

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Ivo Kraus

Rentgenová tomografie a možnosti jejích technických aplikací

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 42 (1997), No. 3, 121--127

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139765>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1997

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

- [G] R. L. GOLDSTEIN: *Essays in the Philosophy of Mathematics*. Leicester University Press, 1965.
- [Gö] K. GÖDEL: *Über formal unentscheidbare Satze der Principia Mathematica und verwandter Systeme*. Monatshefte für Mathematik und Physik 38 (1931), 173–198.
- [P] H. POINCARÉ: *New Methods of Celestial Mechanics* (with an introduction by D. L. Gorogg). American Institute of Physics, 1993.
- [S] D. G. SAARI: *A visit to the Newtonian N -body problem via elementary complex variables*. The American Mathematical Monthly 97 (1990), 105–119.
- [Si] C. L. SIEGEL: *Der Dreierstoss*. Annals of Mathematics 42 (1941), 127–168.
- [Su1] K. SUNDMAN: *Recherches sur le Problème des trois corps*. Acta Societatis Scientiarum Fennicae 34 (1907), no. 6.
- [Su2] K. SUNDMAN: *Nouvelles recherches sur le problème des trois corps*. Acta Societatis Scientiarum Fennicae 35 (1909), no. 9.
- [Su3] K. SUNDMAN: *Mémoire sur le problème des trois corps*. Acta Mathematica 36 (1912), 105–179.
- [U] J. B. URENKO: *Improbability of collisions in Newtonian gravitational systems of specified angular momentum*. SIAM J. Appl. Math. 36 (1979), 123–147.
- [Wa] Q. WANG: *The global solution of the n -body problem*. Celestial Mechanics 50 (1991), 73–88.
- [W] A. WINTNER: *The Analytical Foundations of Celestial Mechanics*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1941.

Rentgenová tomografie a možnosti jejích technických aplikací

Ivo Kraus, Praha

1. Metody zviditelnění struktury objektů

Obrazy objektů lze získat dvěma principiálně odlišnými způsoby:

- pasivním* — pomocí vlastního záření pozorovaného objektu,
- aktivním* — ozářením objektu *externím světelným* zdrojem.

V oboru viditelného spektra připadá pasivní metoda v úvahu jen při pozorování svítících objektů, jako je plamen, Slunce, hvězdy. Aktivní metoda je realizována *osvětlením* těles *zvnějšku*. *Introskopie* — prohlížení vnitřní struktury — je v tomto případě ovšem možná jen u objektů, které jsou v optickém oboru vlnových délek průzračné.

Prof. RNDr. IVO KRAUS, DrSc. (1936), FJFI ČVUT, V Holešovičkách 2, 180 00 Praha 8.

Jako primární záření se při zviditelňování vnitřní struktury používají akustické vlny, elektromagnetické vlny a korpuskulární záření.

Akustické vlny (10^4 až 10^9 Hz) jsou vhodné k nedestruktivní kontrole objektů kovových i nekovových. Elektromagnetické vlny nízkých frekvencí ($< 10^3$ Hz) a radiovlny (10^4 až 10^{10} Hz) se užívají jen u dielektrických a polovodičových materiálů. Introskopie kovových výrobků se provádí pomocí záření rentgenového ($3 \cdot 10^{16}$ až $3 \cdot 10^{20}$ Hz), záření gama ($3 \cdot 10^{20}$ Hz) nebo záření korpuskulárních.

K zobrazení objektů se používá *přímá vizualizace, holografie a tomografie.*

a) Metody *přímé vizualizace* jsou založeny na registraci koherentního nebo nekoherentního záření získaného po interakci primárního záření s objektem (aktivní metody) nebo na registraci vlastního záření objektu (pasivní metody).

Pasivními metodami je registrováno vlastní záření objektu, např. elektromagnetické záření infračervených frekvencí. V některých případech se vlastní záření objektu budí tak, že na objekt působíme jinou fyzikální příčinou než zářením. Příkladem je *akustická emise*, vznikající v pevných látkách působením vnější síly, *mechanoluminiscence* aj.

Aktivní metody mohou mít buď uspořádání *transmisní*, kdy je registrováno záření prošlé objektem, nebo *reflexní*, při němž detekujeme záření odražené nebo rozptýlené vnitřními nehomogenitami.

Všechny aktivní metody *přímé vizualizace* mají stejný sled operací: ozáření objektu primárním zářením, příjem sekundárního (prošlého nebo odraženého) záření, transformace sekundárního záření na elektrický signál, přeměna signálu elektrického na optický.

b) *Holografické metody*. Objekty lze zviditelnit pouze pomocí koherentních záření.

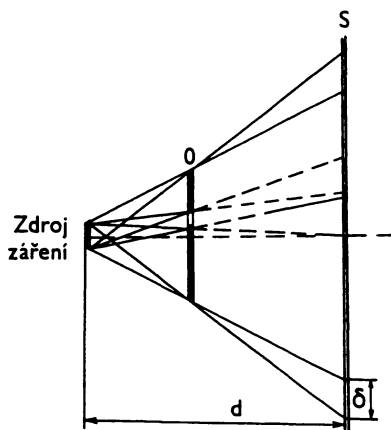
c) *Tomografické metody*. Přímou vizualizací je zobrazeno rozložení určité fyzikální veličiny ve dvourozměrném řezu zkoumaného objektu.

2. Rentgenová tomografie

Röntgenův objev slouží medicíně už celé století. Paprsky X našly své uplatnění jak v diagnostice, tak v terapii, vznikl samostatný lékařský obor — radiologie.

Podstatou rentgenové diagnostiky, *založené* 22. prosince 1895, kdy Röntgen zhotovil fotografii ruky své ženy, je interpretace stínového obrazu vznikajícího díky odlišné schopnosti různých částí lidského těla absorbovat rentgenové paprsky. Ke zviditelnění tohoto jevu použil Röntgen fotografickou desku. Na ní vznikne účinkem paprsků latentní obraz, který je po vyvolání tmavší na těch místech, kam dopadlo záření méně zeslabené. Tato metoda má však dva nedostatky:

1. Při velkém průměru zdroje záření (plošky anody, která emituje paprsky) je obraz neostrý (obr. 1). Rozostření se zmenší, když objekt umístíme co nejdál od zdroje a co nejbližší k fotografické desce. Současné rentgenky pro lékařskou diagnostiku jsou konstruovány tak, aby měly rozměry *optického ohniska* v rozmezí od $0,3 \times 0,3 \text{ mm}^2$ do $2,0 \times 2,0 \text{ mm}^2$. (Optickým ohniskem se rozumí průmět zářící plošky povrchu do roviny kolmé k ose svazku paprsků šířících se z rentgenky k prozařovanému objektu.)



Obr. 1. Reálná středová projekce. Na stínítku S umístěném ve vzdálenosti d od zdroje záření vzniká stínový obraz prozařovaného objektu O . Protože má zdroj záření konečné rozměry, jsou obrysy objektu O charakterizovány *neostrostí* δ .

2. Relativně dlouhá doba expozice rentgenového snímku vede k vysokému radiačnímu zatížení vyšetřovaných pacientů. Tento nedostatek lze minimalizovat tzv. *zesilovacími fóliemi*, vrstvami fluorescenční látky na fóliích přiložených těsně k fotografické emulzi, na niž dopadají paprsky prošlé zkoumaným biologickým objektem. Vyvolané fluorescenční záření z oblasti viditelného spektra působí pak na fotografickou emulzi zároveň s rentgenovými paprsky.

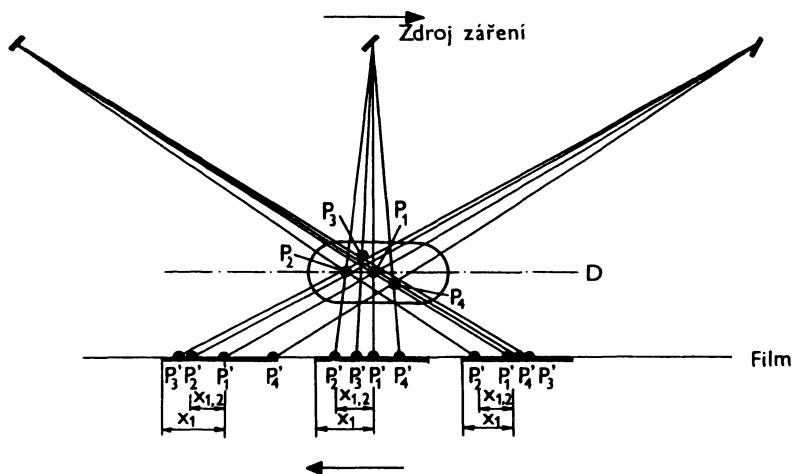
Další snížení radiačního zatížení při rentgenové diagnostice umožňují televizní dvojrozměrné detektory založené na elektronické přeměně rentgenových paprsků ve viditelné světlo. Pokud jde o zdroje záření pro rentgenovou diagnostiku, nedošlo u nich k žádným podstatným změnám; užívají se stále rentgenky s pracovním napětím 60 až 120 kV.

Princip centrální projekce dovoluje získat jen integrální stínový obraz celého prozařovaného objemu. Zobrazení *struktury* v určité hloubce pod povrchem umožnila teprve *lineární tomografie*, založená na principu *rozostření* obrazu všech částí zkoumaného objektu ležících nad zvolenou vrstvou nebo pod ní. Ostře se zobrazí jen struktury obsažené v *rovině středu otáčení*, tj. v rovině obsahující při synchronizovaném protiběžném pohybu zdroje záření a kazety s filmem zdánlivý střed otáčení rentgenového svazku (obr. 2). Změnou polohy této roviny se může volit různá hloubka *ostré* vrstvy.

V první polovině šedesátých let se objevily pokusy nahradit fotografickou emulzi ionizačním detektorem. Jedním z prvních vyšetřovaných objektů byla lebka z umělohmotného bloku se železnými hřebíky. Místo rentgenky sloužil jako zdroj paprsků slabý radioaktivní preparát, absorpce záření ve fantomu byla měřena scintilačním krystalem.

Další krok, tentokrát s průzkumem fantomů pomocí rentgenového záření, učinil americký fyzik Allan MacLeod Cormack (* 1924). S fantomy ověřoval svou myšlenku rekonstrukce obrazu také anglický inženýr a fyzik Godfrey Newbold Hounsfield (* 1919) z výzkumné laboratoře *Electrical Musical Industry* (EMI).

Na počátku vývoje počítačové tomografie (*computerized tomography, CT*) převládala názor, že medicína potřebuje znát prostorové zobrazení vyšetřovaného orgánu. Brzy se však pro diagnózu ukázal jako zcela postačující obraz dvojrozměrný. Nečekaně



Obr. 2. Princip rentgenové tomografie. Pohybuji-li se zdroj záření a kazeta s filmem navzájem protiběžně, zůstávají obrazy P_1' a P_2' struktur P_1 a P_2 ležících v rovině D zkoumaného objektu stále na stejných místech x_1 a x_2 filmu. Naproti tomu obrazy P_3' a P_4' struktur P_3 a P_4 (ležících mimo rovinu D) své polohy x_3 a x_4 na filmu nezachovávají, a proto jsou rozostřené.

problémy vznikly naproti tomu v souvislosti s požadavky na přesnost stanovení velmi blízkých absorpčních koeficientů tkání zdravých a nemocných. Změny bylo třeba stanovit lépe než na 0,5 %.

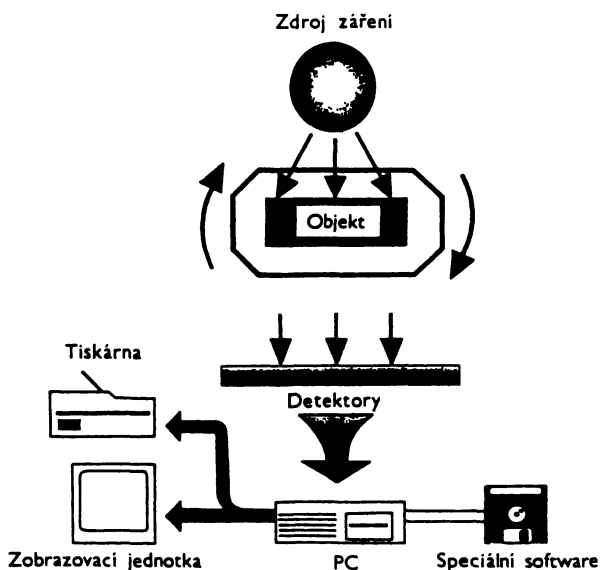
Hounsfieldovým zkušebním objektem se stal fantom vyšetřovaný zářením radioaktivního izotopu. Experiment trval devět dnů a velký počítač pak ještě další dvě a půl hodiny obraz rekonstruoval. Prototyp komerčního přístroje vyrobila firma *EMI* až počátkem sedmdesátých let, první pacient byl vyšetřen 4. října 1971.

O objevu přednášel Hounsfield na zasedání Britského radiologického ústavu (*British Institute of Radiology*) v dubnu 1972. Brzy potom začala s vlastním vývojem a výrobou počítačových tomografů řada renomovaných firem specializovaných na rentgenovou techniku.

Allan Cormack a Godfrey Hounsfield získali v roce 1979 za objev a realizaci diagnostické metody počítačové tomografie Nobelovu cenu za fyziologii a medicínu.

První přístroje fungovaly ještě podobně jako staré tomografy, to znamená, že se rentgenka a detektor pohybovaly navzájem protiběžně. V roce 1976, pouhých pět let po zhotovení prvního počítačového tomogramu lidského těla, nabízelo tomografy již 14 výrobců; na trhu se objevily i přístroje, v nichž rentgenka a detektory kolem pacienta rotovaly. To vedlo nejen k dalšímu zkrácení doby vyšetřování, ale i vyloučení neostrostí způsobených pohybem pacienta.

Zatímco při prvních experimentech musel Hounsfield zpracovat 28 tisíc hodnot, u tomografů zavedených po roce 1976 vzrostl počet získaných informací o celý řád. Z naměřených údajů je třeba vypočítat koeficienty zeslabení prozářené tkáně v reálném čase! Současné lékařské tomografy jsou charakterizovány dokonalou stabilitou (mají hmotnost $\approx 1,5$ tuny), dobou oběhu rentgenky několik sekund a velmi krátkými impulsy (\approx ms) emitovaného záření.



Obr. 3. Schéma sestavy počítačového tomografu pro diagnostiku technických materiálů.

V nejobecnějším tvaru je cíl rentgenové počítačové tomografie formulován jako rekonstrukce trojrozměrného rozdělení absorpčního součinitele $\mu(x, y, z)$ použitého záření v objemu kontrolovaného objektu pomocí analýzy integrálních projekcí získaných prozařováním objektu v různých směrech. V lékařské praxi se změna směru šíření paprsků realizuje synchronizovaným pohybem zdroje záření a detektorů kolem stacionárního vzorku, u technických materiálů nebo strojních dílů rotuje vyšetřovaný předmět mezi zdrojem a detektory (obr. 3).

Zdroje i detektory jsou rozloženy v rovině zvoleného řezu ($z = \text{const}$) zkoumaným objektem, takže proces kontroly vede k rekonstrukci a studiu dvojrozměrných tomogramů. Absorpce prošlých paprsků je měřena v ohraničených objemech, které se svým tvarem blíží krychlím. Velikost jejich hran závisí na rozlišovací schopnosti použitého zařízení a může dosáhnout hodnot až $10^1 - 10^0 \mu\text{m}$. V tomografické vrstvě odpovídá těmto elementům plocha označovaná *pixel* (obrazový prvek).

Vzhledem k vysoké ceně přístrojového vybavení (stovky tisíc až miliony dolarů) lze u nás s průmyslovou aplikací rentgenové rekonstruktivní tomografie počítat v nejbližší budoucnosti především k introskopii extrémně namáhaných dílů leteckých a automobilových motorů, kde je znalost vnitřní struktury určujícím faktorem provozní spolehlivosti a bezpečnosti.

3. Charakteristiky současných technických rentgenových tomografů

Základní charakteristikou rentgenových počítačových tomografů je maximální rozměr analyzovaného objektu a efektivní tloušťka kontrolované vrstvy. Oba tyto údaje

jsou dále uvedeny pro tomografy vyráběné v současné době největšími světovými firmami.

USA	General Electric	XIM-3	76 mm,	> 0,5 mm
		XIM-6	150 mm,	> 0,5 mm
	Scientific Measurement System	201 CITA	1500 mm,	5 – 1 mm
	Aerojet Strategic Propulsion	AF/ACTS-2	2400 mm,	< 50 mm
	Adv. Research and Applications	ARNIS-2	1500 mm,	< 25 mm
		LAMDE	800 mm,	< 25 mm
	American Science and Eng.	HECT	2200 mm,	50 – 5 mm
Bio-Imaging Research	ACTIS	1600 mm,	> 0,5 mm	
	RADAPT PC	200 mm,	2 mm	
	RADAPT 2	300 mm,	> 0,1 mm	
Japonsko	Toshiba	TOSCANED-4200	300 mm,	> 0,6 mm
V. Británie	EMI	Medical	160 mm,	3 – 1 mm
Francie	Intercontroll	MAGIC	500 mm,	> 0,5 mm
Německo	Isotopen-Technik	MCT-3	700 mm,	6 mm
Rusko	Indintro	BT-1200	1500 mm,	8 – 0,5 mm
		BT-300-1	400 mm,	4 – 0,5 mm
		BT-50	50 mm,	0,1 – 0,02 mm

Každý typ má své optimální aplikační oblasti. Tak např. počítačovým mikrotomografem BT-50 je možné vyšetřovat strukturu různorodých materiálů a výrobků pro mikroelektroniku i v běžných laboratořích nebo posluchárnách. Kromě již uvedených hodnot největšího možného rozměru a efektivní tloušťky kontrolované vrstvy má přístroj BT-50 tyto další parametry:

- vlastní biologická ochrana,
- rozměry: 1700 mm × 1200 mm × 800 mm,
- geometrická citlivost: 5 μm,
- citlivost na lokální defekty ve tvaru pórů: $3 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^3$,
- citlivost na kovové vměstky: $3 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^3$,
- citlivost na libovolně orientované trhliny: 5 μm,
- maximální napětí na rentgence: 120 kV,
- doba skenování kontrolovaného objektu: 5 – 10 min,
- počet prvků tomografického zobrazení: 1024 × 768 pixelů,
- cena: 350 000 USD.

4. Příklady technických aplikací rentgenové počítačové tomografie

- Kontrola *kompozitních materiálů* a vrstevnatých konstrukcí; metodou *CT* se dá stanovit rozdělení hustoty, vyšetřovat relativní obsah složek v různých oblastech řezu, provádět geometrická kontrola struktury vícerozměrného armování, zviditelnit technologické defekty v různých stádiích výroby, racionalizovat technologický proces. V sendvičových systémech je možná nezávislá analýza prostorové struktury jednotlivých vrstev, lze ověřovat rovnoměrnost nanesení pojidla, tloušťky krycího povlaku aj.
- Tomografie *odlitků*; kontrola vnitřku lopatek plynových turbín, motorových dílů se složitou vnitřní prostorovou strukturou aj.
- Tomografie vysoce namáhaných *keramických dílů*; rozdělení hustoty materiálu v objemu součástek členitého tvaru (lokalizace vnitřních trhlin a dutin), identifikace malých odchylek geometrického tvaru.

První rentgenový počítačový tomograf pro technické účely byl u nás uveden do provozu na ČVUT v Praze. Školící a vzdělávací centrum rentgenové počítačové tomografie, organizované Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou, nabízí své zkušenosti s aplikacemi této nejnovější metody nedestruktivního výzkumu a kontroly makroskopické struktury materiálů i finálních výrobků širokému okruhu zájemců z výzkumných ústavů i průmyslových podniků.

Je elementární logika totéž co predikátová logika prvního řádu?

Jiří Fiala, Praha

Před nějakými dvěma lety se konala v Praze jednodenní konference s názvem *Co je logika?* Dopadlo to tak, jak jsem čekal: všichni hovořili o tom, co je to logika a nikdo nemluvil o tom, co je logika. Rozumějte: stejně jako když na otázku, co je to jazyk, se odpoví výkladem, co je to jazykověda. Nakonec jsem dospěl k názoru, že logika by mohla být jedinou vědou, která má za předmět samu sebe.

Quine v úvodu ke své *Filosofii logiky* uvádí dvě definice logiky. První je *ostensivní*: ukazuje, jak to v logice chodí, a Quine si vypůjčuje definici Tydlidkovu z Carrollovy *Alenky*:

Doc. RNDr. JIŘÍ FIALA, CSc. (1939), katedra matematické logiky a filosofie matematiky, MFF UK Praha.