

فصل 18

کاربردهای فازی در تشخیص لبه

18-1: مقدمه

پردازش تصاویر دیجیتال شامل طیف گسترده‌ای از موضوعات مانند استفاده از هیستوگرام تصویر، فیلترکردن، قطعه‌بندی، تشخیص اشیا در تصویر، بازیابی و فشرده‌سازی تصاویر می‌باشد.

تشخیص لبه‌ها در تصاویر، از مهمترین مراحل تشخیص اشیا برای پردازشهای بعدی در تصویر و نیز اخذ تصمیم در روشهای بینایی ماشین است که به دلیل اهمیت فوق‌العاده آن، در این فصل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

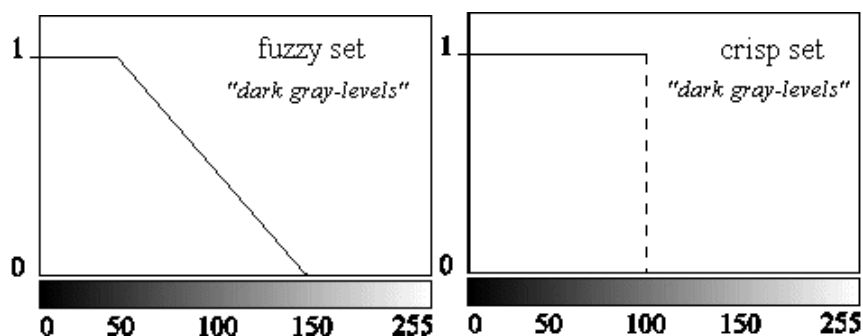
در بسیاری از موضوعات پردازش تصویر و بینایی ماشین، شک و ابهام وجود دارد. این ابهامات دارای دلایل متعددی همچون ابهام ذاتی نمونه‌های تصویری، آسیب‌دیدن ویژگی تصویر حین به‌دست آوردن و استفاده از آن، قطعی‌نبودن تعریف یک شیء، اطلاعات مبهم در مورد اشیا و موقعیتهایشان می‌باشد. برای رفع این‌گونه ابهامات نیازمندیم تا به ویژگیهای سطح بالایی که انسان در تحلیل صحنه‌ها و تشخیص تصاویر به کار می‌برد، دست پیدا کنیم. تئوری مجموعه‌های فازی، مکانیزم طبیعی و مفیدی را برای مدل‌سازی این تردیدها و ابهامات ارائه می‌کند. انعطاف‌پذیری و قدرتی که به وسیله این روشها برای ارائه دانش فراهم می‌گردد، باعث می‌شود تا سیستمهای قاعده-پایه فازی، کارآمدتر و مفیدتر از سیستمهای قاعده-پایه سنتی عمل کنند.

فرض کنید که می‌خواهیم یک مجموعه از سطوح خاکستری تاریک را (برای تشخیص لبه‌ها یا آستانه‌گیری) تعریف کنیم. در تئوری مجموعه سنتی، یک آستانه تعیین می‌شود. مثلاً سطح خاکستری 100 را در نظر می‌گیریم تا سطوح خاکستری مابین صفر و 100 عضو این مجموعه باشند و بقیه سطوح به این مجموعه تعلق نداشته باشند.

اما باید توجه داشت که تاریکی شامل درجات مختلف است. بنابراین با استفاده از یک مجموعه فازی، ویژگیها را بهتر مدل می‌کنیم. برای تعریف این مجموعه، به دو حد آستانه نیاز داریم. مثلاً سطوح خاکستری 50 و 150 را مطابق شکل 18-1 در نظر می‌گیریم. همه سطوح خاکستری که کمتر از 50 هستند، عضو قطعی این مجموعه بوده، همه سطوح

خاکستری بیشتر از 150 عضو این مجموعه نمی‌باشند. سطوح خاکستری مابین 50 و 150 نیز دارای یک عضویت نسبی در مجموعه خواهند بود.

برای انجام فعالیتهای بینایی در سطح بالا مانند فهم و درک تصویر، نیاز داریم تا تمامی ویژگیها و خصوصیات نواحی مکانی تصویر را بیان کنیم. سیستمهای فازی برای رسیدن به این اهداف، بسیار مناسب هستند.



شکل 18-1: مفهوم سطوح خاکستری تاریک در مجموعه‌های قطعی و فازی

به عنوان مثالی دیگر، به عبارت زیر توجه کنید:

اگر ناحیه‌ای از تصویر خیلی نویزی باشد، باید یک عملگر هموارکننده با پنجره بزرگ را به تصویر اعمال کرد.

مشخص است که هم در عبارت مقدم و هم در عبارت تالی این قانون، ابهام وجود دارد. عبارت تالی بیانگر انجام یک عمل فازی است. با ساختاربندی مناسب قوانین فازی در عبارات شرطی می‌توانیم این نوع از اطلاعات را مدل نماییم.

18-2: تشخیص لبه

از آنجا که یکی از مهمترین جنبه‌های تحقیقات دانشمندان، ساخت ماشینهایی با قابلیت دیدن و تشخیص محیط پیرامون خود است، سعی می‌شود تا با استفاده از ویژگیهای سطح پایینی چون رنگ، بافت و لبه، به استفاده از ویژگیهای سطح بالایی که انسان در تحلیل صحنه‌ها از آنها استفاده می‌کند برسیم. در این میان ویژگی لبه از اهمیت بسیاری برخوردار

است. معمولاً به هرگونه ناپیوستگی و تغییر سریع در رنگ، بافت و شدت روشنایی تصویر، لبه می‌گویند. لبه‌ها حاوی اطلاعات مهمی از تصویر هستند و می‌توانند ویژگی و شکل اجسام را بیان کنند. اهمیت لبه‌ها در تصویر به حدی زیاد است که سیستم بینایی انسان از یک مرحله پیش‌پردازش برای آشکارسازی لبه استفاده می‌کند.

در سال 1995 تعریفی توسط جین¹ برای لبه ارائه شد: یک نقطه متعلق به لبه، مکان نقطه‌ای را مشخص می‌کند که در آنجا تغییرات روشنایی محلی مهم و پرمعنایی وجود دارد. یک قطعه لبه، یک مجموعه از نقاط لبه است و در واقع، یک تشخیص‌دهنده لبه مجموعه نقاط لبه یا قطعه‌های لبه را ایجاد می‌کند.

در روشهای کلاسیک تشخیص لبه، ماکزیممهای محلی گرادیان تصویر به عنوان نماینده مناسب برای لبه در نظر گرفته می‌شوند. لبه‌یاب رابرتز²، سوبل³ و پرویت⁴ به این دسته تعلق دارند. محاسبه گرادیان سوبل در حوزه مکان صورت می‌گیرد.

از دیگر الگوریتمهای کارآمد در این حوزه، لبه‌یاب کنی⁵ است که به خاطر داشتن قابلیت دنبال‌کردن لبه‌ها و نیز توانایی حذف نویز تصویر به کمک فیلتر گوسی، کاربرد زیادی دارد. همچنین الگوریتمهایی برای آشکارسازی لبه‌ها در حوزه فرکانس توسط مار-هیلدرت⁶ (1980) و سیدیکو-بارنر⁷ (1998) ارائه شده است. الگوریتم مار-هیلدرت در حوزه تبدیل لاپلاس، نقاط عبور از صفر مشتق دوم تصویر را به عنوان لبه در نظر می‌گیرد.

روشهای دیگری نیز برای لبه‌یابی تصویر به کار می‌روند که در آنها از مباحث *رایانش نرم*⁸ استفاده شده است. به عنوان مثالهایی از این دسته، می‌توان به لبه‌یاب‌های مبتنی بر تنوری فازی، نروفازی و الگوریتم مورچه‌ها اشاره کرد.

¹ Jain

² Roberts

³ Sobel

⁴ Prewitt

⁵ Canny

⁶ Marr-Hildreth

⁷ Siddique-Barner

⁸ Soft computing

در ادامه فصل به بررسی روشهای مختلفی برای تشخیص لبه و نیز برای اتصال و اصلاح قطعه‌های لبه خواهیم پرداخت.

18-3: تشخیص فازی لبه

باتوجه به تعاریف موجود برای لبه، چندین موقعیت برای فازی کردن برداشت موجود از یک لبه، ممکن می‌باشد. از آنجا که متغیرهای موقعیت مکانی و روشنایی هر پیکسل درگیر حل مسئله هستند، دارای انعطاف در استفاده از روش مناسب می‌باشیم. برخی از تشخیص‌دهنده‌های لبه، به مشخص کردن دقیق پیکسلهایی که جزو نقاط لبه هستند می‌پردازند و برخی دیگر، از مجموعه‌های فازی برای بیان موقعیت مکانی لبه‌ها استفاده می‌کنند. این نقاط در هر دو مورد، لبه فازی نامیده می‌شوند. می‌توانیم یک نقطه لبه (با مکان دقیقاً مشخص شده) را به‌طور دقیق (سیاه یا سفید) یا فازی (سایه‌های خاکستری) ببینیم. برای هر یک از این موارد، مدلهای فازی زیادی وجود دارد تا ناحیه‌هایی از تصویر را که به لبه‌ها مربوط می‌شوند شناسایی کنند.

18-3-1: روشهای کلی تشخیص

با در نظر گرفتن نحوه عملکرد تشخیص لبه‌ها و اصول مجموعه‌های فازی، روشهای تشخیص لبه فازی معمولاً مبتنی بر این ایده‌ها هستند:

1. تعریف تابع عضویت مناسب

2. تشخیص لبه فازی براساس قوانین مناسب

ساده‌ترین راه برای تشخیص لبه، استفاده از یک تابع عضویت برای تعیین لبه‌بودن در هر همسایگی می‌باشد. توابع مختلفی را می‌توان به عنوان تابع عضویت در نظر گرفت. مثالی از یک تابع عضویت در زیر دیده می‌شود:

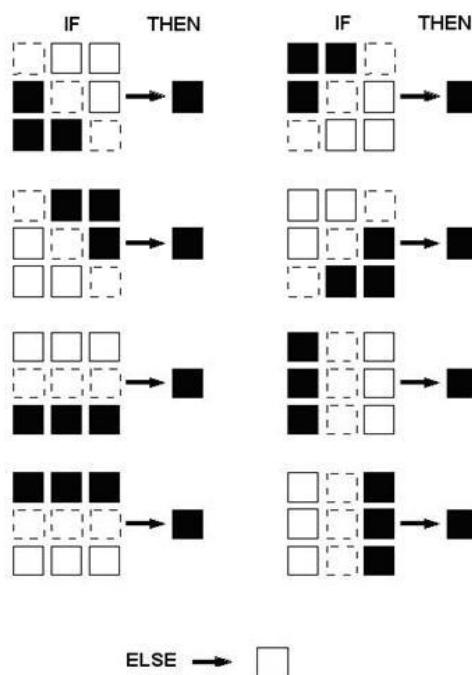
$$\mu_{Edge}(g(x, y)) = \frac{1}{1 + \frac{\sum_N |g(x, y) - g(i, j)|}{\Delta}}$$

شکل 18-2 نشان‌دهنده تصویری است که لبه‌های آن با استفاده از تابع عضویت فرمول ذکرشده، تشخیص داده شده‌اند.



شکل 18-2: تشخیص لبه با استفاده از یک تابع عضویت دلخواه

همچنین، با استفاده از قوانین If-Then فازی مناسب، می‌توان تشخیص‌دهنده‌های لبه را در همسایگی‌های تعیین‌شده تعریف کرد. شکل 18-3 نمونه‌ای از قوانینی که می‌توان برای مشخص کردن یک پیکسل لبه در یک همسایگی 3×3 تعریف کرد را نشان می‌دهد.



شکل 18-3: قوانین فازی برای تعیین پیکسل لبه

شکل 18-4 نشان‌دهنده مثالی در تشخیص لبه تصویر می‌باشد که با استفاده از قوانین مطرح‌شده (در شکل 18-3) انجام شده است.



شکل 18-4: تشخیص لبه‌های تصویر با استفاده از یک روش Rule based

18-3-2: تشخیص لبه به کمک تفریق فازی

این روش لبه‌یابی تصاویر با سطوح خاکستری کار می‌کند. در این روش، از یک ماسک برای مشخص کردن همسایگی نقاط استفاده می‌شود که با لغزاندن آن روی تمام نقاط تصویر، عمل لبه‌یابی انجام می‌شود. نحوه شماره‌گذاری پیکسل‌های ماسک در شکل 18-5 نشان داده شده است. نقطه مرکزی این ماسک (نقطه P_9) براساس مقادیر نقاط همسایه، تعیین وضعیت می‌شود تا تعلق یا عدم تعلق آن به لبه مشخص گردد.

P_1	P_2	P_3
P_8	P_9	P_4
P_7	P_6	P_5

شکل 18-5: ماسک مورد استفاده در تشخیص لبه با تفریق فازی

در هر مرحله ابتدا شش زوج دسته از نقاط همسایه در نظر گرفته می‌شوند که در هر دسته، دو گروه غیرهمپوشان از نقاط با نامهای T_1 و T_2 تعریف شده‌اند. این نقاط در تقابل با یکدیگر می‌باشند و انتخاب غیرهمپوشان آنها، تفاوت مقادیر نقاط اطراف نقطه مرکزی را برای هر دسته محاسبه می‌کند.

دسته‌بندی نقاط مطابق زیر انجام می‌شود:

$$T_1 = (p_1, p_2, p_3), T_2 = (p_7, p_8, p_9) \quad \text{دسته اول:}$$

دسته دوم: $T_1 = (p_3, p_6, p_9), T_2 = (p_1, p_4, p_7)$

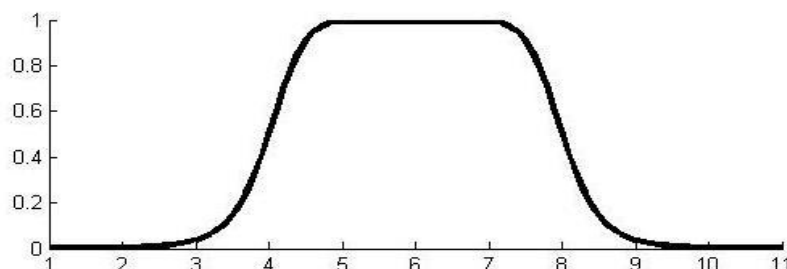
دسته سوم: $T_1 = (p_1, p_2, p_3, p_6), T_2 = (p_4, p_7, p_8, p_9)$

دسته چهارم: $T_1 = (p_2, p_3, p_6, p_9), T_2 = (p_1, p_4, p_7, p_8)$

دسته پنجم: $T_1 = (p_3, p_6, p_9, p_8), T_2 = (p_1, p_2, p_4, p_7)$

دسته ششم: $T_1 = (p_6, p_7, p_8, p_9), T_2 = (p_1, p_2, p_3, p_4)$

ابتدا برای هر کدام از دسته‌بندیهای شش‌گانه، براساس شدت روشنایی نقاط گروه T_1 و T_2 ، یک تابع عضویت زنگی شکل¹ (مشابه شکل 18-6) به نامهای f_{T_1} و f_{T_2} ساخته می‌شود.



شکل 18-6: تابع عضویت زنگی (زنگوله‌ای) شکل

پارامترهای تابع عضویت برای گروه T_1 مطابق زیر تعیین می‌شوند:

$$\text{MaxM} = \max \{I(p_x) \mid p_x \in T_1\}, \quad \text{MinM} = \min \{I(p_x) \mid p_x \in T_1\}$$

$$a = \text{MaxM} - \text{MinM}, \quad b = \text{Constant}, \quad c = \text{Average} (\{I(p_x) \mid p_x \in T_1\})$$

I تابع شدت روشنایی و $\{a, b, c\}$ پارامترهای لازم برای تشکیل تابع زنگی شکل گروه T_1

می‌باشند. پارامترهای تابع عضویت گروه T_2 به طریق مشابه تعیین می‌شود.

پس از تشکیل توابع عضویت گروه‌ها، اختلاف این دو تابع عضویت را با استفاده از تفریق فازی محاسبه می‌کنیم. این اختلاف با یک مقدار آستانه مقایسه می‌شود تا در صورت بیشتر بودن از آن مقدار، نقطه میانی ماسک به عنوان لبه در نظر گرفته شود.

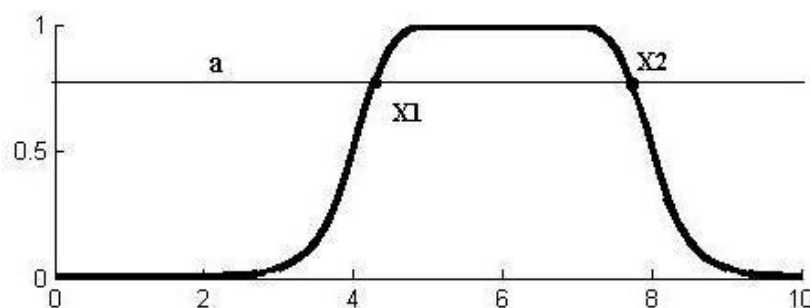
اگر نقطه مرکزی ماسک حتی در یکی از دسته‌ها به عنوان لبه معرفی شود، در نهایت به عنوان لبه در نظر گرفته می‌شود. رابطه ریاضی بیانگر تابع زنگی شکل، مطابق زیر می‌باشد:

¹ Bell shape

$$f(X; a, b, c) = \left(1 + \left| \frac{X - c}{a} \right|^{2b} \right)^{-1}$$

با توجه به اندازه هسته و انعطاف‌پذیر بودن این تابع از لحاظ شیب صعود از صفر به یک، می‌توان این تابع را انتخاب مناسبی برای انجام محاسبات دانست.

در روش موجود برای محاسبه اختلاف دو تابع عضویت زنگی‌شکل، از برشهای α استفاده شده است. معادله معکوس تابع عضویت زنگی‌شکل، به ازای هر مقدار α دو جواب دارد که محل برخورد برش α و تابع تعلق زنگی‌شکل را مشخص می‌کنند. در شکل 18-6، x_1 و x_2 نشان‌دهنده نقاط مذکور می‌باشند.



شکل 18-7: نتیجه برش α و ایجاد جوابهای x_1 و x_2

اگر f_{T1} را به عنوان تابع تعلق اول و f_{T2} را به عنوان تابع تعلق دوم در نظر بگیریم، تفریق این دو تابع تعلق در محل برش α با رابطه زیر تعریف می‌شود:

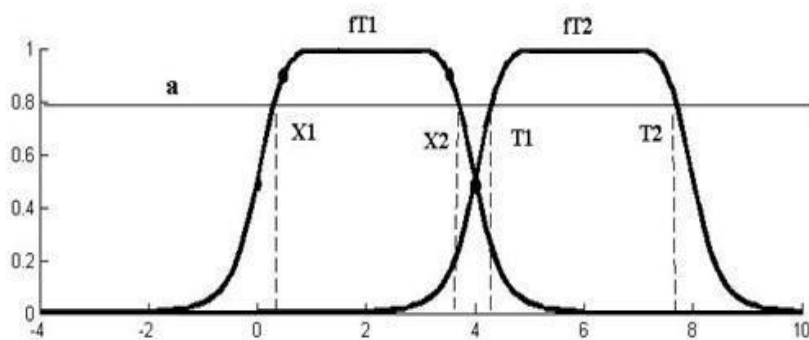
$$d = \int_0^1 g(\alpha) \left[(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} d\alpha$$

در این رابطه، پارامتر d اختلاف میان دو تابع f_{T1} و f_{T2} را نشان می‌دهد و x_1 و x_2 جوابهای معکوس تابع تعلق f_{T1} و y_1 و y_2 جوابهای معکوس f_{T2} به ازای برش α هستند:

$$x_1, x_2 = f_{T1}^{-1}(\alpha) \quad y_1, y_2 = f_{T2}^{-1}(\alpha)$$

مطابق شکل 18-8 با ایجاد برشهای مختلف α از صفر تا یک، اختلاف توابع تعلق در هر برش محاسبه می‌شود که با گرفتن انتگرال در این بازه، می‌توان اختلاف کل دو تابع تعلق را به دست آورد.

در انتخاب تابع g باید نکاتی را مدنظر داشت. تابع $g(\alpha)$ باید صعودی باشد تا تاثیر اختلاف توابع تعلق، به ازای برشهای نزدیک به قله، بیشتر از برشهای دورتر از قله باشد. این مطلب بدین معناست که هر چه برشهای α به عدد یک نزدیکتر شوند، اختلاف توابع تعلق در آن برش، تاثیر بیشتری بر اختلاف کل می‌گذارد. با انتخاب ضابطه مناسب برای $g(\alpha)$ می‌توان عملگر تفریق دلخواه و مناسبی ایجاد کرد.



شکل 18-8: نقاط تلاقی برش α برای توابع تعلق f_{T1} و f_{T2}

می‌توان با انتخاب حد آستانه متفاوت، لبه‌های نازک یا ضخیمی را با خصوصیات مختلف ایجاد کرد. شکل 18-9 نتیجه حاصل از انجام تفریق فازی را برای دو حد آستانه متفاوت با تابع g به رابطه $g(\alpha) = \alpha^2$ نشان می‌دهد.



شکل 18-9: تصویر اولیه و دو تصویر لبه با استفاده از تفریق فازی با دو حد آستانه متفاوت

18-3-3: تشخیص لبه به کمک سیستم تصمیم گیرنده فازی

در ادامه کار، یک روش در تشخیص لبه با کارایی بالا که براساس سیستم تصمیم گیری فازی عمل می کند را مورد بررسی قرار می دهیم.

روش کار به این صورت است که در ابتدا با استفاده از مقادیر گرادیان و انحراف معیار پیکسلها، دو لبه جداگانه برای تصویر یافته و از این لبه ها به عنوان ورودی سیستم فازی استفاده می کنیم تا سیستم فازی با توجه به این لبه ها و با استفاده از قوانین فازی، در مورد لبه بودن یا نبودن پیکسلها تصمیم گیری نماید.

باید توجه داشت که استفاده توأم از این دو پارامتر، ضریب اطمینان روش پیشنهادی را بالا می برد و از بروز خطاهای False Positive و False Negative جلوگیری می کند.

مفهوم False Positive به این معناست که برخی از پیکسلهای غیر لبه (نامعتبر) ممکن است سهواً به عنوان لبه در نظر گرفته شوند. در نقطه مقابل، False Negative بدین معناست که برخی لبه های واقعی، تشخیص داده نشده و به اشتباه نامعتبر تلقی شوند. هدف روش این است که با استفاده از قوانین فازی بهترین تصمیم ممکن اتخاذ شود.

ابتدا گرادیان را برای پیکسلهای تصویر به دست آورده و محلهایی را که در آنها تغییرات گرادیان از یک سطح آستانه بیشتر باشد، به عنوان کاندیدای لبه در نظر می گیریم. برای این مرحله از عملگر سوبل استفاده شده است.

در گام بعدی از انحراف معیار یا پراکندگی سطح روشنایی پیکسلها استفاده می کنیم. در شکل 18-10 نحوه شماره گذاری ماسک مورد استفاده برای این قسمت دیده می شود که یکی دیگر از شیوه های مرسوم شماره گذاری را نشان می دهد (مقایسه با شکل 18-5).

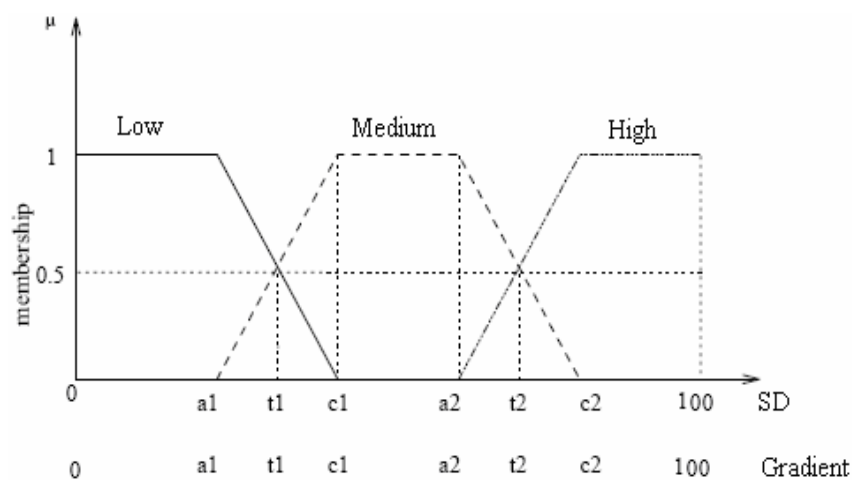
P_1	P_2	P_3
P_4	P_5	P_6
P_7	P_8	P_9

شکل 18-10: ماسک مورد استفاده برای محاسبه انحراف معیار

مقدار محاسبه‌شده را به عنوان مقدار انحراف معیار پیکسل P_5 نسبت به همسایه‌هایش در نظر می‌گیریم. برای استفاده از این سیستم فازی، در ابتدا باید برای هرکدام از ورودیها توابع عضویت مناسبی تعریف شده باشد. در اینجا همه مقادیر انحراف معیار و گرادیان را به پیکسلهای مختلف در بازه $[0,100]$ نگاشت می‌دهیم. سپس برای هرکدام از ورودیها سه کلاس کم، متوسط و زیاد در نظر می‌گیریم که در مورد انحراف معیار، به ترتیب با نمادهای SD_L ، SD_M و SD_H نمایش داده شده است. رابطه بیانگر این کلاسها در فرمولهای صفحه بعد دیده می‌شود.

برای جداسازی سطوح مختلف از چهار سطح آستانه $0 \leq a_1 < c_1 < a_2 < c_2 \leq 100$ استفاده می‌شود، به‌گونه‌ای که برای مقادیر انحراف معیار در بازه $[0, c_1]$ ، پیکسل متعلق به کلاس SD_L ، برای بازه $[a_1, c_2]$ متعلق به کلاس SD_M و برای بازه $[a_2, 100]$ متعلق به کلاس SD_H خواهد بود.

مقادیر t_1 و t_2 بیانگر نقاطی هستند که در آنها به ترتیب $\mu(SD_L) = \mu(SD_M) = 0.5$ و $\mu(SD_M) = \mu(SD_H) = 0.5$ می‌باشد. کلیه مطالب بیان‌شده، در شکل 11-18 نمایش داده شده است.



شکل 11-18: توابع عضویت مربوط به کلاسهای مختلف انحراف معیار و گرادیان

اگر مقدار انحراف معیار (گرادیان) یک پیکسل برابر k در نظر گرفته شود، آنگاه مقدار عضویت آن پیکسل به هر کدام از کلاسها با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$SD_L(k) = \begin{cases} 1 & k \leq a_1 \\ \frac{k - c_1}{a_1 - c_1} & a_1 < k \leq c_1 \\ 0 & c_1 < k \end{cases}$$

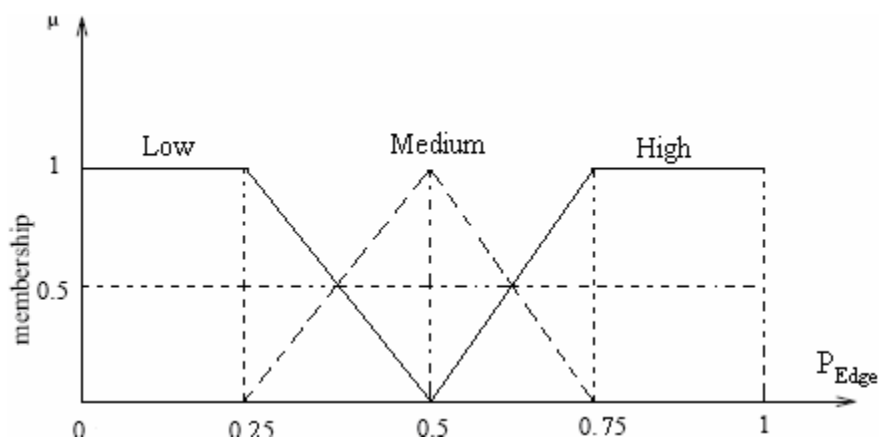
$$SD_M(k) = \begin{cases} 0 & k \leq a_1 \\ \frac{k - a_1}{c_1 - a_1} & a_1 < k \leq c_1 \\ 1 & c_1 < k \leq a_2 \\ \frac{k - c_2}{a_2 - c_2} & a_2 < k \leq c_2 \\ 1 & c_2 \leq k \end{cases}$$

$$SD_H(k) = \begin{cases} 0 & k \leq a_2 \\ \frac{k - a_2}{c_2 - a_2} & a_2 < k \leq c_2 \\ 1 & c_2 < k \end{cases}$$

همین روابط برای محاسبه مقدار گرادیان هم برقرار می‌باشد. برای گرادیان هم به صورت مشابه کلاسهای G_L ، G_M و G_H در نظر گرفته شده است که توابع عضویت آنها، مشابه با توابع عضویت کلاسهای انحراف معیار تعریف می‌شود.

خروجی سیستم فازی باید به‌گونه‌ای باشد که با توجه به آن بتوان احتمال لبه‌بودن هر پیکسل را به دست آورد. برای خروجی این سیستم هم سه کلاس در نظر گرفته می‌شود که میزان لبه‌بودن را نشان می‌دهند. اگر خروجی متعلق به کلاس E_L باشد، آنگاه میزان لبه‌بودن کم است و اگر متعلق به E_M باشد، میزان لبه‌بودن متوسط و در صورتی که متعلق به E_H باشد

میزان لبه‌بودن زیاد خواهد بود. توابع عضویت خروجی برای این سیستم فازی در شکل 12-18 نمایش داده شده است.



شکل 12-18: تابع عضویت خروجی سیستم فازی (میزان تعلق پیکسل به کلاسهای لبه)

برای تصمیم‌گیری نهایی، باید قوانین فازی را از روی ورودیها استخراج نمود. در صورتی که مقدار انحراف معیار یک پیکسل برابر k_1 و مقدار گرادیان آن برابر k_2 باشد، قوانین فازی بهینه به صورت زیر می‌باشند:

- 1) If k_1 in SD_L and k_2 in G_L then P_{Edge} in E_L
- 2) If k_1 in SD_L and k_2 in G_M then P_{Edge} in E_L
- 3) If k_1 in SD_L and k_2 in G_H then P_{Edge} in E_M
- 4) If k_1 in SD_M and k_2 in G_L then P_{Edge} in E_H
- 5) If k_1 in SD_M and k_2 in G_M then P_{Edge} in E_H
- 6) If k_1 in SD_M and k_2 in G_H then P_{Edge} in E_M
- 7) If k_1 in SD_H and k_2 in G_L then P_{Edge} in E_M
- 8) If k_1 in SD_H and k_2 in G_M then P_{Edge} in E_M
- 9) If k_1 in SD_H and k_2 in G_H then P_{Edge} in E_H

برای ابهام‌زدایی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم:

$$P_{Final} = \sum (P_{Edge}(j) \times C_j)$$

که در آن، $P_{Edge}(j)$ مقدار عضویت یک پیکسل در کلاس j ام را نشان داده و C_j

نمایانگر مرکز کلاس j ام می‌باشد. باید به این نکته توجه داشت که اگر P_{Edge} در بازه

$[0,0.375]$ باشد، متعلق به کلاس E_L است و اگر در بازه $[0.375,0.625]$ باشد، متعلق به کلاس E_M بوده و در نهایت اگر در بازه $[0.625,1]$ باشد، متعلق به کلاس E_H خواهد بود. P_{Final} نیز عددی در بازه $[0,1]$ است که مقدار نهایی در لبه‌بودن پیکسل مورد نظر را نشان می‌دهد. مراکز کلاسه‌های مختلف را با توجه به شکل 18-12 می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$C_L = 0.25, C_M = 0.5, C_H = 0.75$$

اما برای تصمیم‌گیری نهایی به یک سطح آستانه T نیاز داریم، به‌نحویکه اگر $P_{Final} > T$ آنگاه پیکسل مورد نظر به عنوان پیکسل لبه در نظر گرفته شود، اما در صورت برآورده‌نشدن این شرط، به عنوان پیکسل پس‌زمینه دسته‌بندی شود. با سعی و خطا مقدار بهینه برای T برابر با $0/5$ به دست می‌آید.

برای توضیح بیشتر از یک مثال ساده استفاده می‌شود. اگر مقدار انحراف معیار برای یک پیکسل پس از نگاشت برابر با 75 بوده و مقدار گرادیان آن نیز برابر با 30 باشد، با توجه به این نکات و انتخاب دیگر مقادیر شکل 18-11 خواهیم داشت:

$$a_1=12, c_1=37, a_2=62, c_2=87, k_1=75, k_2=30$$

$$\mu(SD_H)=0.5, \mu(SD_M)=0.5, \mu(SD_L)=0$$

$$\mu(G_H)=0, \mu(G_M)=0.72, \mu(G_L)=0.28$$

با توجه به این مقادیر، واضح است که فقط مقادیر قوانین فازی 4، 5، 7 و 8 غیر صفر بوده و بقیه قوانین خودبه‌خود از محاسبات حذف می‌شوند. با توجه به اینکه رابطه موجود در قوانین فازی از نوع عطف می‌باشد، پس مقادیر عضویت در یکدیگر ضرب می‌شوند. مقادیر نهایی با توجه به قوانین فازی موجود در زیر نمایش داده شده‌اند.

$$4- P_{Edge} = \mu(SD_M) \times \mu(G_L) = 0.5 \times 0.28 = 0.14 \Rightarrow P_{Edge} \text{ in } E_H$$

$$5- P_{Edge} = \mu(SD_M) \times \mu(G_M) = 0.5 \times 0.72 = 0.36 \Rightarrow P_{Edge} \text{ in } E_H$$

$$7- P_{Edge} = \mu(SD_H) \times \mu(G_L) = 0.5 \times 0.28 = 0.14 \Rightarrow P_{Edge} \text{ in } E_M$$

$$8- P_{Edge} = \mu(SD_H) \times \mu(G_M) = 0.5 \times 0.72 = 0.36 \Rightarrow P_{Edge} \text{ in } E_M$$

حال با استفاده از رابطه‌های مطرح‌شده خواهیم داشت:

$$P_{Final} = (0.14 \times 0.75) + (0.36 \times 0.75) + (0.14 \times 0.5) + (0.36 \times 0.5) = 0.67$$

همانطور که ملاحظه می‌شود اگر سطح آستانه نهایی T را برابر 0/5 بگیریم آنگاه پیکسل مورد نظر نهایتاً به عنوان لبه انتخاب می‌شود.

18-4: تشخیص لبه ایمن در برابر نویز

روسو¹ و رمپونی² (1994) تشخیص‌دهنده لبه‌ای را ارائه کردند که در برابر نویز مقاوم بود. قبل از بیان چگونگی تشخیص لبه با استفاده از این روش، لازم است تا برخی تعریفها و نمادها که در این قسمت استفاده می‌شود را شرح دهیم.

در اینجا $IJ = \{(i, j) : i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n\} \subset R^2$ یک آرایه از اعداد صحیح است که موقعیت مکانی (m, n) پیکسلها را تعیین می‌کند. در مواردی ممکن است از ij به جای (i, j) استفاده بشود.

همچنین فرض می‌شود که $Q = \{q : q = 0, 1, \dots, G-1\} \subset R$ مجموعه شامل اعداد صحیح از 0 تا $G-1$ باشد. G مجموعه‌ای از سطوح خاکستری از برخی توابع تصویر $P : R^p \rightarrow R^q$ است. مثلاً برای تصاویر 6 بیتی، $G=2^6=64$ و برای تصاویر 12 بیتی، $G=2^{12}=4096$ است.

مطابقت دادن p با آرایه IJ ، تصویر دیجیتالی $m \times n$ را ایجاد می‌کند که با P_{IJ} نشان داده می‌شود. در واقع یک پنجره W_{ij} مربوط به پیکسلهای ij در هر تصویر، یک زیرمجموعه از آرایه ij است. بنابراین یک پنجره، یک مجموعه از آدرسهای با ابعاد $m_w \times n_w$ می‌باشد. فرض خواهیم کرد که مرکزیت W_{ij} وقتی که m_w و n_w اعداد فرد هستند، در پیکسل ij قرار دارد. اکثر سیستمهای Rule based بردارهای ویژگی مورد نیاز برای پردازش تصویر را از W_{ij} استخراج می‌کنند.

¹ Russo

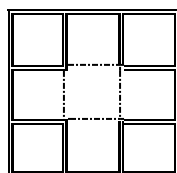
² Ramponi

همانطور که گفته شد این تشخیص دهنده در برابر نویز امنیت دارد. این روش مبتنی بر روش کلی IF-THEN- ELSE می باشد که از تفاوت های سطوح خاکستری در یک همسایگی 3×3 به عنوان ورودی های قوانین فازی استفاده می کند.

فرض کنید که x_i پیکسل مرکزی یک پنجره را نشان می دهد و برای $j = 1, \dots, 8$ داریم:

$$X_i = I(X_i) - I(X_j)$$

شکل 13-18 شمای مورد استفاده را برای $x_j = 1, \dots, 8$ نشان می دهد. در این روش از x_j ، برای $j = 1, \dots, 8$ به عنوان متغیرها در عبارتهای مقدم Rule based استفاده می شود.



شکل 13-18: استفاده از پیکسل مرکزی x_i یک پنجره

به طور معمول میزان امکان فعال شدن (α_i) برای هر قانون i به صورت زیر می باشد:

$$R_i : \alpha_i(x) = \bigotimes (m_i(x)) = m_{lk_1}^i(x_1) \bigotimes \dots \bigotimes m_{pk_{pi}}^i(x_{pi})$$

که در اینجا از عملگر \bigotimes برای میانگین گیری استفاده می شود. بنابراین داریم:

$$\alpha_i(x) = \frac{1}{pi} \left(\sum_{j=1}^{pi} m_{jpi}^i(x_j) \right)$$

همچنین فرض کنید $\alpha_T(x)$ به معنای میزان امکان فعال کردن M قانون اول باشد و

$$\alpha_E(x) = \alpha_{M+1}(x)$$

به معنای توان فعال کردن قانون Else بوده، که به صورت زیر می باشد:

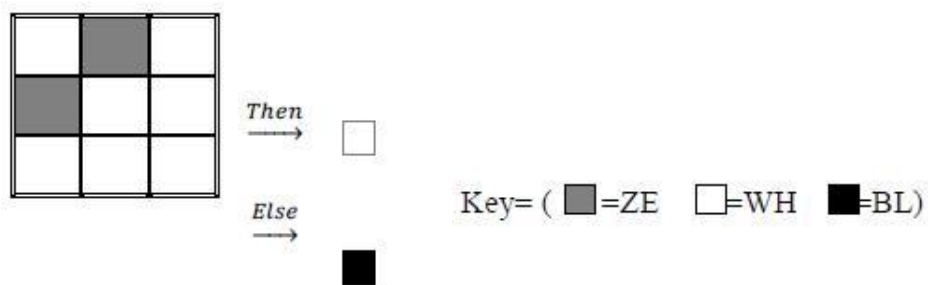
$$\alpha_T(x) = \max_{m \in [1, \dots, M]} (\alpha_m(x))$$

$$\alpha_E(x) = \alpha_{M+1}(x) = 1 - \alpha_T(x)$$

با ارائه یک مثال به ادامه بحث خواهیم پرداخت.

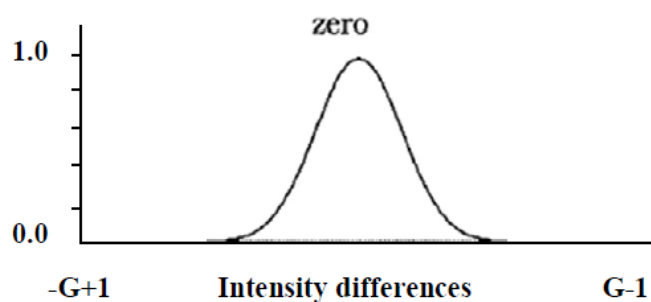
قانون R_8 به صورت ترسیمی در شکل 14-18 بیان شده است. این تشخیص‌دهنده لبه از 4 قانون موجود در مجموعه قوانین ذکر شده استفاده می‌کند. برای $k = 2, 4, 6, 8$ قانون R_k را مطابق زیر خواهیم داشت:

IF	x_k	IS	zero
AND	$x_k \bmod 8 + 2$	IS	zero
THEN	$I(x_i)$	IS	white
ELSE	$I(x_i)$	IS	black

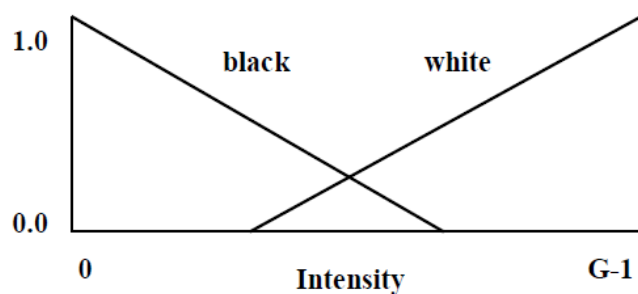


شکل 14-18: نمایش یک قانون فازی از سیستم پیشنهادی

در شکل‌های 15-18 و 16-18 توابع عضویت برای صفر، سیاه و سفید با مقادیر روشنایی بین 0 و 1-G مطابق روش مطرح شده توسط روسو و رمپونی نشان داده شده است.



شکل 15-18: PMFs¹ برای تشخیص‌دهنده لبه روسو و رمپونی



شکل 16-18: CMFs² برای تشخیص‌دهنده لبه روسو و رمپونی

در شکل 17-18 می‌توان نتیجه حاصل از اعمال این تشخیص‌دهنده لبه را به یک تصویر اولیه مشاهده کرد. تصویر ورودی در قسمت الف این شکل دیده می‌شود. خروجی حاصل از این تشخیص‌دهنده لبه، در قسمت ب آورده شده است. نتیجه نهایی اعمال یک حد آستانه روی تصویر قسمت ب، در قسمت پ به نمایش درآمده است.



شکل 17-18: تشخیص لبه با استفاده از روش روسو و رمپونی. الف) تصویر اصلی ب) خروجی تشخیص‌دهنده لبه پ) نتیجه بعد از اعمال حد آستانه

¹ Premise Membership Function (PMF)

² Membership Function Consequent (MFC)

18-5: تشخیص سریع لبه فازی

عمده روشهایی که در تشخیص لبه استفاده می‌شوند دارای حجم بالای محاسباتی بوده و پیاده‌سازی آنها به زمان زیادی نیاز دارد. در اینجا با توجه به نقش تعیین‌کننده زمان در تشخیص لبه‌ها، چند تشخیص‌دهنده سریع لبه‌ها، با استفاده از منطق فازی برای مواردی خاص (جایی که یک تصویر لبه ضخیم و ناهموار در یک زمان کوتاه مورد نیاز است) معرفی شده‌اند. در توسعه این مدل از تشخیص‌دهنده‌های فازی، توابع عضویت و قوانین ساده فازی استفاده می‌شود.

18-5-1: تصاویر به عنوان مجموعه‌های فازی

فرض کنید تصویر X با ابعاد $M \times N$ ، مجموعه‌ای از همه پیکسل‌های $g_{mn} \in [0, L]$ باشد. علاوه بر این، X را می‌توان به عنوان یک آرایه از نقاط فازی $\mu_{mn} \in [0, L]$ که تعیین‌کننده درجه روشنایی هر سطح خاکستری g_{mn} باشد در نظر گرفت.

$$X = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{\mu_{mn}}{g_{mn}}$$

تابع عضویت μ_{mn} را می‌توان به وسیله یک نرمال‌سازی ساده (فرمول زیر) بین مقادیر ممکن دیگری نیز به دست آورد:

$$\mu_{mn} = \frac{g_{mn}}{\max_{ij} g_{ij}} \quad i \in [1, M], j \in [1, N]$$

تصویر X شامل همه لبه‌های زیر است:

$$X' = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{\hat{\mu}_{mn}}{g_{mn}}$$

که $\hat{\mu}_{mn}$ میزان لبه‌بودن برای هر پیکسل را مشخص می‌کند. این وظیفه تشخیص‌دهنده لبه است که مقدار تابع عضویت $\hat{\mu}_{mn}$ را برای هر پیکسل تعیین نماید. در ادامه مطالب، راههای مختلفی برای تشخیص سریع لبه ارائه شده است.

18-5-2: توابع عضویت جدید

اولین گام در تعریف یک تشخیص‌دهنده لبه، تعیین تابع عضویت $\hat{\mu}_{mn}$ برای هر پیکسل g_{mn} در مکان (m, n) با یک پنجره مکانی $w \times w$ می‌باشد. تعیین تابع عضویت الزاماً یکتا نیست و تعریف آن به فرمهای مختلفی امکان‌پذیر است. تعریف و کارایی یک تشخیص‌دهنده لبه، ارتباط مستقیمی با توابع عضویت تعریف‌شده و نیز ویژگیهای عمومی همسایگی لبه دارد. یک مثال برای تابع عضویت، رابطه زیر است که بر مبنای تفاوت سطح خاکستری در هر همسایگی عمل می‌کند:

$$\hat{\mu}_{mn} = 1 - \frac{1}{1 - \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^w |g_{ij} - g_{mn}|}$$

$$= \frac{\sum_i \sum_j |g_{ij} - g_{mn}|}{\Delta + \sum_i \sum_j |g_{ij} - g_{mn}|}$$

در اینجا $\Delta \in [0, L]$ یک پارامتر مناسب است به‌طوری‌که مقادیر در بازه $[L/2, L]$ دارای معنا می‌باشند. نتایج حاصل در شکل 18-18 با استفاده از این تابع عضویت و مقادیر مختلف برای Δ دیده می‌شود.

امتیاز اینکه میزان لبه‌بودن، با یک تابع عضویت فازی بیان شود در این است که تئوری مجموعه فازی، قابل اعمال برای تغییرات بعدی (در تعمیم و گسترش سیستمها) می‌باشد.



ب

الف

پ

شکل 18-18: تشخیص لبه. الف) تصویر اولیه، ب) $\Delta=128$ پ) $\Delta=255$

برای ایجاد یک تشخیص‌دهنده لبه قویتر، باید توابع عضویت را با دقت بیشتری طراحی کرد. موارد متعددی را می‌توان برای این امر لحاظ نمود. مثلاً برای یک همسایگی لبه، اگر تشخیص دهیم که تفاوت بین ماکزیمم و مینیمم سطوح خاکستری زیاد است، این مسئله می‌تواند به علت نویزی بودن محیط نیز اتفاق افتاده باشد که کنترل این موضوع باعث حذف لبه‌های ناشی از نویز می‌شود اما پیچیدگی محاسبات و افزایش در زمان را نیز در پی دارد. لذا فرض می‌کنیم که روشنایی پیکسل مرکزی برای یک همسایگی لبه مناسب، دقیقاً بین ماکزیمم و مینیمم سطوح خاکستری قرار داشته باشد. بیان این مطلب به عنوان یک قانون ساده فازی مطابق توضیحات زیر است:

If the difference between g_{min} and g_{max} IS high,
And the center pixel IS equal mean/median,
Then the edginess IS high.

W یک همسایگی تعریف شده $w \times w$ برای پیکسل مرکزی g_{mn} است، توابع عضویت برای

همسایگی به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\hat{\mu}_{mn}^1 = \min \left(1, \frac{\max_{i,j \in [1,w]} W(i,j) - \min_{i,j \in [1,w]} W(i,j)}{\Delta_1} \right)$$

$$\hat{\mu}_{mn}^2 = 1 - \min \left(1, \frac{g_{mn} - \text{MeanMed } W(i,j)}{\Delta_2} \right)$$

که MeanMed در اینجا میانگین یا میانه می‌باشد. همچنین $\Delta_1 > l/4$ و $\Delta_2 < l/4$ مرزهای بامعنایی برای پارامترها می‌باشند. با استفاده از نرم‌های ساده t ، نمای لبه با روابط مختلفی قابل تعریف خواهد بود. می‌توان از مقدار مینیمم در توابع عضویت استفاده کرد:

$$X' = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{\min(\hat{\mu}_{mn}^1, \hat{\mu}_{mn}^2)}{g_{mn}}$$

یا رابطه را با استفاده از عملگر حاصل ضرب تعریف نمود:

$$X' = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{\hat{\mu}_{mn}^1 \times \hat{\mu}_{mn}^2}{g_{mn}}$$

شکل 18-19 نتیجه حاصل از لبه‌یابی برای اپراتور مینیمم با $\Delta_1 = 128$ (قسمت الف) و برای اپراتور حاصل ضرب با $\Delta_2 = 32$ (قسمت ب) را نشان می‌دهد.



ب

الف

شکل 18-19: تشخیص لبه. الف) عملگر مینیمم ب) عملگر حاصل ضرب

3-5-18: متمم فازی

متمم فازی برای یک تصویر را مطابق رابطه زیر تعریف می‌کنیم:

$$\bar{X}' = 1 - X' = \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N \frac{1 - \hat{\mu}_{mn}}{g_{mn}}$$

و میزان فازی بودن یک تصویر لبه را با γ نشان می‌دهیم که مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma(\bar{X}') = \frac{2}{MN} \bigcup_{m=1}^M \bigcup_{n=1}^N T(\hat{\mu}_{mn}, 1 - \hat{\mu}_{mn})$$

که T می‌تواند هر نرم دلخواهی از t باشد. باید دقت داشت که چون مقادیر عضویت به طور جزئی لحاظ می‌شوند، اشتراک هر تصویر لبه با تصویر بدون لبه متمم آن، الزاماً یک مجموعه تهی نمی‌باشد. این نکته در مثال بعد مورد بررسی قرار گرفته است.

فرض کنید که یک لبه بهینه در همسایگی تعریف شده 3×3 برای W مطابق زیر باشد:

$$W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 50 & 50 & 50 \\ 100 & 100 & 100 \end{bmatrix}$$

مقادیر تابع عضویت مکانی می‌تواند به وسیله تقسیم مقادیر همه پیکسلها بر ماکزیمم روشنایی موجود محاسبه شود:

$$\mu = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

که از روی آن، متمم فازی به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$1 - \mu = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

و اشتراک لبه با متمم آن به صورت زیر می‌باشد:

$$\mu - (1 - \mu) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

روشن است که مقدار این اشتراک تهی نیست. در حالت بهینه، اشتراک تصویر لبه با متمم آن، مقادیر بالایی را برای پیکسلهای متعلق به لبه‌ها و مقادیر پایینی را برای دیگر پیکسلها برمی‌گرداند. لبه‌ها دو ناحیه مختلف را جدا می‌کنند و به هر دو آنها تعلق دارند که مقدار عضویت $0/5$ دقیقاً این مطلب را نشان می‌دهد.

از آنجا که ما فقط یک لبه بهینه داریم، ماتریس عضویت متمم فازی فقط برای سطر یا ستون خاصی شامل تغییرات زیاد در مقادیر سطح خاکستری می‌باشد. یک میزان لبه‌بودن می‌تواند در یک همسایگی $w \times w$ مطابق زیر تعریف شود:

$$\hat{\mu}_{mn} = \min \left(1, \frac{2}{w} \sum_i \sum_j T(\mu_{ij}, 1 - \mu_{ij}) \right)$$

که T بیانگر یک نرم t است. در اینجا نیز می‌توان از نرمهای مختلفی مانند عملگر مینیموم یا عملگر حاصلضرب استفاده نمود:

$$\hat{\mu}_{mn} = \min \left(1, \frac{2}{w} \sum_i \sum_j \min(\mu_{ij}, 1 - \mu_{ij}) \right)$$

$$\hat{\mu}_{mn} = \min \left(1, \frac{2}{w} \sum_i \sum_j \mu_{ij} \times (1 - \mu_{ij}) \right)$$

از آنجا که محاسبه مکانی مقادیر تابع عضویت، به نويز حساس است، می‌توان تابع را بسط داده و آن را در مقابل نويز قويتر کرد. یک راه ممکن این است که مقادیر عضویت را بعد از ساختن متمم فازی، با فرمول زیر تصحیح کنیم:

$$\hat{\mu}_{mn} = \min \left(1, \frac{2}{w} \sum_i \sum_j \min(\mu_{ij}, 1 - \mu_{ij}) \right) \times \left(\frac{\max_{spatial}(g_{ij}) - \min_{spatial}(g_{ij})}{\max_{global}(g_{mn})} \right)$$

در این حالت، μ_{ij} یک نرمال‌سازی ساده است. در روش دیگر، مقادیر عضویت را قبل از ایجاد متممهای فازی تصحیح می‌کنیم:

$$\hat{\mu}_{mn} = \min \left(1, \frac{2}{w} \sum_i \sum_j \min(\mu_{ij}, 1 - \mu_{ij}) \right)$$

اما برای این روش، μ_{ij} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\hat{\mu}_{ij} = \frac{g_{ij} \times \left(\max_{spatial}(g_{ij}) - \min_{spatial}(g_{ij}) \right)}{\max_{global}(g_{ij}) \times \max_{global}(g_{ij})}$$

نتایج نهایی حاصل از اعمال این دو روش (تصحیح مقادیر عضویت قبل یا بعد از ایجاد متمم فازی) در شکل 18-20 نشان داده می‌شود.



ب



الف

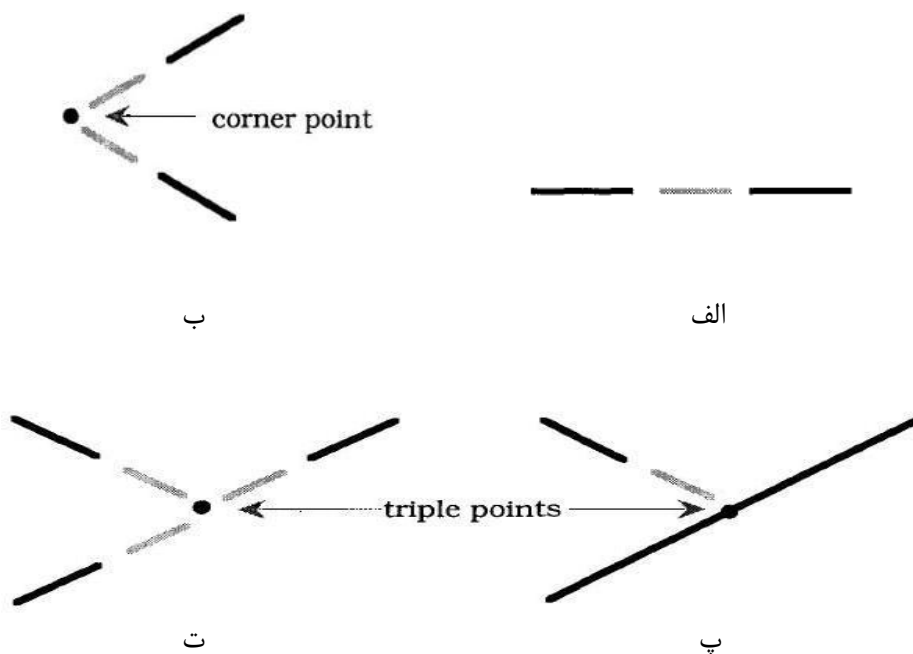
شکل 18-20: تشخیص لبه مبتنی بر متمم. الف) تصحیح مقادیر بعد از ایجاد متمم فازی
ب) تصحیح مقادیر قبل از ایجاد متمم فازی

18-6: اصلاح لبه تصویر

در قسمت‌های قبل، چند الگوریتم فازی برای شناسایی پیکسل‌های متعلق به لبه‌های یک تصویر مورد بررسی قرار گرفت. چون بسیاری از لبه‌ها، قطعاتی از لبه‌های بزرگتر هستند، نیاز به استفاده از تکنیک‌های اصلاح لبه احساس می‌شود تا قطعات لبه را به هم پیوند دهد و تصاویر مناسب‌تر و بهتری از تصاویری که توسط تشخیص‌دهنده‌های لبه ساخته می‌شوند ایجاد کند.

در شکل 18-21 چهار حالت ممکن در اتصال قطعات لبه به یکدیگر مورد بررسی قرار می‌گیرد. این حالت‌ها عبارتند از:

- اتصال بین قطعات لبه که در یک خط قرار گرفته‌اند (دو نقطه انتهایی)
- اتصال بین دو نقطه در یک گوشه (دو نقطه انتهایی)
- بین دو نقطه در یک نقطه سه‌سویه (یک نقطه انتهایی و یک نقطه وسط)
- بین سه نقطه که یک اتصال به شکل Y را نشان می‌دهند (سه نقطه انتهایی)



شکل 18-21: انواع اتصالات بررسی شده. الف) بین قطعات در یک خط ب) بین دو قطعه در یک گوشه پ) بین دو قطعه در یک نقطه تقاطع (سه سویه) ت) بین سه قطعه در حالت Y شکل

علاوه بر این، قوانین فازی که روند انجام اتصال را کنترل می‌نمایند، مواردی چون در یک خط قرارگرفتن^۱ و مجاورت^۲ را نیز شامل می‌شوند. قرار داشتن در یک خط، بیانگر میزان تفاوت زاویه بین دو قطعه لبه حاوی نقاط انتهایی است.

مفهوم مجاورت با توجه به فاصله اقلیدسی مابین دو نقطه انتهایی بیان می‌شود. قوانین فازی برای محاسبه اتصالات در جداول 1-18 تا 4-18 لیست شده‌اند.

مثلاً اولین قانون از اولین جدول به صورت زیر بیان می‌شود:

IF alignment IS low AND proximity IS low AND interim edgeness IS low
 THEN joinness IS low.

¹ Alignment

² Proximity

جدول 18-1: قوانین فازی برای اتصال لبه‌هایی که در یک خط قرار گرفته‌اند.

Alignment	Proximity	Interim edgeness	Joinness
Low	Low	Low	Low
Low	Low	High	Low
Low	High	Low	Low
Low	High	High	Medium
High	Low	Low	Low
High	Low	High	Medium
High	High	Low	Medium
High	High	High	High

جدول 18-2: قوانین فازی برای اتصال در گوشه

Cornerness	proximity	joinness
Low	Low	Low
Low	High	Low
High	Low	Low
High	High	High

جدول 18-3: قوانین فازی برای اتصال در نقطه تقاطع (سه‌سویه)

Tripleness at intersection	proximity	joinness
Low	Low	Low
Low	High	Low
High	Low	Low
High	High	High

جدول 18-4: قوانین فازی برای اتصال در نقطه تقاطع (سه‌سویه) دوبله

Tripleness near intersection	proximity	joinness
Low	Low	Low
Low	High	Low
High	Low	Low
High	High	High

روند اتصال لبه‌ها با این روش در شکل 18-22 دیده می‌شود. قسمت الف این شکل، اسکلت پایه قطعه‌های لبه را نشان می‌دهد. در قسمت ب، نتیجه را پس از پاک‌شدن خطوط کوتاهی که تعداد پیکسل‌های آنها کمتر از 3 است، مشاهده می‌کنیم.

قسمت پ، تصویر لبه را بعد از کامل شدن اتصالات و قسمت ت، خروجی نهایی این روش را بعد از پاک شدن خطوط غیرمتصل نشان می‌دهد.



شکل 18- 22: اتصال لبه‌ها با استفاده از روش پیشنهادی

شکل 18- 23 نتیجه نهایی کار را برای یک تصویر استاندارد، بعد از طی مراحل شامل فیلترکردن فازی، تشخیص لبه، ردیابی و اتصال نشان می‌دهد.



شکل 18- 23: اعمال روش اتصال لبه روی تصویر Cameraman