawki mogą być zrealizowane. Ułatwia także wybór techniki napromieniania
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 4 Prezentacja rozkładu dawki 3D w ciele pacjenta to dobra metoda, aby ocenić, czy dawki terapeutyczne są „zlokalizowane” w objętościach leczonych, jakie są dawki w narządach krytycznych i czy ich ruchomość może wpływać na zmianę wartości dawek
Źródło: Opracowanie własne.



Podłączone piloty sterowania pracą akceleratora pozwalają na oswojenie się przyszłego personelu obsługującego tego typu urządzenia bez obawy o uszkodzenie sprzętu (Rys. 5). W ten sposób można symulować wszystkie ruchy akceleratora, ucząc się jednocześnie, jak unikać sytuacji kolizyjnych.



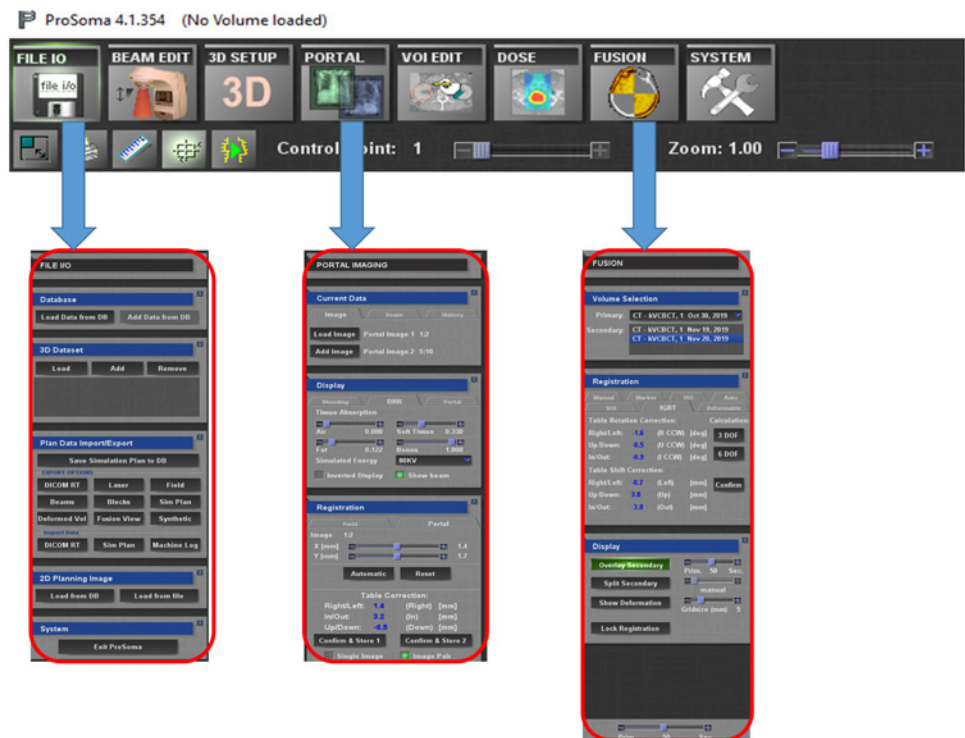
Rys. 5 Dużą zaletą oprogramowania jest możliwość podłączenia rzeczywistych, nie wirtualnych kaset sterujących pracą akceleratora. Pozwala to oswoić się studentom z obsługą aparatów terapeutycznych, w sposób istotny zmniejsza prawdopodobieństwo uszkodzenia akceleratora, pozwala na wyrobienie nawyków, które są przydatne w pracy z pacjentem
Źródło: Opracowanie własne.

W pracowni zainstalowano również dwa niezależne systemy planowania leczenia: RayStation oraz Prosoma, które dedykowane są tylko do celów szkoleniowych.

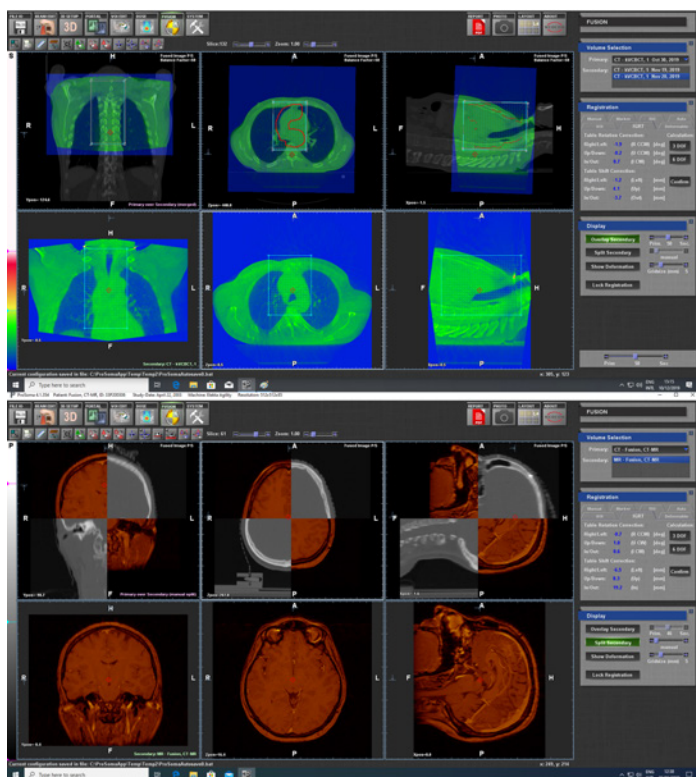
Pierwszy system planowania leczenia firmy RayStation – znany jest fizykom medycznym. Jest to oprogramowanie, które ma wiele opcji związanych z planowaniem leczenia. Wykorzystuje też najnowsze algorytmy dedykowane do planowania leczenia, nie wyłączając metody Monte Carlo czy optymalizacji obliczeń. W pracowni zainstalowano cztery stacje robocze, które mają pełną opcję oprogramowania dedykowanego do wyliczenia rozkładu dawki, z bazami danych, do których można zaimportować rzeczywistych pacjentów. Nie mogą być one stosowane do użytku klinicznego i to jest bardzo duża zaleta. Można bowiem wprowadzać różne zmiany, w tym w algorytmach obliczeniowych i oceniać ich wpływ na zmianę rozkładu dawki. Pod względem funkcjonalnym system planowania leczenia RayStation umożliwia wykonywanie planu

leczenia w dowolnej technice napromieniania dla wszystkich dostępnych komercyjnie akceleratorów różnych producentów, w tym tomoterapii. Umożliwia „adaptacyjne” planowanie leczenia, czyli śledzenie zmian rozkładu dawki w ciele pacjenta w funkcji czasu leczenia, symulacje rozkładów biologicznych zmian funkcji TCP/NTCP, EDU i BED dla każdego pacjenta wraz ze zmianą frakcjonowania. Deformacyjne nałożenie obrazów różnych modalności (TK, MR, PET) pozwala odtwarzać przebieg zmian w ciele pacjenta.

Oprogramowanie ProSoma firmy MEDCOM z dziesięcioma stacjami roboczymi, na których można wyliczyć rozkłady dawek dla komercyjnie dostępnych akceleratorów, oczywiście po wprowadzeniu danych dozymetrycznych niezbędnych do wykonania obliczeń. Ale nie tylko. Jak przystało na oprogramowanie dedykowane do celów dydaktycznych, jest ono tak przygotowane, że „prowadzi” studenta za rękę. Znajdujemy w nim wszystkie etapy, które związane są z przygotowaniem chorego do radioterapii (Rys. 6). Na każdym etapie można wybrać różne warunki związane z planowaniem rozkładu dawki (np. normalizację) i ocenić ich wpływ na obliczenia. Symulacja przesunięcia pacjenta czy też nieprawidłowa fuza obrazów pozwala nam na ocenę wpływu tych parametrów na precyzję leczenia. Program jest intuicyjny, a każdy z modułów jest bardzo dobrze opisany (Rys. 8). Pozwala na wybór różnych wartości i co ważne – nie jest to oprogramowanie, które może być używane klinicznie, ale takie, które przedstawia wszystkie aspekty planowania radioterapii.



Rys. 6 W programie ProSoma zdefiniowane są podstawowe etapy planowania leczenia. Import z bazy danych badań obrazowych (File IO), zdefiniowanie geometrii wiązek promieniowania i wykonanie obliczeń (Beam Edit). Prezentacja trójwymiarowa (3D Setup), porównanie zdjęć portalo- wych (Portal), edycja wybranych objętości (VOI Edit) i ocena rozkładu dawki (Dose) oraz fuza różnych modalności i badań obrazowych (Fusion). Każda z opcji ma bardzo rozbudowane menu, które umożliwia zmianę wielu parametrów
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 7 Moduł Fusion pozwala na wykonanie nałożenia kilku modalności obrazowania, z wykorzystaniem opcji fuzji deformacyjnej. Jest to bardzo przydatne narzędzie w praktyce klinicznej, ponieważ coraz częściej napromieniani są chorzy po przebytej już radioterapii. Wówczas należy nałożyć na siebie dwa różne badania obrazowe. Niezbędne są wtedy narzędzia stosowane w fuzji deformacyjnej
Źródło: Opracowanie własne.

Podsumowanie

Kompleksowe laboratorium szkoleniowo-edukacyjne wyposażone w nowoczesny symulator terapii radiacyjnej VERT współpracujący z systemami planowania leczenia RayStation i ProSoma przeznaczony jest do szkolenia różnych grup zawodowych: lekarzy, fizyków i elektroradiologów, zaangażowanych w proces planowania i leczenia z wykorzystaniem promieniowania jonizującego.

Pozwala na szkolenie lekarzy związane z symulacją warunków napromieniania, rozkładów dawek w pacjencie. Możliwa jest także prezentacja technik napromieniania, ocena wpływu precyzji pozycjonowania chorego na rozkłady dawek. Technicy elektroradiologii mogą zobaczyć i ocenić wpływ procesu pozycjonowania pacjenta na rozkład dawki w ciele pacjenta. Mogą zobaczyć trójwymiarowe położenie narządów anatomicznych wraz z rozkładem dawki. Mogą również nauczyć się obsługi akceleratora w warunkach nieklinicznych. Mogą nawet symulować błędne ustawienia ramienia czy też kolimatora akceleratora bez groźby jego uszkodzenia. Wreszcie fizycy medyczni mogą wykonywać pomiary dozymetryczne oraz symulować błędy wynikające z nieprecyzyjnej pracy i zobaczyć (obliczyć), jaki jest ich wpływ na rozkłady dawek. Mogą również wykonać symulację wpływu błędów na wartości radiobiologiczne, czyli wyniki leczenia.

To wszystko w warunkach nieklinicznych, bez konieczności „blokowania” aparatu terapeutycznego. Możliwość

powtarzania pomiarów, oczywiście wirtualnych, symulacje rzeczywistych warunków leczenia, obsługa urządzeń terapeutycznych – to niewątpliwe zalety tego typu oprogramowania i wirtualnej radioterapii. Na zakończenie warto wspomnieć, że rozwiązanie to może być dedykowane do uczenia studentów fizyki medycznej, jak i doskonalenia umiejętności w czasie specjalizacji z dziedziny fizyka medyczna.

Laboratorium zostało sfinansowane w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Świętokrzyskiego na lata 2014-2020 w projekcie MEDPAT finansowanym przez Unię Europejską.

Literatura

1. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, z dnia 20 września 2020, poz. 1792, Obwieszczenie Marszałka Sejmu Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 11 września 2019 w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu ustawy – Prawo atomowe.
2. Dziennik Ustaw Rzeczypospolitej Polskiej, z dnia 5 maja 2017, poz. 884, Obwieszczenie Ministra Zdrowia w sprawie warunków bezpiecznego stosowania promieniowania jonizującego dla wszystkich rodzajów ekspozycji medycznej.
3. T. Canil, A. Cashell, J. Papadakos, N. Abdelmutti, A. Jusko Friedman: *Evaluation of the Effects of Pre-Treatment Education on Self-Efficacy and Anxiety in Patients Receiving Radiation Therapy: A Pilot Study*, Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences, 43(4), 2012, 221-227, doi.org/10.1016/j.jmir.2012.05.002.
4. Y.A. Jimenez, D.I. Thwaites, P. Juneja, S.J. Lewis: *Interprofessional education: evaluation of a radiation therapy and medical physics student simulation workshop*, J. Med. Radiat. Sci., 65(2), 2018, 106-113, doi: 10.1002/jmrs.256. Epub 2018 Jan 23.
5. Centrum Medycznego Kształcenia Podyplomowego, Program Specjalizacji w dziedzinie FIZYKI MEDYCZNEJ, 21 marca 2019.
6. A. Leong, P. Herst, P. Kane: *VERT, a virtual clinical environment, enhances understanding of radiation therapy planning concepts*, J. Med. Radiat. Sci., 65(2), 2018, 97-105, doi: 10.1002/jmrs.272. Epub 2018 Mar 8.
7. J. Braziewicz: *Wirtualny symulator terapii radiacyjnej*, XV Kongres Polskiego Towarzystwa Fizyki Medycznej, Gliwice 2019.
8. P. Bridge, R.M. Appleyard, J.W. Ward, R. Phillips, A.W. Beavis: *The development and evaluation of a virtual radiotherapy treatment machine using an immersive visualisation environment*, Computers & Education, 49(2), 2007, 481-449, doi.org/10.1016/j.compedu.2005.10.006.
9. R. Anderson, M. Lamey, M. MacPherson, M. Carlone: *Simulation of a medical linear accelerator for teaching purposes*, J. Appl. Clin. Med. Phys., 16(3), 2015, 5139, doi: 10.1120/jacmp.v16i3.5139.
10. R. Phillips, J.W. Ward, A.W. Beavis: *Immersive visualization training of radiotherapy treatment*, Stud. Health Technol. Inform., 111, 2005, 390-396.
11. J.I. Prisciandaro: *Review of online educational resources for medical physicists*, J. Appl. Clin. Med. Phys., 14(6), 2013, 4476, doi: 10.1120/jacmp.v14i6.4476.
12. Y.A. Jimenez, S.J. Lewis: *Radiation Therapy Patient Education Review and a Case Study Using the Virtual Environment for Radiotherapy Training System*, J. Med. Imaging. Radiat. Sci., 49(1), 2018, 106-117, doi: 10.1016/j.jmir.2017.07.005. Epub 2017 Sep 13.
13. J. Malicki, K. Ślosarek: *Planowanie leczenia i dozymetria w radioterapii*, T2, Via Medica, 2018.
14. J. Winięcki, Z. Żurawski, B. Drzewiecka, K. Ślosarek: *Anatomy-corresponding method of IMRT verification*, 16(1), Rep. of Prac. Oncol. Radio., 2011, 1-9, doi.org/10.1016/j.rpor.2010.11.001.
15. K. Ślosarek: *Weryfikacja realizacji technik dynamicznych w radioterapii*, Inżynier i Fizyk Medyczny, 5, 2013, 243-250.
16. A. Klimas, A. Grządziel, D. Plaza, B. Bekman, Ł. Dolla, W. Osewski, P. Paściak, J. Wendykier, K. Ślosarek: *EPID-a useful interfraction QC tool*, PJMPE, 25(4), 2019, 221-228, https://doi.org/10.2478/pjmpe-2019-0029.
17. A. Grządziel, B. Bekman, J. Winięcki, K. Ślosarek: *Przegląd metod weryfikacji konformalnych planów radioterapeutycznych*, Inżynier i Fizyk Medyczny, 492, 2015, 99-105.
18. K. Ślosarek: *Wirtualna symulacja – nowy element procesu planowania radioterapii*, Inżynier i Fizyk Medyczny, 4(3), 2014, 169-174.
19. M. Srikanan, S.A. Pillai, K. Muir, D. Parr, E. Eadie: *The use of virtual reality (VR) technology to improve radiotherapy information for patients with breast cancer*, Radiography, 26 (SUPPLEMENT 1), 200, S34, doi.org/10.1016/j.radi.2019.11.086.
20. R. Phillips, J.W. Ward, L. Page, C. Grau, A. Bojen, J. Hall, K. Nielsen, V. Nordentoft, A.W. Beavis: *Virtual Reality Training for Radiotherapy Becomes a Reality*, Stud. Health Technol. Inform., 71(132), 2008, 366-371.
21. A. Bojen, C. Grau: *Virtual reality in radiation therapy training*, Surg. Oncol., 20(3), 2011, 185-188, doi: 10.1016/j.suronc.2010.07.004. Epub 2010 Aug 17.
22. Y.A. Jimenez, C.R. Hansen, P. Juneja, D.I. Thwaites: *Successful Implementation of Virtual Environment for Radiotherapy Training (VERT) in Medical Physics education: The University of Sydney's initial experience and recommendations*, Australas Phys. Eng. Sci. Med., 40(4), 2017, 909-916, doi: 10.1007/s13246-017-0592-9. Epub 2017 Oct 13.
23. P. Kane: *Simulation-based education: A narrative review of the use of VERT in radiation therapy education*, J. Med. Radiat. Sci., 65(2), 2018, 131-136, doi: 10.1002/jmrs.276. Epub 2018 Apr 14.