

Tamara Petrun, Tanja Žnidarič, Dejan Dinevski

Vloga umetne inteligence v radioterapiji pri risanju tarčnih volumnov in volumnov rizičnih organov

Povzetek. Umetna inteligenca (UI) in strojno učenje se lahko uporabljata na različnih področjih medicine. V radioterapiji ima umetna inteligenca velik potencial uporabe, saj omogoča optimizacijo in avtomatizacijo delovnih procesov. Z UI se lahko doseže večjo ponovljivost rezultatov ter boljše predvidevanje morebitnih stranskih učinkov, nastalih zaradi obsevanja, in s tem izboljša kakovost bolnikovega življenja. Hkrati se zmanjša časovni okvir risanja rizičnih organov in tarčnih volumnov ter poenostavi načrtovanje. Uporabo UI poleg pomanjkanja znanja o UI omejujejo visoki stroški načrtovalnih sistemov, ki delajo na podlagi algoritmov, povezanih z UI.

Ključne besede: umetna inteligenca; strojno učenje; radiologija in onkologija; delovni procesi.

The role of Artificial Intelligence in Delineation of Target Volumes and Organs at Risk in Radiotherapy

Abstract. Artificial intelligence (AI) and machine learning can be used in various fields of medicine. In radiotherapy, artificial intelligence has a high usage potential because it enables optimisation and automation of the work processes. Using AI, better repeatability of the results and better prediction of possible side effects caused by radiation treatment can be achieved, thus improving quality of life of the patient. At the same time, the required time-frame for assessment of organs at risk and target volumes can be reduced, which simplifies planning. Widespread use of AI is limited by the lack of knowledge about AI and the high cost of planning systems that implement algorithms based on AI.

Key words: artificial intelligence; machine learning; radiology and oncology; work processes.

■ **Infor Med Slov** 2021; 26(1-2): 14-20

Instituciji avtorjev / Authors' institutions: Onkološki oddelek, Univerzitetni klinični center Maribor, Maribor (TP, TŽ); Medicinska fakulteta Maribor, Univerza v Mariboru, Maribor (DD).

Kontaktna oseba / Contact person: Tamara Petrun, UKC Maribor, Ljubljanska ulica 5, 2000 Maribor, Slovenija. E-pošta / E-mail: tamara.petrun@ukc-mb.si.

Prispelo / Received: 10. 11. 2021. Sprejeto / Accepted: 10. 12. 2021.

Uvod

Radioterapija je področje medicine, ki doživlja izjemno hiter tehnološki razvoj. Poleg systemskega zdravljenja in kirurgije predstavlja enega od treh temeljnih načinov onkološkega zdravljenja. Poznamo zunanje in notranje obsevanje. V nadaljevanju se bomo osredotočili na zunanje obsevanje. Obsevamo z različnimi tehnikami (3D konformno obsevanje, volumetrična ločna terapija – VMAT, intenzitetno modulirano obsevanje – IMRT, stereotaktično obsevanje – SRT idr.). Pri tem uporabljamo ionizirajoče žarke (fotoni, elektroni, protoni, težki ioni) z namenom uničenja tumorskih celic.

Radioterapija je postala izjemno kompleksna veja medicine zaradi tehnološkega napredka v zadnjih desetletjih, kar zahteva popolno integracijo med človekom (uporabnikom) in strojno ter programsko opremo. Kljub tehnološkemu napredku večji del delovnega procesa še vedno zahteva dolgotrajen ročni vnos podatkov s strani multidisciplinarnih radioterapevtskih ekip, ki jo sestavljajo zdravnik specialist onkologije z radioterapijo, medicinski fizik, medicinski dozimetrist in radiološki inženir. Povečana zapletenost interakcij človek-stroj, ki je posledica tehnološkega napredka in povečanje incidence onkoloških bolnikov, je privedla do pomanjkanja delovne sile in naraščajoče spremenljivosti v kakovosti zdravljenja.¹

Potek dela zdravnika onkologa radioterapevta

Bolnik, ki je predviden za zdravljenje onkološke bolezni z obsevanjem, je povabljen na pregled v ambulanto onkologa radioterapevta. Med pogovorom mu je pojasnjen namen, potek in možni neželeni učinki obsevanja. Zdravljenje z obsevanjem sestavljajo:

- priprava na obsevanje – imenujemo jo tudi simulacija obsevanja (računalniška tomografija telesa v obsevalnem položaju),
- načrtovanje obsevanja (vrisovanje tarčnih volumnov in rizičnih organov, predpis doze in omejitev na rizične organe ter planiranje obsevalnega plana) ter
- obsevanje.

Vsi koraki pri izvedbi obsevanja so pomembni (kot je prikazano na sliki 1). V procesu načrtovanja obsevanja

obstaja največ prostora za optimizacijo in izboljšavo obsevalnega zdravljenja.

Vrisovanje rizičnih organov in tarčnih volumnov

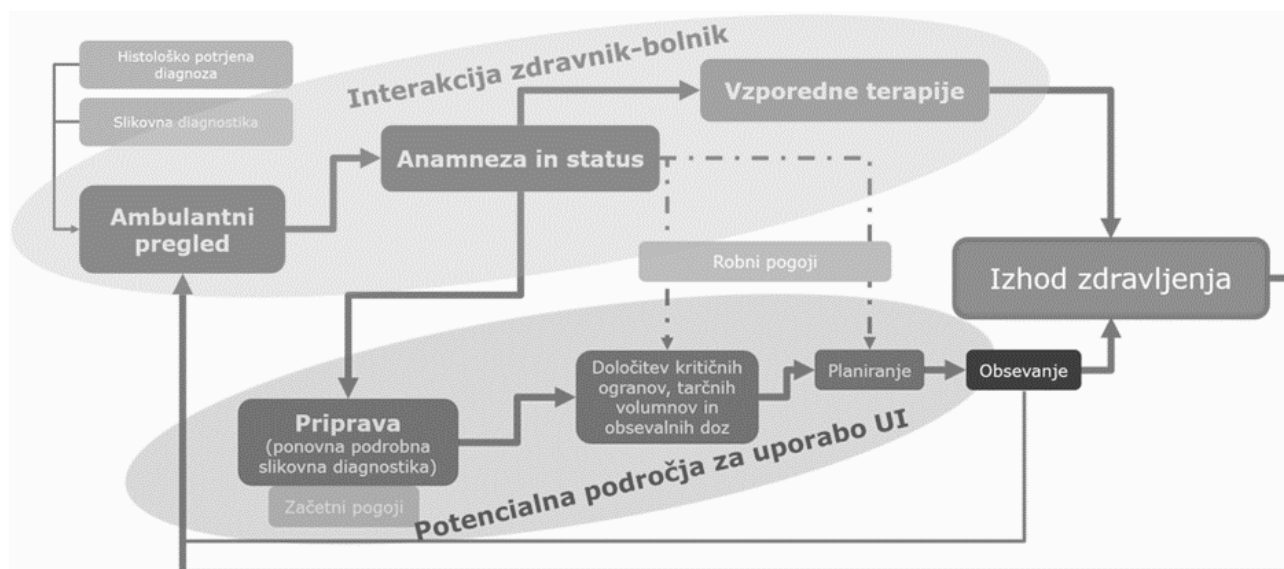
Pri vrisovanju rizičnih organov in tarčnih volumnov se držimo mednarodno uveljavljenih pravil in nomenklature za vrisovanje. Poznamo različne tarčne obsevalne volumne (slika 2):

- GTV (angl. *gross tumor volume*, tumorski tarčni volumen) je vidni volumen tumorja na slikovni diagnostiki. Pri risanju upoštevamo klinične informacije (pomemben je dober klinični pregled).
- CTV (angl. *clinical tumor volume*, klinični tarčni volumen) je volumen, ki upošteva patologijo raka, to pomeni morebitno širjenje raka. S CTV-jem določimo obseg kliničnega zdravljenja.
- ITV (angl. *internal clinical volume*, interni tarčni volumen) je volumen, ki zajema CTV in hkrati upošteva premike tumorja zaradi različnih dejavnikov (dihanje, peristaltika, polnjenje črevesja, mehurja idr.), na katere ne moremo vplivati do te mere, da bi lahko dosegli popolno mirovanje želenega območja obsevanja.
- PTV (angl. *planning target volume*, planirni tarčni volumen) je volumen, ki upošteva dodatni varnostni rob zaradi nenatančnosti strojne opreme in drugih morebitnih negotovosti, ki se zgodijo med načrtovanjem obsevanja. PTV je načrtovani cilj obsega zdravljenja.

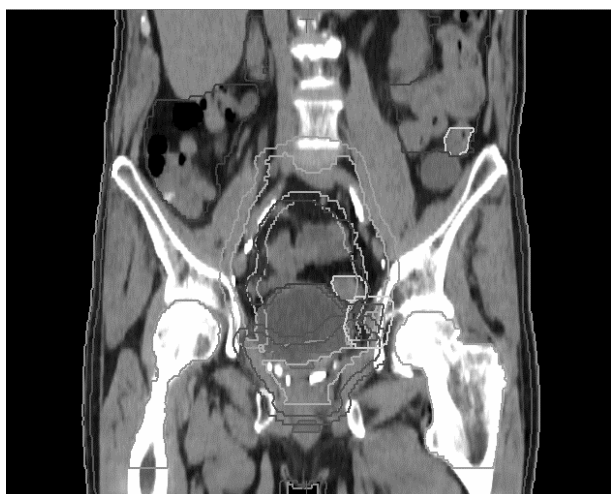
Enako pomembno je vrisovanje volumnov rizičnih organov (angl. *organs at risk*, OAR). Rizični organi so zdrava tkiva, ki so v bližini tarčnega volumna in predstavljajo področje, kjer imamo določene stroge omejitve doze ionizirajočih žarkov, da se v največji možni meri izognemo stranskim učinkom, ki nastanejo zaradi zdravljenja z obsevanjem.²

Predpis doze in omejitev na rizične organe

Po zaključku vrisovanja rizičnih organov in tarčnih volumnov zdravnik onkolog radioterapevt predpiše dozo na PTV. Doza je v glavnem odvisna od namena obsevanja (paliativno, radikalno, pooperativno, konsolidacijsko, profilaktično obsevanje) in vrste raka. Vrisanega bolnika zdravnik preda v načrtovanje medicinskimi dozimetristom in fizikom. Pred oddajo navede dozne omejitve na rizične organe.



Slika 1 Poenostavljen delovni proces v radioterapiji (UI – umetna inteligenca).



Slika 2 Vrisani tarčni volumni in volumni rizičnih organov – frontalna ravnina v načrtovalnem sistemu Monaco®HD. Predstavljen je primer reševalnega obsevanja raka prostate.

Priprava obsevalnega načrta

Medicinski dozimetristi in fiziki s pomočjo načrtovalnega sistema pripravijo obsevalni načrt. Ta postopek je lahko zelo zapleten. Kompleksnost načrta je odvisna od tehnike obsevanja ter zahtev, ki jih poda zdravnik onkolog radioterapevt (dobra dozna pokritost PTV in dozne omejitve na rizične organe).

Umetna inteligenca v radioterapiji

Umetna inteligenca (UI) je veja računalniške znanosti, ki poskuša posnemati človeku podobno razmišljanje z uporabo algoritmov.³⁻⁵

Strojno učenje (angl. *machine learning*) je temelj umetne inteligence in za učni proces uporablja računalniško programsko opremo, modeliranje in algoritme na podlagi posredovanih podatkov za odkrivanje vzorcev in korelacije med podatki. Metode strojnega učenja, ki se uporabljajo v radioterapiji za risanje volumnov (tako rizičnih kot tarčnih), so:

- metoda podpornih vektorjev (angl. *Support Vector Machine*, SVM),
- umetna nevronska mreža (angl. *Artificial Neural Network*, ANN) in
- globoko učenje (angl. *Deep Learning*, DL).⁶

Razliko med strojnim in globokim učenjem je na preprost način razložil Joe Dumoulin, strokovnjak za umetno inteligenco, v intervjuju za spletni portal MMC RTV SLO novembra 2019. Pri vsakem strojnem učenju se vnašajo podatki in na podlagi podatkov se ustvarja model oziroma algoritem. Podmnožica strojnega učenja je globoko učenje. Pri večini metod strojnega učenja se lahko koristno obdelala le omejena količina podatkov. Kadar presežemo plato vnosa količine podatkov, se le-ta na neki točki preneha izboljševati. Medtem pa je pri globokem učenju vnesena količina podatkov povezana z večjo natančnostjo rezultatov.

Načrtovanje zdravljenja v radioterapiji temelji na optimizaciji postopkov s številnimi prostnostnimi stopnjami. Zahteva znanje naprednih veščin, proces je delovno intenziven⁷ in povezan z veliko spremenljivostjo uporabnika.⁸ Razvoj UI je privedel do razvoja aplikacij na področju načrtovanja obsevalnega zdravljenja onkoloških bolnikov, ki zmanjšujejo človeško posredovanje in delovne obremenitve. Hkrati izboljšajo kakovost in skladnost načrtovanja obsevanja.^{9,10} UI med drugim omogoča primerjavo različnih tehnik zdravljenja z obsevanjem na podlagi minimalne pristranskosti in na podlagi večje količine vhodnih podatkov so obsevalni načrti še bolj optimizirani. Vse to omogoča individualno zdravljenje onkološkega pacienta.^{11,12}

Če imamo na voljo različne obsevalne načrte za istega bolnika, lahko izberemo tistega, ki bo predvidoma imel najboljši izid zdravljenja (najvišjo dozo na tarčni volumen in najmanjšo dozo na rizične organe). S tem zmanjšamo stranske učinke in povečamo kakovost bolnikovega življenja. Prav tako lahko izbiramo načrt dneva, kar je izjemnega pomena predvsem pri obsevanju tarčnih volumnov pri pooperativnem ali radikalnem zdravljenju uroloških in ginekoloških rakov, ko se soočamo z različno napolnjenostjo mehurja in črevesja. Da lahko izdelamo različne načrte za istega bolnika, nam mora to opravilo vzeti čim manj časa.

Velik izziv ostaja integracija strojnega učenja v delovni proces radioterapevtskega zdravljenja onkološkega bolnika. UI je sposobna opravljati določene naloge, kot je na primer prepoznavanje organov v slikovni diagnostiki, vendar se interpretacija informacije lahko razlikujejo od človeškega spoznanja. UI bi lahko zaznala anatomske strukture, ki jih človeško oko običajno ne vidi, vendar takšna sposobnost morda ni klinično koristna. Prav tako lahko zazna nepravilne strukture organov, ne da bi se sistem tega zavedal oz. prepoznal napačno delovanje.¹³ Zavedati se moramo, da obstajajo številni primeri, ko natančni algoritmi UI niso dobro opisani ali so brez kliničnih razlag, saj jih vodi empirično učenje.⁶ Rezultate, dobljene na podlagi algoritmov UI, na katerih temelji načrtovalski sistem, mora vedno preveriti in ovrednotiti celoten tim, ki sodeluje pri zdravljenju onkološkega bolnika.

Strojno učenje je iterativni postopek zaznavanja povezav preko računalniških modelov in algoritmov in za učni proces zahteva ogromno zbirko surovih podatkov. Slikovna diagnostika malignih procesov, radiološki podatki, podatki o predvideni in dejanski izsevani dozi na posamezne organe in konture v obsevalnih planih bolnika so pogosto shranjeni v varnih strežnikih, ki niso povezani z lokalno

dostopnimi strežniki posamezne bolnišnice. Ovira za napredek strojnega učenja v radioterapiji je lahko logistika dostopa do takih baz podatkov, ki morajo biti tudi dovolj kakovostne in primerne za strojno učenje. Ne smemo pozabiti tudi na varnost in zaupnost pacientovih podatkov.¹⁴ Ključnega pomena je ovrednotenje končnih rezultatov in ovrednotenje učinkovitosti sistema.

Glavni cilji za usmerjeno izvajanje in uporabo UI v kliničnem delovnem procesu obsevalnega zdravljenja onkološkega bolnika so:

- povečati natančnost, doslednost, prihraniti čas, zmanjšati spremenljivost med notranjimi in zunanjimi uporabniki (objektivni razlogi);
- prilagoditi fazo usposabljanja UI kliničnim potrebam ter doseči čim večjo ponovljivost in natančnost modela pred klinično uporabo (neodvisno ocenjevanje);
- pridobiti veliko količino visoko kakovostnih retrospektivnih podatkov;
- prilagoditi algoritme spremenljivosti klinične prakse na podlagi kliničnih študij;
- stalnost rezultatov glede na mesto in glede na tehniko obsevanja;
- kvantitativni rezultati – izračuni skoraj povsem enaki v primerjavi z izračuni brez uporabe UI (vrisovanje in dozimetrija);
- kvalitativni rezultati – uporabni rezultati, ki so primerni za klinično prakso.

Pri implementaciji sistema UI v delovni proces onkološkega obsevalnega zdravljenja moramo imeti zagotovljeno multidisciplinarno ekipo s strokovnim znanjem o UI, sistem povratnih informacij in preverljivost rezultatov od začetka do konca obsevalnega zdravljenja. Priporočljive so analize rizičnih dejavnikov (spremenjena anatomija, redke dozne frakcionacije idr.). Pomembno je zagotavljanje kakovosti – spremljanje natančnosti na podlagi skladnosti izhodnih podatkov modela skozi čas in robustnosti z namenom nenehnega izboljševanja kakovosti.

Objavljenih je kar nekaj študij uporabe UI pri risanju rizičnih organov in tarčnih volumnov predvsem pri raku glave in vratu ter pri raku prostate. Izsledki večine študij so, da je dosežena dobra natančnost pri risanju in izjemno skrajšan čas pri risanju rizičnih in tarčnih volumnov.

Vse večja uporaba rešitev strojnega učenja za segmentacijo in načrtovanje obsevalnega zdravljenja ne pušča dvoma, da bo UI kmalu v veliki meri vpeta v postopke radioterapije. Čeprav to obljublja večjo hitrost in natančnost pri postopkih zdravljenja,

moramo prihodnjo vlogo UI v radioterapiji skrbno premisliti.

V razpoložljivi literaturi ni veliko člankov o UI, ki bi obravnavali etični in psihološki vidik vpletenosti UI v medicino, natančneje v radioterapijo. Bridge¹⁶ opisuje, da moramo raziskati tudi možen vpliv UI na človeško ustvarjalnost in nadzor nad delom. Brez te perspektive tvegamo, da se osredotočamo le na takojšen logistični učinek, ki bo skrajšal časovni okvir dela vseh sodelujočih v pripravi na zdravljenje, in zanemarimo končni izid zdravljenja onkološkega bolnika. Izpostavi tri ključne vidike radioterapije, ki so izjemno pomembni in bi bili najbolj prizadeti pod nadzorom UI: človeška ustvarjalnost, inovativnost in varnost pacientov. Vse kategorije zahtevajo edinstvene človeške lastnosti. S filozofskega vidika je pri zdravljenju vseh bolnikov, še zlasti onkoloških, kjer je veliko interakcij med bolnikom in zdravstvenim osebjem, izjemno pomembna človeška zavest, etika in empatija.⁶

S filozofskega stališča bi morali ohraniti etične pomisleke glede vse večje vloge UI v radioterapiji, ki presega preprosto kvantitativno interpretacijo in obdelavo slikovne diagnostike. V času razvoja UI imamo čas, da ugotovimo, kako se bodo vloge zdravstvenih delavcev razvijale, in vzpostavimo smernice za zagotavljanje fizične interakcije med oskrbo pacientov. Najpomembneje je, da moramo začeti vgrajevati filozofski pristop k sprejetju tehnologije UI že na začetku integracije v obsevalno zdravljenje, če se želimo pripraviti na izzive, povezane z UI, ki so pred nami.⁶

Zagotovo je načrtovanje zdravljenja bistven korak v procesu obsevalnega zdravljenja. V zadnjih nekaj desetletjih je s pomočjo različnih računalniških programov proces postal bolj izpopolnjen, načrtovalcem pa je omogočil oblikovanje zelo zapletenih načrtov obsevalnega zdravljenja, pri čemer so dosegli zmanjšanje doze na okolna zdrava tkiva ob visokih dozah na tumorsko tkivo. Posledično je načrtovanje zdravljenja postalo bolj delovno intenzivno, kar zahteva delovni proces, ki obsega ure ali celo dneve načrtovalca obsevalnega zdravljenja. V zadnjem času je bila UI uporabljena za avtomatizacijo in izboljšanje različnih vidikov medicinske znanosti. Za načrtovanje radioterapije so bili razviti številni algoritmi za boljšo podporo načrtovalcem. Ti algoritmi se osredotočajo na avtomatizacijo procesa načrtovanja in/ali optimizacijo dozimetričnih kompromisov in so že močno vplivali na izboljšanje učinkovitosti načrtovanja zdravljenja in posledično na kakovosti obsevalnega načrta. Uporabo UI tako lahko uvrstimo v tri glavne kategorije: avtomatizirano

izvajanje pravil in sklepanje, modeliranje predhodnega znanja v klinični praksi in večkriterijska optimizacija.¹²

Razprava

Umetno inteligenco je v primeru obsevalne onkologije smiselno uporabiti v delovnih procesih, kjer ni potrebe po interakciji med pacientom in zdravnikom. Bistvenega pomena pa v zdravljenju onkološkega bolnika predstavljata anamneza in klinični pregled pacienta. Pri tem je potrebno upoštevati psihološke vidike človeške interakcije med pacientom in zdravnikom, ki je ni in ne bo možno nadomestiti s programsko ali strojno opremo. Za dobre klinične rezultate zdravljenja onkoloških bolnikov, ki so obsevani na podlagi načrtov, izdelanih z UI, so pomembni kakovostni in realni vhodni podatki, ki jih v veliki meri dobimo ravno z dobro anamnezo in kliničnim pregledom bolnika. Kjer ni potrebne medčloveške interakcije zdravnik – pacient, je smiselno ta korak v največji možni meri avtomatizirati. S tem pridobimo ogromno časa za ambulantno obravnavo pacienta, ki je ključnega pomena v procesu onkološkega zdravljenja, in bolj kakovostne vhodne podatke, ki izboljšajo izid zdravljenja in kakovost življenja (zaradi manj stranskih učinkov, ki nastanejo pri obsevanju).

Prav tako na podlagi sistematičnega vnosa vhodnih podatkov pridobimo ogromno količino podatkov, ki so povezani s procesom zdravljenja, končnim rezultatom in sledenjem po zaključenem zdravljenju onkoloških bolnikov. Analiza teh podatkov je s pomočjo UI časovno in stroškovno izjemno učinkovita. Na tak način lahko zanesljivo evalviramo svoje delo.

V Univerzitetnem kliničnem centru Maribor na Enoti za radioterapijo se naše delo prične z vnosom podatkov v programsko opremo (Mosaiq® Radiation Oncology), ki je povezana z obsevalnimi aparati in s načrtovalnim sistemom. Vnašamo vhodne podatke (šifra diagnoze, stadij TNM, histološki izvid, lokalizacija tumorja in/ali metastaze, datum postavitve diagnoze in datum konzilija, na katerem je bilo podano mnenje o zdravljenju bolnika/bolnice, izvide slikovne diagnostike, predviden načrt zdravljenja – mesto obsevanja, število in doza obsevanj, tehnika obsevanja in drugo). Ob prvem pregledu bolnika imamo zbrane informacije, ki jih potrebujemo za odločitev o zdravljenju glede na predhodno opravljeno (histološko in slikovno) diagnostiko. Vsi podatki so vnašajo v računalniški program, kar pomeni, da je naš potek dela brezpapiren. Na podlagi kliničnega pregleda se dokončno odločimo o predvidenem obsevalnem

zdravljenju oziroma dodamo lokalizacijo obsevanja zaradi bolečin ali druge indikacije. Programsko opremo Mosaiq na Enoti za radioterapijo pri svojem delu uporabljajo radiološki inženirji, medicinski fiziki, dozimetristi, srednja medicinska sestra, diplomirana medicinska sestra (na podlagi vprašalnika opravlja tudi ambulantne kontrole med obsevanji bolnikov) ter specialisti onkologi z radioterapijo.

Ko bolnik opravi pripravo na obsevanje, je programska oprema povezana z naprednim načrtovalnim sistemom (RayStation 11B). V ta sistem se prenese slikovna diagnostika iz načrtovalnega slikanja s CT ali MR. Na podlagi algoritmov, ki temeljijo na atlasih načrtovalskega sistema, se obrišejo vsi rizični organi. Vrisane strukture pregledata dozimetrist in specialist onkologije z radioterapijo.

Načrtovalski sistem RayStation vključuje strojno učenje. Sistem uporabljamo od februarja 2021, kar pomeni, da smo sedaj v dobi učenja, preizkušanja, testiranja obstoječih algoritmov in pisanja novih algoritmov. S sprotim analiziranjem doslej opravljanega dela (predvsem opravil, ki so nam vzela veliko časa) in najpogostejših napak, prilagajamo algoritme načrtovalskega sistema z namenom skrajševanja delovnih procesov in s tem pridobitve časa za bolj kakovostno in standardizirano obravnavo pacientov ter izdelavo različnih obsevalnih načrtov za istega bolnika. S tem pridobimo možnost izbire najustrežnejšega obsevalnega plana. Prav tako časovno optimiziramo poti za določene delovne procese pri risanju rizičnih organov in tarčnih obsevalnih volumnov in s tem skrajšamo delovni proces specialista onkologa z radioterapijo, preden izda računalniško nalogo za izdelavo obsevalnega načrta, ki ga naredijo medicinski fiziki ali dozimetristi. RayStation po vhodnih zahtevah naredi obsevalni načrt mnogo hitreje kot predhodni načrtovalski sistem.

Z uporabo programske opreme, ki je bila razvita izključno za potrebe onkologije, in z naprednim načrtovalskim sistemom lahko kljub veliki kadrovski stiski kakovostno obravnavamo bolnike, ki potrebujejo obsevalno zdravljenje, in zmanjšamo vpliv človeške napake. Na podlagi vnosa podatkov v programski sistem dobimo standardizirane podatke, s katerimi lahko analiziramo dosedanje delo oziroma izvajamo različne študije. Podatke, zajete v poljubnem časovnem obdobju, lahko dobimo izjemno hitro z "le nekaj kliki".

Zaključek

Glavni cilj UI, ki je integrirana v postopkih radioterapije, je pravilno ovrednotenje končnega rezultata (opravljenega dela) na podlagi referenčnih primerov (z znanimi rezultati in na podlagi rezultatov primerov, ovrednotenih s strani uporabnika. Z večanjem števila ovrednotenih rezultatov opravljenih nalog, se mora algoritem umetne inteligence približevati idealnemu rezultatu za vse primere – tako obstoječe kot bodoče naloge. Pri tem je pomembno, da se pri vsaki nadaljnji nalogi zmanjšuje čas, potreben za opravljene naloge, in število potrebnih intervencij uporabnika ter zvišuje natančnost. V idealnem primeru algoritem UI doseže 100 % natančnost rezultatov brez posredovanja uporabnika v najkrajšem možnem času ne glede na začetne in robne pogoje.

V primeru načrtovanja obsevanj v radioterapiji bi to pomenilo, da bi algoritem UI na podlagi slikovne diagnostike (CT, MR), ki je narejena za potrebe priprave na obsevanje, pravilno prepoznal rizične organe in tarčne volumne ter na podlagi robnih pogojev izdelal obsevalni načrt.¹⁵ Prav tako bi lahko večini bolnikov ponudili popolnoma individualno zdravljenje na podlagi njihovih prioritete.

Na Enoti za radioterapijo v Univerzitetnem kliničnem centru Maribor smo na podlagi pridobljenih izkušenj ugotovili, da je časovni vložek, ki je potreben ob uvajanju naprednih tehnologij, ogromen, vendar rezultat odtehta vloženo energijo, znanje in čas. Pomembno je, da imamo jasen cilj in vizijo, kaj želimo doseči. Med cilje spadajo predvsem optimizacija delovnih procesov z namenom zmanjševanja napak, ki lahko nastanejo pri delovnem procesu; skrajšanje časovnega okna pri izdelavi obsevalnega načrta; izdelava še bolj kakovostnih obsevalnih načrtov; ter pridobivanje velike količine podatkov za nadaljnje analize z namenom izboljšanja delovnih procesov in obsevalnih načrtov.

V prihodnosti želimo vzpostaviti čim več algoritmov, ki so potrebni za risanje rizičnih in tarčnih volumnov in za izdelavo obsevalnih načrtov. S tem bomo pridobili čas in izboljšali tehnično izvedljivost za še bolj kakovostno obravnavo onkoloških bolnikov, ki potrebujejo obsevalno zdravljenje.

Reference

1. Kresl JJ, Drummond RL: A historical perspective of the radiation oncology workforce and ongoing initiatives to impact recruitment and retention. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2004; 60(1): 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2004.04.071>

2. Burnet NG, Thomas SJ, Burton KE, Jefferies SJ: Defining the tumour and target volumes for radiotherapy. *Cancer Imaging* 2004; 4(2): 153-161. <https://doi.org/10.1102/1470-7330.2004.0054>
3. Rajkumar A, Dean J, Kohane I: Machine learning in medicine. *N Engl J Med* 2019; 380(14): 1347-1358. <https://doi.org/10.1056/NEJMr1814259>
4. Meyer P, Noblet V, Mazzara C, Lallement A: Survey on deep learning for radiotherapy. *Comput Biol Med* 2018; 98: 126-146. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2018.05.018>
5. LeCun Y, Bengio Y, Hinton G: Deep learning. *Nature* 2015; 521(7553): 436-44. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
6. Bibault JE, Giraud P, Burgun A: Big data and machine learning in radiation oncology: state of the art and future prospects. *Cancer Lett* 2016; 382(1): 110-117. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2016.05.033>
7. Craft DL, Hong TS, Shih HA, Bortfeld TR: Improved planning time and plan quality through multicriteria optimization for intensity-modulated radiotherapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2012; 82(1): e83-90 <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2010.12.007>
8. Nelms BE, Robinson G, Markham J, et al: Variation in external beam treatment plan quality: an inter-institutional study of planners and planning systems. *Pract Radiat Oncol* 2012; 2(4): 296-305. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2011.11.012>
9. Chang ATY, Hung AWM, Cheung FWK, et al: Comparison of planning quality and efficiency between conventional and knowledge-based algorithms in nasopharyngeal cancer patients using intensity modulated radiation therapy. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2016; 95(3): 981-990. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2016.02.017>
10. Leung LH, Kan MW, Cheng AC, Wong WK, Yau CC: A new dose-volume-based Plan Quality Index for IMRT plan comparison. *Radiother Oncol* 2007; 85(3): 407-417. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2007.10.018>
11. Hussein M, Heijmen BJM, Verellen D, Nisbet A: Automation in intensity modulated radiotherapy treatment planning-a review of recent innovations. *Br J Radiol* 2018; 91(1092): 20180270. <https://doi.org/10.1259/bjr.20180270>
12. Wang C, Zhu X, Hong JC, Zheng D: Artificial intelligence in radiotherapy treatment planning: present and future. *Technol Cancer Res Treat* 2019; 18: 1533033819873922. <https://doi.org/10.1177/1533033819873922>
13. Nguyen A, Yosinski J, Clune J: Deep neural networks are easily fooled: high confidence predictions for unrecognizable images. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2015: 427-436. https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2015/html/Nguyen_Deep_Neural_Networks_2015_CVPR_paper.html (9. 11. 2021)
14. Boon IS, Au Yong TPT, Boon CS: Assessing the role of artificial intelligence (AI) in clinical oncology: utility of machine learning in radiotherapy target volume delineation. *Medicines (Basel)* 2018; 5(4): 131. <https://doi.org/10.3390/medicines5040131>
15. Kortessniemi M, Tsapaki V, Trianni A, et al: The European Federation of Organisations for Medical Physics (EFOMP) White Paper: big data and deep learning in medical imaging and in relation to medical physics profession. *Phys Med* 2018; 56: 90-93. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.11.005>
16. Bridge P, Bridge R: Artificial intelligence in radiotherapy: a philosophical perspective. *J Med Imaging Radiat Sci* 2019; 50(4 Suppl 2): S27-S31. <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2019.09.003>