

České vysoké učení technické
Fakulta stavební
Katedra mechaniky
Thákurova 7, 166 29, Praha 6

Posudek studentské soutěžní práce

Marek Tyburec: Vícekriteriální optimalizace léčebného plánu protonové terapie

Autor posudku:
ing. Ondřej Hrstka

(Autor posudku je technickým vývojovým inženýrem společnosti Ion Beam Applications S.A., která je dodavatelem komplexu protonové terapie pro pražské Protonové centrum.)

Protonová (nebo obecně hadronová) terapie je v současné době nejprogresivnější, ale současně nejméně technicky zvládnutá metoda léčby rakovinných nádorů pomocí ionizujícího záření. Oproti jiným metodám je jejím přínosem přesnost zasažení nádoru a současně maximální šetrnost vůči zdravé tkáni v okolí. Hadronovou terapií je obecně možno léčit nádory i v pokročilých stádiích, včetně metastatického rozpadu, existují však určitá omezení, zejména co do velikosti tzv. spotu, tedy nejmenšího ozářeného objemu. Bolestivým místem této technologie je také tzv. plánování. Jde o složitý výpočetní postup, jehož vstupem je anatomie pacienta získaná CT zobrazením, diagnóza, fyzikální parametry tkání a paprsku a dále klinický předpis, který udává předepsané minimální a maximální dávky záření do nádoru a okolních tkání. Výstupem tohoto procesu je jednak tzv. ozařovací plán, který popisuje, jaké množství záření má ozařovací stroj doručit do jednotlivých "bodů" v těle pacienta, jednak rozložení dávky, které takovýmto ozářením v těle pacienta vznikne.

Tento plánovací proces se prozatím nepodařilo technicky uspokojivě zvládnout a představuje určité omezení jak pro klinickou praxi, tak pro další rozvoj dané technologie. Jde o vícekriteriální optimalizaci s vysokým počtem stupňů volnosti (obecně stovky) a vysokým počtem omezujících podmínek. Komerční firmy (Elekta, Varian, RaySearch), jejichž softwarové produkty se používají v klinické praxi protonových léčebných zařízení, se dosud s tímto úkolem potýkají s problematickým úspěchem, redukce času se zatím dosahovalo pouze zvyšováním fyzického výpočetního výkonu. Vzhledem k neobyčejné výpočetní náročnosti přitom dosud nikdo neučinil krok od prosté gradientní optimalizace k optimalizaci globální, v důsledku toho jsou často klinicky používané plány zjevně suboptimální a často vyžadují mnohonásobné úpravy a manuální "dolaďování", což dále celý plánovací proces neúnosně protahuje. Plánování vytváří dokonce určitá úzká hrdla v provozu protonových klinik - propustnost plánovacího oddělení je často nižší než propustnost samotné technologie.

Lékem na tyto problémy je samozřejmě především nalezení takové výpočetní metody, která by srazila čas optimalizace a zlepšila její kvalitu.

Předložená práce představuje první pokus zformulovat a vyřešit optimalizaci léčebného plánu protonové terapie jako úlohu lineární optimalizace. Tato metoda, ve srovnání s gradientní či evoluční optimalizací, dává naději řešit danou úlohu v čase, který roste se složitostí úlohy jen lineárně a v tomto lineárně rostoucím čase dokonce nacházet přímo globální optima. Pro představu lze uvést, že při využití srovnatelného výpočetního výkonu, jaký je na protonových klinikách k dispozici, by s použitím lineární optimalizace mohlo

dojít ke zkrácení čistého výpočetního času z desítek minut na desítky sekund.

Přitom je nutno poznamenat, že tato práce není jen prostým pokusem vyzkoušet jakýsi nový výpočet, ale má také velmi silný teoretický background. Obecně lze říci, že formulovat protonovou optimalizaci jako úlohu lineárního programování je novum, jde o záležitost doposud teoreticky nezvládnutou a teoreticky mnohem obtížnější než bylo formulování v současnosti běžně používané prosté gradientní optimalizace (stejně jako myslitelné, ale rovněž dosud nepoužité optimalizace evoluční). Právě tato obtížnost je patrně hlavním důvodem, proč dosud nebyla nikdy použita.

Revoluční je ovšem nejen samotná formulace úlohy coby úlohy minimalizace dodaného náboje (oproti prozatím běžným metodám založeným na přímočaré konstrukci ohodnocovací funkce), ale také to, že tato matematická formulace vedla k úspěchu, tj., že se podařilo takto formulovanou úlohu výpočetně řešit na složitých případech, jež dostatečně připomínají úlohy klinické praxe. Z tohoto hlediska je předloženou práci třeba hodnotit jako velmi významný počín, který může vést k určité revoluci v plánování protonové léčby, jak co do typické doby plánování zákroku, tak co do dalšího rozvoje protonové technologie, kterou drastické snížení výpočetní doby umožní - např. operativní přeplánování přímo na ozařovacím stroji, zvyšování počtu paprsků či tzv. full-arc ozařování.

Při uvážení složitosti dané úlohy je hloubka a záběr této práce imponující, stejně jako dosažený výsledek. Je třeba ocenit také podrobnost a úplnost matematického modelu šíření protonového záření; ten je rozveden natolik, že umožňuje prakticky přímý převod do programovacího nástroje. Nejdůležitější je ovšem to, že tato práce dosahuje skutečného úspěchu - demonstruje úspěšný optimalizační výpočet nejen na jednorozměrném případě, ale i na případě trojrozměrném, s použitím dvou různých směrů ozáření a s uvážením nehomogenity prostředí. Tento úspěšný výpočet naznačuje, že navržený postup bude použitelný ke klinickému plánování.

Z důvodů výše uvedených lze přínosy této studentské práce shrnout takto:

- Jde o práci původní, prozatím světově unikátní a ve své oblasti revoluční
- Navržená metoda je slibná v tom smyslu, že dosažené výsledky zakládají naději na určitý významný průlom v oblasti plánování protonové terapie
- Použitelnost navržené metody byla v rámci této práce testována na úlohách dostatečně blízkých úlohám klinickým
- V případě úspěšného pokračování v tomto výzkumu lze předpokládat významný dopad jak na klinickou praxi, tak na další rozvoj protonové technologie

Navrhuji tedy ocenit tuto studentskou práci nejvyšším možným ohodnocením.

Ondřej Hrstka
29. 4. 2015