

ELIMINACE VLIVU DRUHÉ ROTACE PŘI AFINNĚ INVARIANTNÍM 2D ROZPOZNÁVÁNÍ

*K. Nováková*¹, *J. Kukul*^{1,2}

¹ Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, ČVUT v Praze

² Ústav počítačové a řídicí techniky, VŠCHT Praha

Abstrakt

Invariantní rozpoznávání 2D binárních obrazů je často založeno na momentech obrazu. Ty umožňují konstrukci afinní transformace, která zajistí invarianci vůči posunutí, změně velikosti, první rotaci a protažení obrazu. Je však problém zajistit také invarianci vůči druhé rotaci. Článek se zabývá dvěma metodami, kterými lze dosáhnout vytvoření afinně invariantního rozpoznávacího systému s numericky stabilní eliminací druhé rotace. Modifikované obrazy, které systém používá, jsou získány pomocí polární nebo Radonovy transformace. Nové metody umožňují klasifikaci objektů nezávislou na úhlu pohledu pozorovatele, což má praktický význam v aplikacích počítačového vidění. Pro podporu metod byla vytvořena knihovna funkcí v prostředí MATLAB.

1 Úvod

V současné době se často diskutuje o rozpoznávání objektů, které by bylo nezávislé na jejich pozici, velikosti, orientaci a jiných transformacích obrazu. Tento článek navrhuje dvě nové metody pro binární klasifikaci afinně transformovaných objektů. Tyto metody využívají znalostí z článku Suka a Flussera [2], který pro rozpoznávání objektů navrhuje metodu založenou na momentech, která funguje dokonce i pro symetrické objekty. Většina jiných metod založených na momentech je při aplikaci na symetrické objekty neúspěšná, neboť mnoho momentů je nulových. Slabým místem této metody je však zajištění invariance vůči druhé rotaci, protože je hledán nenulový moment a to není v diskretním případě snadné. Alternativa pro dosažení invariance vůči druhé rotaci a zrcadlení je navržena v tomto článku jako aplikace polární nebo Radonovy transformace.

2 Základní afinní transformace

Dobře známá afinní transformace [1]

$$x' = a_0 + a_1x + a_2y \quad (1)$$

$$y' = b_0 + b_1x + b_2y \quad (2)$$

může být rozložena na šest jednoduchých transformací: posunutí o (x_0, y_0) , změna velikosti s faktorem $\omega > 0$, první rotace o úhel α , protažení s parametrem $\delta > 0$, druhá rotace o úhel β a případné zrcadlení. Pořadí transformací může být pozměněno, avšak protažení musí být provedeno mezi dvěma rotacemi. Suk a Flussier [2] navrhli metodu pro afinní normalizaci symetrických objektů. Jejich metoda je založena na centrálních momentech μ_{pq} a na komplexních momentech c_{pq} . Při normalizaci objektu se snažíme postupně eliminovat vliv dílčích transformací. Předpokládejme, že základní umístění těžiště je v počátku souřadnic. Potom může být posunutí (x_0, y_0) zjištěno z pozice těžiště. Dále je řešen vliv isotropní změny velikosti, přičemž zvětšovací faktor je dán jako

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{\mu_{00}}}. \quad (3)$$

Pro analýzu první rotace byl použit komplexní moment c_{20} . Úhel první rotace vypočítáme

$$\alpha = -\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{\Im(c_{20})}{\Re(c_{20})}\right) = -\frac{1}{2} \arctg\left(\frac{2\mu_{11}}{\mu_{20} - \mu_{02}}\right) \quad (4)$$

a parametr protažení je

$$\delta = \sqrt{\frac{\mu_{20} + \mu_{02} - \sqrt{(\mu_{20} - \mu_{02})^2 + 4\mu_{11}^2}}{2\sqrt{\mu_{20}\mu_{02} - \mu_{11}^2}}}. \quad (5)$$

Hlavním problémem je eliminace vlivu druhé rotace. Mnoho momentů symetrických objektů je nulových. Autoři [2] navrhli normalizaci, která je založená na prvním nenulovém komplexním momentu. Tato metoda je ale kvůli diskretizaci citlivá na falešné nulové momenty. V posloupnosti komplexních momentů je totiž pro normalizaci zvolen první nenulový moment, přičemž jakýkoli moment, jehož velikost je menší než práh, je v diskrétním případě považován za nulový. Hlavní nevýhodou je, že určení optimální hodnoty prahu může být problematické.

3 Eliminace vlivu druhé rotace

Výsledek základní afinní transformace není jednoznačný. Výsledný 2D binární obraz může být však již pouze otočený o libovolný úhel nebo převrácený. Pro získání afinně invariantního rozpoznávacího obrazu je tedy nutné rotačně invariantní zpracování. Pro konverzi rotace na posunutí byly použity dvě transformace: polární transformace a Radonova transformace.

3.1 Párování vzorů založené na polární transformaci

Polární a Radonova transformace jsou definovány na speciálních množinách funkcí

$$\mathcal{P}_2 = \{p : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}\}, \quad (6)$$

$$\mathcal{Q}_2 = \{q : \mathbb{R}_0^+ \times [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}\}. \quad (7)$$

Nechť $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \{0, 1\}$ reprezentuje 2D objekt. Nechť $f_{\text{AFF}} : \mathbb{R}^2 \rightarrow \{0, 1\}$ je odpovídající afinně transformovaný obraz s momenty $\mu_{10} = \mu_{01} = \mu_{11} = 0$, $\mu_{20} = \mu_{02} = 1$. Definujme-li maximální poloměr jako

$$\rho_f = \max\{\|\bar{x}\|_2 \mid f_{\text{AFF}}(\bar{x}) > 0\}, \quad (8)$$

můžeme použít polární transformaci $Po : \mathcal{P}_2 \rightarrow \mathcal{Q}_2$ definovanou jako

$$q(r, \varphi) = Po(p(x, y)) = p(r \cos \varphi, r \sin \varphi), \quad (9)$$

abychom získali alternativní binární obraz $f_{\text{POL}} : [0, 1] \times [0, 2\pi] \rightarrow \{0, 1\}$ jako

$$f_{\text{POL}}(r, \varphi) = Po(f_{\text{AFF}}(\rho_f x, \rho_f y)) = f_{\text{AFF}}(\rho_f r \cos \varphi, \rho_f r \sin \varphi). \quad (10)$$

Libovolná rotace obrazu f_{AFF} okolo počátku tedy způsobí posunutí f_{POL} ve druhém směru φ . Ale funkce f_{POL} je ve druhém směru periodická s periodou 2π a posunutí tedy musí být realizováno s periodickým prodloužením. Afinně invariantní párování obrazů může být realizováno pomocí míry nepodobnosti $d(f, g)$ mezi dvěma binárními objekty f, g . Nejprve vypočítáme

$$d_{\text{DIR}}(f, g) = \min_{0 \leq \Delta\varphi \leq 2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (f_{\text{POL}}(r, \varphi) - g_{\text{POL}}(r, \varphi + \Delta\varphi))^2 dr d\varphi \quad (11)$$

a

$$d_{\text{INV}}(f, g) = \min_{0 \leq \Delta\varphi \leq 2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (f_{\text{POL}}(r, 2\pi - \varphi) - g_{\text{POL}}(r, \varphi + \Delta\varphi))^2 dr d\varphi. \quad (12)$$

Výsledná nepodobnost je definována jako

$$d(f, g) = \min(d_{\text{DIR}}(f, g), d_{\text{INV}}(f, g)). \quad (13)$$

Nechť f je neznámý obraz a g_1, \dots, g_N je pevná množina vzorů. Afinně invariantní párování vzorů využívá vektor $\bar{p} = (p_1, \dots, p_N)$, kde $p_k = d(f, g_k)$. Tato procedura bude nazývána afinně invariantní polární párování (AIPM – Affine Invariant Polar Matching).

3.2 Párování vzorů založené na Radonově transformaci

Začneme s definicí Radonovy transformace $Ra : \mathcal{P}_2 \rightarrow \mathcal{Q}_2$ jako

$$q(s, \vartheta) = Ra(p(x, y)) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} p(x, y) \delta(x \cos \vartheta + y \sin \vartheta - s) dx dy. \quad (14)$$

Definujeme-li $R(s, \vartheta) = Ra(f_{\text{AFF}}(\rho_f x, \rho_f y))$ a $M_{\text{AFF}} = \max_{s, \vartheta} R(s, \vartheta)$, obdržíme šedý obraz $f_{\text{RAD}} : [0, 1] \times [0, 2\pi] \rightarrow [0, 1]$ ve formě

$$f_{\text{RAD}}(s, \vartheta) = \frac{R(s, \vartheta)}{M_{\text{AFF}}}. \quad (15)$$

Opět tedy získáme posunuté obrazy ve druhém směru (označeném jako ϑ). Afinně invariantní párování je založené na vztahu

$$d^*(f, g) = \min(d_{\text{DIR}}^*(f, g), d_{\text{INV}}^*(f, g)), \quad (16)$$

kde

$$d_{\text{DIR}}^*(f, g) = \min_{0 \leq \Delta\vartheta \leq 2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (f_{\text{RAD}}(s, \vartheta) - g_{\text{RAD}}(s, \vartheta + \Delta\vartheta))^2 ds d\vartheta \quad (17)$$

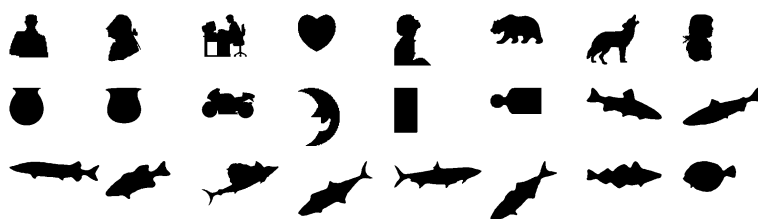
a

$$d_{\text{INV}}^*(f, g) = \min_{0 \leq \Delta\vartheta \leq 2\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} (f_{\text{RAD}}(s, 2\pi - \vartheta) - g_{\text{RAD}}(s, \vartheta + \Delta\vartheta))^2 ds d\vartheta. \quad (18)$$

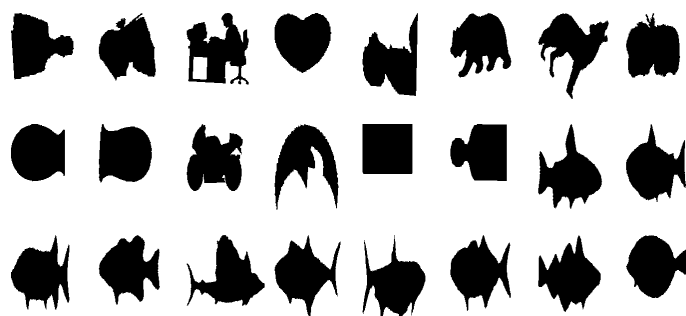
Při afinně invariantním párování je využíván vektor $\bar{p}^* = (p_1^*, \dots, p_N^*)$, kde $p_k^* = d^*(f, g_k)$. Tato procedura bude nazývána afinně invariantní Radonovo párování (AIRM – Affine Invariant Radon's Matching).

4 Výsledky

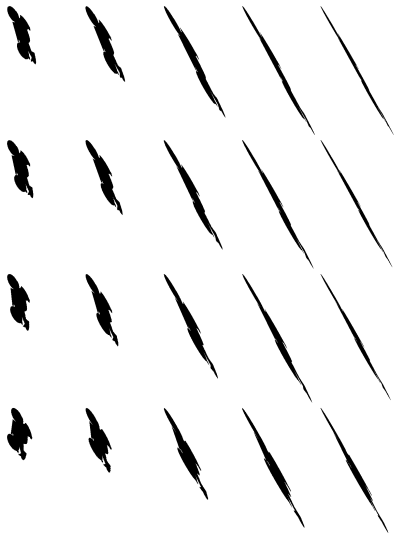
Obě metody byly testovány na vzorech se známou klasifikací. Byla zvolena množina dvaceti čtyř tříd binárních 2D obrazů. Každá třída byla reprezentována originálem (obr. 1) a zvoleným



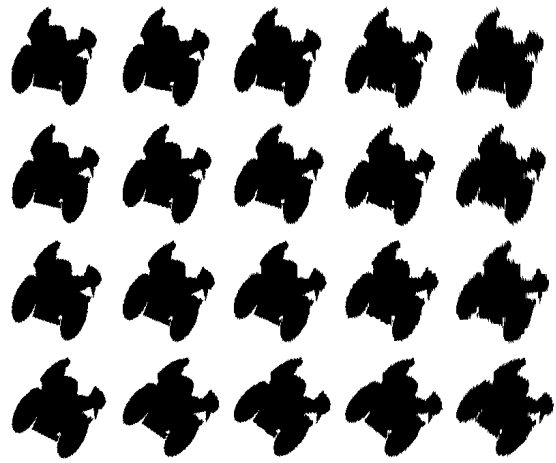
Obrázek 1: Výchozí množina vzorů (24 tříd)



Obrázek 2: Vzory po základní afinní transformaci

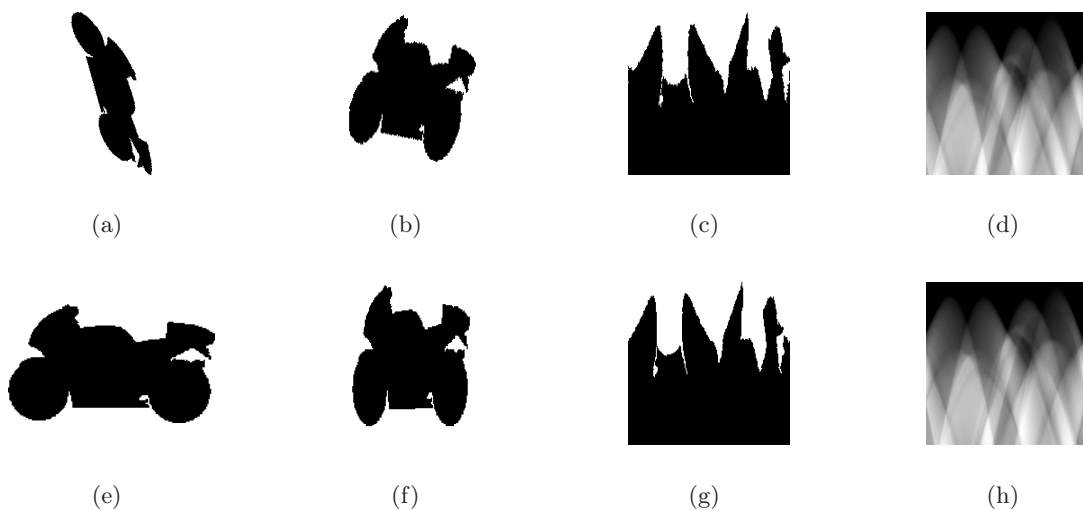


Obrázek 3: Obrazy z jedenácté třídy



Obrázek 4: Obrazy z jedenácté třídy po základní afinní transformaci

počtem (100) jeho afinně deformovaných obrazů. Výsledky základní afinní transformace původních reprezentantů třídy (vzorů) jsou zobrazeny na obr. 2. Negativní vliv druhé rotace je demonstrován na vzorech z jedenácté třídy. Afinně deformované obrazy jsou zobrazeny na obr. 3, zatímco jejich základní afinní transformace jsou na obr. 4. Výsledné obrazy mají stejnou velikost a tvar, ale bohužel jsou otočené. Tyto obrazy byly transformovány polární (10) nebo Radonovou (15) transformací a byly vypočítány nepodobnosti (13) nebo (16). Celý proces rozpoznávání je demonstrován na obr. 5. Původní obrazy f , g (obr. 5(a), 5(e)) jsou transformovány základní afinní transformací (obr. 5(b), 5(f)) a následně polární transformací, abychom získali f_{POL} , g_{POL} (obr. 5(c), 5(g)), nebo Radonovou transformací, abychom získali f_{RAD} , g_{RAD} (obr. 5(d), 5(h)). Obrázky 5(a), 5(b), 5(c), 5(d) odpovídají neznámému vzoru a obrázky 5(e), 5(f), 5(g), 5(h) jsou získané z prototypu (originálu) jedenácté třídy.



Obrázek 5: Kroky při klasifikaci neznámého vzoru

Afinně invariantní momenty (AMI) jsou statistické příznaky, které byly odvozeny v článku [3]. Zde je prezentována množina deseti nezávislých afinně invariantních momentů do pátého řádu a je doporučena pro využití při praktických aplikacích rozpoznávání obrazů. AMI poskytují ve většině případů dostatečnou diskriminabilní schopnost.

Tabulka 1: Vliv první rotace a protažení

Afinní transformace		N_{MO}		
α	δ	AIPM	AIRM	AMI
$\frac{\pi}{6}$	1,5	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	1
	4	0	0	2
	5	0	0	2
$\frac{\pi}{5}$	1,5	0	0	0
	2	0	0	0
	3	0	0	1
	4	0	0	0
	5	0	0	1
$\frac{\pi}{4}$	1,5	0	0	1
	2	0	0	0
	3	0	0	1
	4	0	0	2
	5	0	1	2
$\frac{\pi}{3}$	1,5	0	0	1
	2	0	0	0
	3	0	0	0
	4	0	0	1
	5	0	0	2

Tabulka 2: Vliv obou rotací a protažení

Afinní transformace		N_{MO}		
δ		AIPM	AIRM	AMI
1,5		0	0	13
2		0	0	8
3		0	0	15
4		0	0	37
5		2	4	92

Testovací množina byla vygenerována s náhodným posunutím $(x_0, y_0) \in \langle 0, 1 \rangle^2$, s pevnými parametry $\omega = 1$ a $\beta = \frac{\pi}{3}$, s různými úrovněmi protažení ($\delta \in \{1, 5; 2; 3; 4; 5\}$) a s úhly první rotace ($\alpha \in \{\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{5}, \frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{3}\}$), abychom získali 20 deformovaných vzorů pro každou třídu (480 neznámých vzorů, ale pouze 24 reprezentantů tříd). Frekvence chybně klasifikovaných objektů (N_{MO}) jsou pro různé rozpoznávací přístupy (AIPM, AIRM, AMI) porovnány v tab. 1. Druhý experiment byl proveden se stejnými úrovněmi protažení, ale s 20 náhodnými úhly rotace α a β , s náhodným posunutím $(x_0, y_0) \in \langle 0, 1 \rangle^2$ a $\omega = 1$ pro každou třídu a úroveň protažení (2400 neznámých vzorů ze 24 tříd). Výsledný počet chybně klasifikovaných objektů je pro dvě nové metody také velmi optimistický (tab. 2). Tabulky 3 – 5 zobrazují klasifikaci jednotlivých obrazů z 24 tříd. V tab. 3 můžeme vidět, které dva obrazy byly chybně přiřazeny k jiným reprezentantům, pokud byla použita klasifikace na základě obrazů po polární transformaci. Tab. 4 zobrazuje tři třídy, z nichž celkem čtyři obrazy byly přiřazeny do špatných tříd při použití klasifikace na základě obrazů po Radonově transformaci. Poslední tab. 5 ukazuje celkem 165 obrazů, které nebyly zařazeny do správných tříd při použití klasifikace na základě afinně invariantních momentů. Jsou zde také vidět třídy, do kterých byly obrazy chybně zařazeny.

5 Závěr

Byly navrženy dvě metody pro klasifikaci binárních objektů, které jsou založeny na afinní normalizaci (Suk, Flusser [2]), na polární nebo Radonově transformaci a na míře nepodobnosti. Obě metody jsou invariantní vůči afinní transformaci, přičemž přínosem je nový způsob zajištění invariance vůči druhé rotaci a zrcadlení. Spolehlivost obou metod byla testována na umělých obrazech (24 tříd, 2400 deformovaných vzorů) a chyba klasifikace byla menší než 2 ‰.

Poděkování

Tato práce byla vypracována za podpory programu č. MSM 6046137306 Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky.

Reference

- [1] R. Gonzalez, R. Woods. *Digital Image Processing*. Prentice-Hall, New Jersey, 2001
- [2] T. Suk, J. Flusser. *Affine Normalization of Symmetric Objects*. Lecture Notes in Computer Science, 3708, pp. 100-107, 2005.
- [3] T. Suk, J. Flusser. *Graph method for generating affine moment invariants*. Proc. ICPR 2004, IEEE Computer Society, pp. 192-195, 2004

Kateřina Nováková
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
ČVUT v Praze
katka.novakova@dc.fjfi.cvut.cz

Jaromír Kukal
Ústav počítačové a řídicí techniky
VŠCHT Praha
jaromir.kukal@vscht.cz

Tabulka 3: Klasifikace objektů na základě obrazů po polární transformaci

Originál	Klasifikace																										
	Člověk	Šlechtic	Programátor	Srdce	Sfinga	Medvěd	Vlk	Slečna	Nádoba	Mísa	Motorka	Měsíc	Obdélník	Prkénko	Ryba 1	Ryba 2	Ryba 3	Ryba 4	Ryba 5	Ryba 6	Ryba 7	Ryba 8	Ryba 9	Ryba 10			
Člověk	100																										
Šlechtic		100																									
Programátor			100																								
Srdce				100																							
Sfinga					100																						
Medvěd						100																					
Vlk							100																				
Slečna								100																			
Nádoba									99	1																	
Mísa										100																	
Motorka											100																
Měsíc												100															
Obdélník													100														
Prkénko														100													
Ryba 1															100												
Ryba 2																100											
Ryba 3																	100										
Ryba 4																		99				1					
Ryba 5																			100								
Ryba 6																				100							
Ryba 7																					100						
Ryba 8																						100					
Ryba 9																							100				
Ryba 10																								100			

