

Simulace zpracování optické obrazové informace v Matlabu

Petr Páta, Miloš Klíma, Jaromír Schindler

Katedra radioelektroniky, K337, ČVUT FEL Praha, Technická 2, 166 27, Praha 6
E-mail: pata@fel.cvut.cz, klima@fel.cvut.cz, schindj@feld.cvut.cz

Optické zpracování obrazové informace je mocným a rychlým nástrojem vyhodnocení. S výhodou se při ní využívá přirozené implementace Fourierovy transformace známé z difrakce světla, elektrické neutrality nosičů informace – fotonů umožňující křížení svazku a masivně paralelního přístupu. Programové prostředí Matlab je využíváno k ověření a simulaci očekávaných výsledků. Zde jsou prezentovány jednotlivé úlohy demonstrující základní principy optického zpracování obrazové informace a jejich srovnání s naměřenými výsledky. V první řadě výpočet průběhu intenzity spektra, vlastností Fourierovy transformace, filtrace ve spektrální rovině a jiné úlohy.

1. Úvod

Optické obrazové systémy díky své podstatě nabízejí masivně paralelní nástroj ke zpracování obrazových dat [1]. Fotony, jako nosiče obrazové informace umožňují velice rychlý přenos informace a vzájemné křížení jednotlivých svazků. Jako velice zajímavé aplikace je možné uvést především analogové paralelní násobení, prostorovou a časovou integraci, přizpůsobenou filtraci a 2D korelaci. Zvláštní třídou optických procesorů jsou tzv. algebraické procesory, které umožňují provádět násobení matice x vektor a matice x matice. Jejich využití je možné nalézt např. pro Kalmanovy filtry. Tvar difrakčního integrálu a sama podstata difrakce světla umožňuje snadný výpočet 2D Fourierovy transformace a pro naše aplikace zajímavé 2D korelace. Numerický výpočet takových algoritmů je vysoce výpočetně a časově náročný. Jejich výpočet optickou cestou přinese radikální zvýšení výpočetního výkonu celé soustavy. V této souvislosti je zde uváděna aplikace Karhunenovy – Loeveho transformace a výpočet vlastních čísel a vektorů kovarianční matice transformace.

2. 2D Fourierova transformace

Fourierova transformace je přirozenou vlastností vlnové podstaty světla. Z jejího principu je jasné, že probíhá na jakékoliv struktuře – otvoru, transparenci nebo spojné čočce. Z Huygensova principu vyplývá, že libovolná vlna je tvořena kompozicí sférických vln. Neboli každý bod ležící na vlnoploše vlny se stává elementárním, bodovým, zdrojem záření vytvářejícím novou sférickou vlnu. S využitím tohoto faktu lze získat řešení Helmholtzovy rovnice ve tvaru známého Fresnelova integrálu

$$U(x_i, y_i, z_i) = \frac{e^{jkz}}{j\lambda z} \iint_{Apertura} U(x_0, y_0, z_0) e^{\frac{jk}{2z}[(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2]} dx_0 dy_0$$

V této rovnici je $U(x_0, y_0, z_0)$ je průběh transparence difrakované struktury, x_0, y_0, z_0 jsou souřadnice probíhající v rovině transparence, k vlnový vektor, x_i, y_i, z_i souřadnice v rovině stínítka, j imaginární jednotka a konečně z je vzdálenost stínítka od transparence.

Použijeme-li spojnu čočku k fokusaci spektrálních složek dojdeme k vyjádření Fourierovy transformace optickou cestou [2]

$$U(x_i, y_i, z_i) = e^{j\lambda f} e^{\frac{jk}{2f}(x_0^2 + y_0^2)} \iint_{\text{Apertura}} U(x_0, y_0, z_0) e^{-\frac{j2\pi}{\lambda f}[y_0 y_i + x_0 x_i]} dx_0 dy_0$$

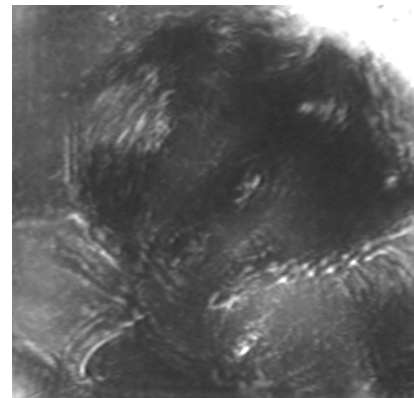
Z podoby rovnice je zřejmé, že spojná čočka s ohniskovou vzdáleností f provádí Fourierovu transformaci pole apertury A ve vzdálenosti právě rovné ohniskové vzdálenosti použité čočky. Této rovině se často také říká fourierovská rovina. Tato významná vlastnost spojně čočky je základem mnoha analogových optických výpočetních systémů.



obr. 1 Vstupní obrazová matice pro experimentální ověření filtrace



obr. 2 Filtrace dolní propustí optickou cestou.



obr. 3 Upravení vstupního obr. filtrem typu horní propust ve Fourierově spektrální rovině optickou cestou.

Příkladem robustnosti tohoto nástroje může být srovnání doby výpočtu Fourierovy transformace matice o rozměrech 64×64 bodů optickou a "digitální" cestou. Optimalizovanému procesoru trvá výpočet algoritmu FFT na zvolené matici v řádu 1 ms . Oproti tomu rychlost "optické implementace" FFT závisí pouze na rychlosti světla v použitém prostředí. S čočkou o ohniskové vzdálenosti $f = 10 \text{ cm}$ je výpočet proveden za $0,33 \text{ ns}$!

K ověření vlastností optické Fourierovy transformace byla vybrána filtrace ve spektrální rovině [3]. Na obr. 1 je zobrazena vstupní obrazová matice určená k simulaci filtrace ve spektrální rovině. Obr. 2 zachycuje výsledek po upravení filtrem typu dolní propust. Velikost terčiku filtru je možné zvolit analogicky s optickou cestou. Na obr. 3 jsou zachyceny výsledky po filtraci dolní, resp. horní, propustí optickou cestou. V experimentu byl použit červená laserová dioda s $\lambda = 659 \text{ nm}$, polarizační filtr, expander 50x, transparence o rozměrech $24 \times 36 \text{ mm}$, Fourierova spojná čočka $f = 80 \text{ cm}$, dvě rovinná zrcátka, zpětná Fourierova spojná čočka $f = 15 \text{ cm}$, CCD kamera, frame grabber, monitor a pro filtr typu horní propust terčík o vhodných rozměrech, pro dolní propust otvor vybírající pouze spektrální složky blízké základní harmonické.

3. Zdrojový kodér a rozbor jeho optické implementace

Velice důležité je zkoumat nové možnosti optické implementace vybraných algoritmů pro zpracování vědeckých obrazových dat, která jsou specifická svým charakterem:

- a) Vysoká bitová hloubka (14 – 16 bitů) na jeden obrazový bod.
- b) Velké rozměry (typicky více než 1000 x 1000 obr. bodů).
- c) Šedotónové nebo každý barevný kanál je zpracováván víceméně nezávisle.
- d) Jejich vyhodnocení a zpracování neprobíhá lidským zrakem, ale pomocí speciálních, objektivních, metod.

Jak je patrné z výše uvedených charakteristik vědeckých obrazových, je nutné při jejich zpracování využívat odlišných nástrojů oproti známým postupům ze zpracování multimediálních obrazových dat. K řešení byly použity tři různé metody:

- a) Teoretické odvození nezbytných vztahů a formulace úlohy.
- b) Simulace vybraných algoritmů v programovém prostředí MATLAB.
- c) Experimentální ověření vhodných závěrů.

Vybrané algoritmy důležité pro zpracování obrazových dat byly simulovány v programovém prostředí MATLAB. Zvláštní důraz byl kladen na implementaci Karhunenovy – Loeveho transformace vědeckých obrazových dat a její srovnání s ostatními integrálními transformacemi, výpočet autokorelační funkce dat, JTC a jiných. V praktické části řešení předkládaného projektu byly realizovány nezbytné experimenty pro ověření možnosti implementace simulovaných algoritmů optickou cestou.

Metody digitálního zpracování obrazu, které byly implementovány prováděné v Matlabu, byly rozděleny do několika základních tříd z těchto hledisek: přístup ke zpracování obrazové informace a vhodnost implementace algoritmů optickou cestou. Roztřídění z hlediska přístupu k obrazové informaci bylo realizováno takto:

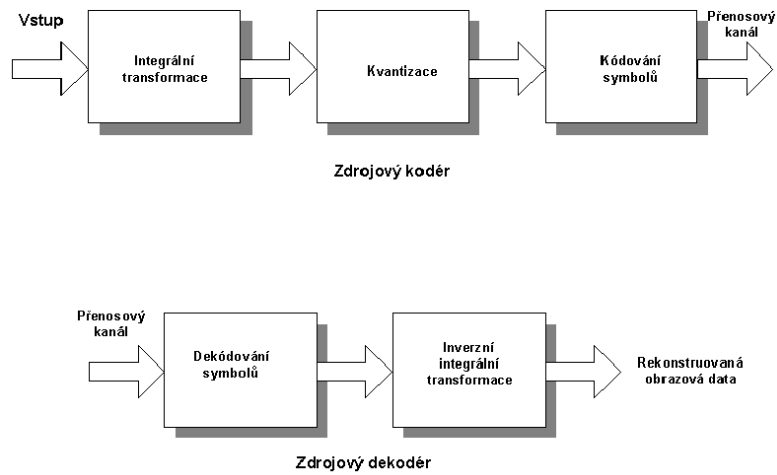
- a) Metody předzpracování zahrnující především multiplikativní a aditivní přístup k jednotlivým obrazovým bodům obrazové funkce.
- b) Algoritmy vědeckého zpracování obrazových dat zahrnující detekci objektů, měření jejich základních parametrů (profil, sigma atd.), PSF systému atd.
- c) Kompresce a kódování obrazu a její vliv na další možné zpracování. Formulace a hledání jeho případného vlivu na další zpracování.

Snadnost implementace popsaných algoritmů optickou nemusí být a zpravidla také není v přímém souladu s jejich digitální podobou. Jednotlivé metody byly roztrženy do těchto skupin:

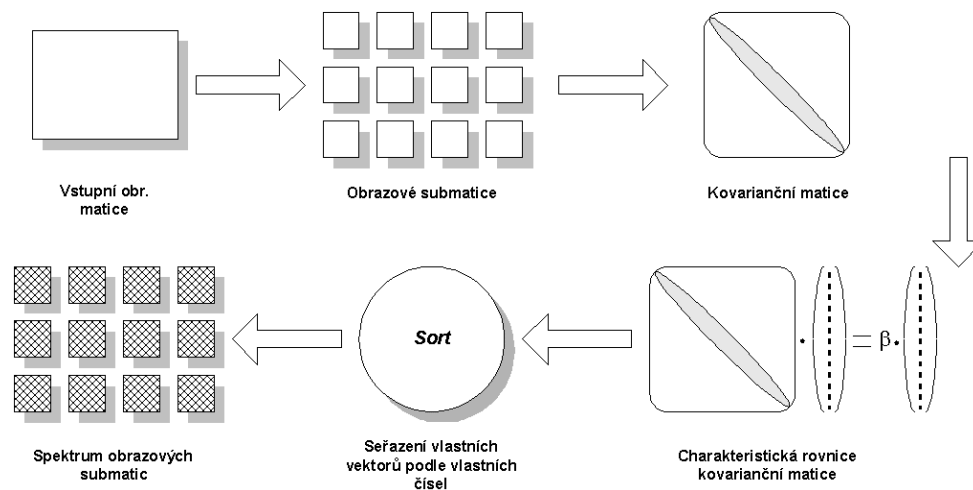
- a) Metody přístupující k obrazu v prostorové oblasti. Tato část zahrnuje především multiplikativní korekce. Tato část by mohla být realizována průchodem optického toku (obrazové funkce) vhodnou transparentí.
- b) Zpracování ve fourierovském spektru obrazové funkce. Do této části je možné zařadit především výpočet autokorelační funkce, JTC a filtrace obrazu. Filtrační

metody realizované prostřednictvím přizpůsobeného filtru je možné použít k dalšímu zpracování např. detekci objektů a odhadů profilu pozadí.

- c) Metody vyššího stupně. Do této kategorie byly zahrnuty metody výpočet JTC, KLT, waveletové metody a třeba odstranění blokové struktury optickou cestou.



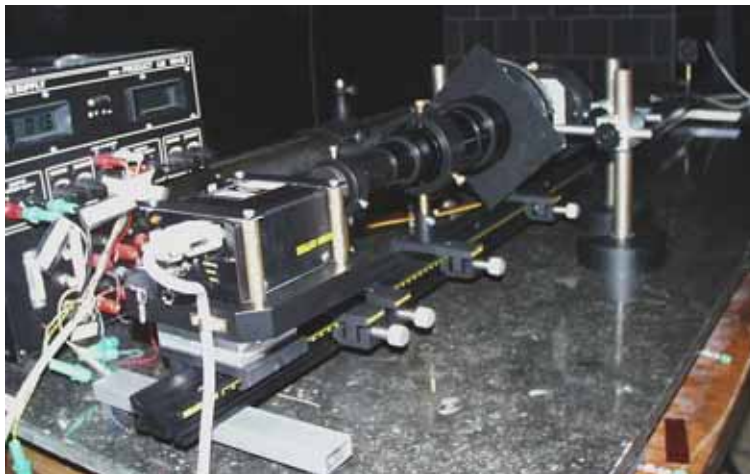
Obr. 4 Blokové schéma kodéru a zdrojového dekodéru



Obr. 5 Výpočet bazových vektorů kodéru založeného na KLT transformaci.

Ve druhé fázi byla provedena realizace vybraných algoritmů v programovém prostředí. Zvláštní důraz byl kladen na metody spadající do kategorie a) popsané výše. Výpočet Fourierovského spektra vědeckých byl realizován pro vybrané snímky. Postupy přizpůsobené filtrace byly testovány pro možnost odstranění blokové struktury vznikající po aplikaci Karhunenovy – Loeveho transformace s vysokým kompresním poměrem.

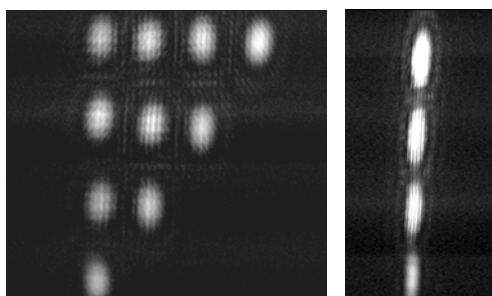
Algoritmy simulované v programovém prostředí Matlab byly ověřeny pomocí realizace vybraných experimentů (viz obr. 6). Ty především byly zaměřeny na optickou implementaci navržených algoritmů. Během řešení se ukázalo být žádoucí navázat a případně prohloubit diskusi optické ho zpracování dat. Zejména by bylo vhodné zaměřit se na aplikaci přizpůsobené filtrace jako estimátoru průběhu funkce pozadí, odstranění blokové struktury a možnosti využití optické implementace násobení matice vektor k simulaci výpočtu charakteristické rovnice.



Obr. 6 Realizace experimentu optického zpracování dat.

vektor	matice	výsledek
1 1 1 1	1 1 1 1	4
	1 1 1 0	3
	1 1 0 0	2
	1 0 0 0	1

a) algebraický vstup

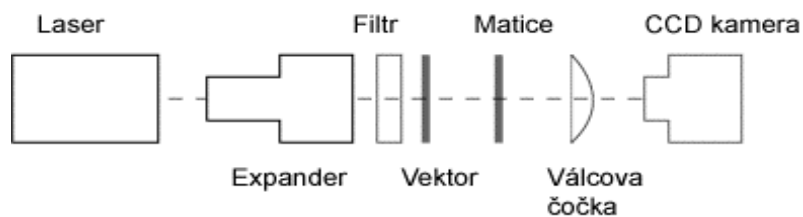


b) experimentální výsledek –
matice, výstupní vektor

Obr. 7 Násobení matice x vektor optickou cestou

3. Násobení matice, vektor

Jednoduché binární algebraické operace, především násobení matice x vektor a matice x vektor, je možné realizovat především díky výhodným optickým vlastnostem použitých prvků. Na obr. 8 je zobrazena sestava takového experimentu, který využívá fokusačních vlastností válcové čočky.



Obr. 8 Sestava pro optickou realizaci optického násobení.

Tento experiment byl v jednoduché podobě teoreticky simulován v Matlabu a posléze sestaven v optické laboratoři s výsledkem uvedeným na obr. 7 a) a 7b).

4. Závěr

Optické zpracování obrazové informace s sebou přináší výhodné a robustní přístupy. Zejména je možné uvést masivně paralelní přístup a vysokou výpočetní rychlost. Optické zpracování je ovšem také ovlivněno vysokou citlivostí na odstup šumového signálu od užitečného obrazového, která ovlivňuje zejména stabilitu numerických výpočtů a jejich rychlou konvergenci.

5. Literatura

- [1] Yu F.T., Gregory D.A., Optical Pattern recognition: Architectures and Techniques, Proc. of IEEE, 84, 5, May 1996, pp 733-752.
- [2] F.T.S.Yu, D.A.Gregory, Optical Pattern Recognition: Architectures and Techniques, Proc. IEEE, 84, 5, May 1996, pp 733-752.
- [3] P. Páta, M. Klíma, J. Kaiser, Využití prostředí MATLAB pro simulaci optického zpracování informace, Matlab, Praha, 2001.

6. Poděkování

Tato práce byla vytvořena v rámci projektu MŠMT číslo: No. J04/98: 210000022 "Laserové systémy".