

ادغام تصاویر چندفوکوسه با استفاده از همدوسی فاز و خوشه‌بند K-means

یوکابد صدری، دانشجو^۱، علی آقاگل‌زاده، استاد^۲، مهدی ازوجی، استادیار^۳

۱، ۲ و ۳ - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل
u_sadri@stu.nit.ac.ir^۱, aghagol@nit.ac.ir^۲, m.ezoji@nit.ac.ir^۳

چکیده: در این مقاله روشی جدید برای ادغام تصاویر چندفوکوسه بر مبنای مدل همدوسی فاز ارائه شده است. الگوریتم پیشنهاد شده دارای دو مرحله است. در مرحله‌ی نخست، اندازه اطلاعات تصاویر ورودی با استفاده از مدل همدوسی فاز استخراج می‌شود. ایده اصلی کار در این مرحله بر پایه این حقیقت است که ویژگی‌های تصویر از جمله لبه‌ها در نقاطی از تصویر که مؤلفه‌های فرکانسی در آن نقاط در هم‌فازی بیشینه هستند، قرار دارند. در مرحله‌ی دوم به تصمیم‌گیری برای انتخاب ویژگی‌های برتر و در نتیجه ادغام تصاویر پرداخته می‌شود. در ادامه برای افزایش سرعت الگوریتم در مرحله تصمیم‌گیری، بلوک‌های مطلوب با تعیین آستانه مناسب و بلوک‌های دیگر طی یک فرآیند تکراری با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی K-Means انتخاب شده و عملیات ادغام انجام می‌شود. آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام‌شده بر روی تصاویر گوناگون حاکی از آن است که الگوریتم پیشنهادی نسبت به دیگر روش‌های موجود، برتری چشم‌گیری دارد.

واژه‌های کلیدی: ادغام تصاویر، تصاویر چندفوکوسه، همدوسی فاز، تصدیق سازگاری، K-means

Multi-Focus Image Fusion Algorithm using Phase Congruency and K-Means Clustering

U. Sadri¹, Student, A. Aghagolzadeh², Professor, M. Ezoji³, Assistant Professor

Faculty of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, Babol, Iran,
u_sadri@stu.nit.ac.ir¹, aghagol@nit.ac.ir², m.ezoji@nit.ac.ir³

Abstract: In this paper, a novel image fusion algorithm based on phase congruency is presented. The proposed algorithm has two steps. In the first step, the information content of the input images is evaluated by using phase congruency model. In this step, the main idea of the work is based on the fact that image features like edges are located in the points of image which frequency components have the maximum phase congruency. In the second step, the dominant features are selected and accordingly image fusion is done. Also, for reducing the computational complexity and improving the overall performance, the proper blocks are chosen by determining the appropriate threshold and the other blocks are chosen using K-means clustering algorithm through an iterative process. The experimental results on several images show that the proposed method has significant advantages compared to the other existing methods.

Keywords: Image fusion, multi-focus images, phase congruency, compatibility verification, K-means

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۰۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۲۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۶/۲۰

نام نویسنده مسئول: علی آقاگل‌زاده

نشانی نویسنده مسئول: دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

برای بسیاری از کاربردها در شبکه‌های حس‌گری دیداری، یک حس‌گر به تنهایی نمی‌تواند توصیفی کامل از صحنه را ارائه دهد. بنابراین دستیابی به تصویری کامل و قابل فهم برای انسان و ماشین، مسئله‌ی ادغام تصاویر دریافتی از چند حس‌گر را، که یک صحنه را تحت نظر دارند، به میان می‌آورد. همچنین عوامل دیگری مانند محدودیت پهنای باند، توان و زمان نیز در شبکه وجود دارند که نیاز به ادغام تصاویر را مطرح می‌کنند.

ادغام تصاویر فرآیندی است که با استخراج و گردآوری اطلاعات مهم و ویژگی‌های شاخص هر یک از تصاویر ورودی، تصویری گویاتر و دقیق‌تری (نسبت به هر یک از ورودی‌ها به تنهایی) از صحنه ارائه می‌کند. امروزه روش‌های بسیاری برای ادغام تصاویر در کاربردهای گوناگون مانند زمینه‌های پزشکی، نظامی و امنیتی، عیب‌یابی قطعات، تصاویر چندفوکوسه و نظارت از راه دور ارائه شده است [۱]. برای نمونه، معمولاً در تصاویری که به وسیله‌ی دوربین‌های CCD گرفته می‌شود، به سبب عمق محدود فوکوس لنزهای نوری در این ابزار، همه‌ی اشیا در تصاویر شفاف و واضح نیستند و تنها بخش‌هایی از تصویر که در فاصله‌ی کانونی دوربین قرار دارند به صورت فوکوس شده و واضح دیده می‌شوند و دیگر قسمت‌های تصویر تار هستند [۲]. همچنین در شبکه‌های حس‌گری دیداری، به جای استفاده از دوربین‌های گران قیمت می‌توان از چند دوربین ارزان که هر کدام با فاصله‌های کانونی گوناگون تنظیم شده‌اند، یا یک دوربین با فاصله کانونی متغیر استفاده کرد، که با کاهش هزینه، افزایش امنیت و رفع عیب آسان شبکه همراه خواهد شد [۱].

روش‌های ارائه شده برای ادغام تصاویر چندفوکوسه را می‌توان در دو دسته کلی طبقه‌بندی کرد. نخست، روش‌های حوزه‌ی مکانی هستند که در ساده‌ترین این روش‌ها، از میانگین‌گیری وزنی مقادیر پیکسل‌ها در تصاویر منبع به صورت پیکسل به پیکسل استفاده می‌شود. این روش‌ها با کاهش کنتراست و تار شدن جزئیات تصویر همراه خواهند بود. در دسته‌ی دیگر، از ترکیب ضرایب در حوزه‌ی تبدیلات چندمقیاسه (MST) مانند تبدیل هرم لاپلاسی [۳]، هرم نسبت، تبدیل موجک گسسته (DWT) [۴] تبدیل موجک گسسته تغییرناپذیر با جابه‌جایی (SIDWT) [۵] استفاده می‌شود. در این نوع روش‌ها ابتدا تبدیلات چندمقیاسه بر روی هر کدام از تصاویر ورودی اعمال می‌شود و شکل تجزیه شده‌ی آن‌ها با مقیاس‌های گوناگون به دست می‌آید و سپس عملیات ادغام بر روی اجزای متناظر تصاویر ورودی انجام می‌شود و سرانجام با اعمال عکس تبدیل مربوطه، تصویر ادغام شده حاصل می‌شود [۶].

بسیاری از روش‌های حوزه‌ی مکانی پیچیده و زمان‌بر هستند، از این رو معمولاً این روش‌ها برای بسیاری از کاربردهای بلادرنگ مناسب نیستند. بر این اساس، امروزه پژوهش‌گران روش‌های ادغام تصاویر در حوزه تبدیل DCT^۱ را مورد توجه قرار داده‌اند. در این

روش‌ها ابتدا هر کدام از تصاویر منبع براساس استاندارد JPEG به بلوک‌های ۸×۸ تقسیم شده و سپس تبدیل DCT دو بعدی بر روی هر کدام از بلوک‌ها اعمال می‌شود و با استفاده از معیارهای گوناگون عملیات ادغام صورت می‌پذیرد. از جمله معیارهای ادغام معرفی شده در این راستا، میانگین‌گیری از همه‌ی ضرایب DCT متناظر در تصاویر منبع [۷]، محاسبه‌ی واریانس بلوک‌های تصویر در حوزه‌ی تبدیل و گزینش بلوک با وضوح بالاتر از بین تصاویر منبع ورودی [۸]، جایگزینی ضریب DC هر بلوک در تصویر خروجی با میانگین ضریب DC بلوک‌های معادل در تصاویر منبع و انتخاب ضریب AC براساس بیشینه‌بودن معیار کنتراست ضرایب AC متناظر در تصاویر ورودی (که این معیار کنتراست با محاسبه انرژی باندهای فرکانسی در بلوک DCT به دست می‌آید) و در پایان پس از انجام فرآیند ادغام تصاویر ورودی با معیار معرفی شده، از عکس تبدیل DCT برای ارائه تصویر حاصل از ادغام استفاده می‌شود [۸]

همان‌گونه که بیان شد، همه‌ی اطلاعات مهم و ویژگی‌های برجسته موجود در تصاویر ورودی باید در فرآیند ادغام حفظ شوند. از این رو برخی از پژوهشگران، استخراج اطلاعات لبه تصاویر را مبنای کار خود قرار داده‌اند و از عملگرهای گوناگون تشخیص دهنده‌ی لبه مانند عملگر Canny [۹]، عملگر Prewitt [۱۰] و همچنین روش‌های تشخیص لبه مبتنی بر گرادیان بهره گرفته‌اند. بسیاری از این روش‌ها به اندازه‌ی لبه و میزان نرم‌بودن لبه حساس هستند. در برخی دیگر از پژوهش‌ها، استخراج ویژگی‌ها در حوزه‌ی فرکانس مورد توجه قرار گرفته است [۱۱].

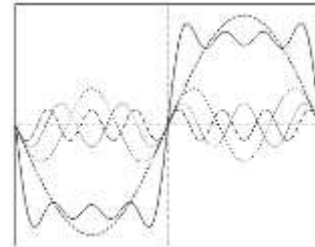
در این مقاله، برای استخراج اطلاعات تصویرهای ورودی، مدل همدوسی فاز^۲ مبنای ادغام قرار گرفته است. زیرا ویژگی‌ها از جمله لبه در نقاطی از تصویر موجود هستند که مؤلفه‌های فرکانسی در آن نقاط در هم‌فازی بیشینه قرار دارند. این روش دارای ۲ مرحله است: ابتدا تصویر همدوسی فاز (تصویر ویژگی) معادل با هر یک از تصاویر ورودی به دست می‌آید و بدین ترتیب نقاط حاوی اطلاعات مهم تصویر استخراج می‌شود. سپس با تقسیم تصاویر همدوسی فاز به بلوک‌های گوناگون و اندازه‌گیری میزان محتوای اطلاعاتی هر یک از بلوک‌ها، ادغام تصاویر انجام می‌شود. سرانجام با اعمال فیلتر اکثریت و انجام تصدیق سازگاری، کیفیت تصویر نهایی بهبود می‌یابد.

این مقاله در ۵ بخش سازمان‌دهی شده است. در بخش ۲، مدل همدوسی فاز دوبعدی معرفی می‌شود. در بخش ۳، الگوریتم پیشنهادی ارائه می‌شود. در بخش ۴، الگوریتم پیشنهادی به منظور افزایش سرعت بهبود داده می‌شود. در بخش ۵، ارزیابی الگوریتم‌ها طی آزمایش‌های گوناگون بیان می‌شود و در نهایت جمع‌بندی مطالب ارائه می‌شود.

۲- مدل همدوسی فاز دو بعدی

در پردازش سیگنال در حوزه فوریه، سیگنال برحسب مؤلفه‌های گوناگون فرکانسی بسط داده می‌شود. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده

می‌شود در بسط سیگنال مربعی همه مؤلفه‌های فرکانسی در محل لبه سیگنال هم‌فاز بوده و از یک نقطه می‌گذرند. این حقیقت که در محل لبه این سیگنال یک‌بعدی، فاز همه‌ی مؤلفه‌های تبدیل فوریه یکسان است، الهامی برای استخراج لبه و نقاط ویژگی از سیگنال‌های گوناگون مانند تصویر است [۱۱] که از آن به همدوسی فاز نام برده می‌شود.



شکل ۱: نمایش هم‌فازی مؤلفه‌های فرکانسی موج مربعی در نقطه لبه [۱۱]

[۱۱] برای ارزیابی میزان همدوسی فاز در یک نقطه، از انحراف معیار اندازه‌ی فاز همه‌ی مؤلفه‌های فوریه در آن نقطه استفاده کرده است. به بیان دیگر، یافتن مکان بیشینه‌شدن همدوسی فاز با پیدا کردن مکانی که واریانس محلی فاز نسبت به میانگین وزنی محلی فاز کمینه است، هم‌ارز خواهد بود. در این مقاله، مدل ارائه‌شده در [۱۱] مبنای کار قرار گرفته که همدوسی فاز با استفاده از بانک فیلتر گابور پیاده‌سازی شده، و به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۲]:

$$PC(x, y) = \frac{\sum_o \sum_s W(x) [A_{so}(x, y) \Delta \phi_{so}(x, y) - T]}{\sum_o \sum_s A_{so}(x, y) + \varepsilon} \quad (1)$$

که اندیس‌های o و s به ترتیب بیان‌گر جهت و مقیاس فیلترها است و سمبل $[\]$ نیز بدین سبب استفاده شده که تضمینی برای مثبت یا صفر بودن مقادیر باشد. $W(x)$ تابع سیگموئید استفاده‌شده برای وزن‌دهی مقادیر حاصل‌شده در جهت‌های گوناگون است. حاصل تلفیق سیگنال تصویر $I(x)$ با فیلترهای متقارن زوج و فرد در مقیاس s و جهت o به ترتیب به صورت M_{so}^{odd} و M_{so}^{even} نمایش داده شده است. به گونه‌ای که بردار پاسخ حاصل از تلفیق تصویر با فیلترها بدین صورت است:

$$[e_{so}(x, y), o_{so}(x, y)] = \begin{bmatrix} I(x, y) * M_{so}^{even} \\ I(x, y) * M_{so}^{odd} \end{bmatrix} \quad (2)$$

اندازه‌ی بردار پاسخ به صورت زیر است:

$$A_{so} = \sqrt{e_{so}(x, y)^2 + o_{so}(x, y)^2} \quad (3)$$

اندازه‌ی فاز آن بدین ترتیب:

$$\phi_{so}(x, y) = a \tan(e_{so}(x, y) / o_{so}(x, y)) \quad (4)$$

$$\Delta \phi_{so}(x, y) = \cos(\phi_{so}(x, y) - \bar{\phi}_o(x, y)) - \sin(\phi_{so}(x, y) - \bar{\phi}_o(x, y)) \quad (5)$$

سرانجام با استفاده از ضرب داخلی و خارجی بین بردار میانگین وزنی پاسخ فیلتر و بردارهای پاسخ فیلتر در هر مقیاس، انحراف فاز می‌تواند به صورت زیر از خروجی فیلتر محاسبه شود:

$$A_{so}(x, y) \Delta \phi_{so}(x, y) = \begin{pmatrix} e_{so}(x, y) \cdot \bar{\phi}_o^{even}(x, y) \\ + \\ o_{so}(x, y) \cdot \bar{\phi}_o^{odd}(x, y) \\ - \\ + \\ e_{so}(x, y) \cdot \bar{\phi}_o^{odd}(x, y) \\ - \\ + \\ o_{so}(x, y) \cdot \bar{\phi}_o^{even}(x, y) \end{pmatrix} \quad (6)$$

۳- روش پیشنهادی ۱: ادغام تصویر با استفاده از همدوسی فاز

برای ادغام تصاویر چندفوکوسه باید نقاطی را که حامل اطلاعات مهم تصویر باشند، را یافت. مدل همدوسی فاز به سبب استقلال آن از تغییرات روشنایی و کنتراست، معیار مناسبی برای این منظور است. همان‌گونه که بیان شد برای محاسبه‌ی همدوسی فاز، از بانک فیلتر گابور (در مقیاس‌ها و جهت‌های گوناگون) جهت محاسبه اندازه و فاز سیگنال در یک فرکانس خاص در موقعیت محلی داده شده، استفاده می‌شود و نقاط ویژگی با توجه به بیشینه‌بودن میزان هم‌فازی در آن نقاط تعیین می‌شوند [۱۱]. روش ارائه‌شده در این مقاله را می‌توان در ۲ بخش زیر معرفی کرد:

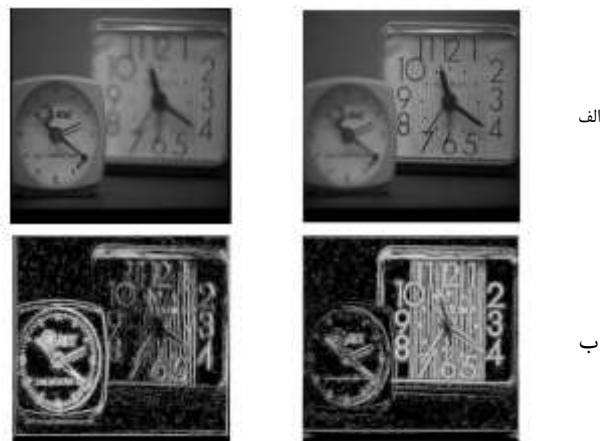
۳-۱- پیدا کردن نقاط حاوی اطلاعات مهم در تصاویر ورودی

برای یافتن نقاط مطلوب که حاوی اطلاعات مهم و ویژگی‌های شاخص تصویر هستند، مدل همدوسی فاز پیاده‌سازی شد و تصاویر همدوسی فاز متناظر با تصاویر ورودی به دست آمد. شکل ۲ تصویر همدوسی فاز برای تصویر چندفوکوسه استفاده شده در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌گونه که دیده می‌شود از لحاظ دیداری، در هر دو تصویر، ناحیه‌ای که تمرکز دوربین در آن قسمت قرار دارد و دارای فوکوس بیشتر است، تصویر همدوسی فاز (تصویر ویژگی) در آن ناحیه نیز واضح‌تر و دارای انرژی بیشتر است. به بیانی دیگر، نقاط این نواحی، مقادیر هم‌فازی بالاتری را به خود اختصاص داده‌اند. از این رو با استخراج نقاط موجود در این نواحی و تعریف یک معیار ادغام مناسب، می‌توان عملیات ادغام را انجام داد و به تصویر با وضوح بیشتری رسید.

مقدار اندازه‌ی هم‌فاز بودن مؤلفه‌های فوریه در آن نقطه است، اختصاص داده می‌شود. مکان بیشینه‌ی این مقادیر در هر نقطه، همان لبه است و سایر پیکسل‌ها هم که ممکن است لبه نباشند، مقداری دریافت می‌کنند. هرچه آن پیکسل‌ها به لبه‌بودن نزدیک‌تر باشند، مقدار بیشتری دارند و در نتیجه در تصویر همدوسی فاز روشن‌تر خواهند بود. از این‌رو می‌توان دریافت که در محل لبه مقدار میانگین برای بلوک‌های متناظر از تصاویر ورودی برای ناحیه‌ی با وضوح بالا باید بیشتر از میانگین بلوک‌های متناظرش در ناحیه‌ی با وضوح پایین باشد. بر این اساس معیار ادغام با استفاده از میانگین مقادیر همدوسی فاز نیز آزمایش شد، شکل (۳-پ) نشان‌دهنده‌ی نتیجه این آزمایش است.

همچنین در تصاویر چندفوکوسه، منطقه‌ای که در فاصله کانونی عدسی قرار دارد، دارای اطلاعات بیشتر و دقیق‌تری است. این اطلاعات در جزئیات ناحیه‌ی مربوطه نهفته است که با ناحیه‌هایی با واریانس بالا متناظر است. در بحث‌های مربوط به پردازش تصویر، واریانس معمولاً به‌عنوان معیاری از کنتراست به‌شمار می‌آید. بنابر این ناحیه‌هایی با واریانس بالاتر معمولاً کنتراست بالاتری نیز دارند که بر روی تصاویر همدوسی فاز نیز صادق است. از این‌رو انتظار می‌رفت این معیار هم نتیجه قابل‌قبولی ارائه دهد که شکل (۳-ت) نشان‌دهنده نتیجه آزمایش، با معیار واریانس مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک است. همچنین شکل (۳-ث) نتیجه آزمایش با استفاده از معیار حاصل‌ضرب میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک را نشان می‌دهد.

علت عدم پذیرش دو معیار تخمینی میانگین و واریانس و گزینش معیار حاصل‌ضرب میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک را می‌توان در شکل ۴ مشاهده کرد. در شکل ۴ نتایج آزمایش با استفاده از دو معیار میانگین و واریانس مقایسه شده‌اند، همان‌طور که مشاهده می‌شود این دو معیار در برخی بلوک‌ها دچار خطا شده‌اند. به عبارتی در برخی از این بلوک‌ها میانگین بالا مشاهده می‌شود اما این بلوک‌ها دارای واریانس پایین هستند و به اشتباه در تصویر خروجی حاصل از معیار واریانس، شکل (۴-ب) گنجانده شدند. همچنین بلوک‌هایی مشاهده می‌شوند که با واریانس بالا دارای میانگین پایین هستند و به اشتباه در تصویر خروجی حاصل از معیار میانگین، شکل (۴-الف)، قرار گرفته‌اند. از این‌رو با انتخاب معیار حاصل‌ضرب میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک در تصاویر همدوسی فاز، می‌توان اطمینان حاصل کرد که، بلوک مطلوب از ناحیه‌ی فوکوس‌شده و به‌درستی انتخاب خواهد شد. بنابر این معیار، حاصل‌ضرب میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک در تصاویر همدوسی فاز بیانگر معیار مناسب برای انجام عملیات ادغام انتخاب شد. نتایج به‌دست‌آمده از ادغام با هر یک از معیارهای بررسی شده به کمک مقادیر کمی $SSIM^*$ [۱۳] و $PSNR^*$ در جدول ۱ مقایسه شده است.



شکل ۲: الف) تصویر منبع فوکوس‌شده در سمت راست و تصویر منبع فوکوس شده در سمت چپ؛ ب) تصاویر همدوسی فاز متناظر با تصاویر شکل (الف)

طبق آنچه در شکل ۲ دیده می‌شود، برای استخراج نواحی با وضوح بالا، می‌توان برتری میزان همدوسی در فاز در نقاط متناظر را، که با توجه به روابط بخش قبل محاسبه شده‌اند، مبنای کار قرار داد. از آنجایی که در تصاویر چندفوکوسه روش‌های مبتنی بر بلوک کردن تصویر، منجر به تولید تصویر با کیفیت بهتری می‌شود، تصاویر همدوسی فاز حاصل‌شده از هر یک از منابع به بلوک‌هایی تقسیم می‌شوند. گام بعدی، ارزیابی میزان اطلاعات بلوک‌های متناظر در تصاویر ورودی و گزینش بلوک با محتوای اطلاعاتی بالاتر است.

۳-۲- سنجش میزان وضوح بلوک‌ها و ادغام تصاویر

اطلاعات مهم و جزئیات تصویر در نواحی‌ای که در فاصله کانونی دوربین قرار دارند، متمرکز شده‌اند. معیارهایی که بتوانند این تغییرات انرژی و کنتراست را در هر بلوک بسنجند، مورد مطالعه قرار گرفتند. با انتخاب بلوک‌های 16×16 معیارهای گوناگونی از قبیل میانگین، واریانس در هر بلوک، میزان فاصله‌ی میانگین مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک با بیشینه مقدار همان بلوک (که در واقع معیاری از کنتراست است) و شرط عطفی بین مقادیر میانگین در یک بلوک و واریانس در همان بلوک، مطابق شکل ۳ بررسی و آزمایش شدند.

همان‌طور که در شکل (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده می‌شود دو معیار نخست، میزان فاصله‌ی میانگین مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک با بیشینه مقدار همان بلوک، و شرط عطفی بین مقادیر میانگین در یک بلوک و واریانس در همان بلوک، دارای خطای زیادی در انجام عملیات ادغام بوده و تعداد زیادی بلوک را از ناحیه‌ی اشتباه انتخاب کرده و در تصویر خروجی گنجانده است. همچنین با توجه به شکل این دو معیار، به ویژه در مرز نواحی که فوکوس تصاویر ورودی تغییر می‌کند، نتوانسته است این تغییر انرژی و وضوح در دو ناحیه را تشخیص دهد؛ در نتیجه معیار مناسبی برای عملیات ادغام محسوب نمی‌شوند.

همان‌طور که از شکل (۲-ب) دریافت می‌شود، در این تصاویر به هر پیکسل ارزشی به اندازه‌ی میزان لبه‌بودن، که این مقدار وابسته به



(الف)



(ب)



(پ)



(ت)



(ث)

شکل ۳: نتایج انجام آزمایش‌ها به منظور انتخاب معیار سطح فعالیت مناسب. الف) نتیجه الگوریتم با معیار شرط عطفی واریانس و میانگین مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک. ب) نتیجه الگوریتم با معیار فاصله میانگین مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک با بیشینه مقدار همان بلوک. پ) نتیجه الگوریتم با معیار میانگین مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک. ت) نتیجه الگوریتم با معیار واریانس مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک. ث) نتیجه الگوریتم با معیار انتخابی حاصل ضرب میانگین در واریانس مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک



(الف)



(ب)

شکل ۴. مقایسه‌ی کیفی نتیجه‌ی الگوریتم با دو معیار میانگین و واریانس مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک. الف) نتیجه الگوریتم با معیار میانگین مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک. ب) نتیجه الگوریتم با معیار واریانس مقادیر همدوسی فاز در یک بلوک.

۴- افزایش سرعت الگوریتم به کمک خوشه‌بند K-Means

در بخش پیشین توضیح داده شد که به‌منظور به‌دست آوردن تصویر خروجی با کیفیت بالا مبنای تصدیق سازگاری برای انتخاب بلوک مرکزی بر اساس رای الگوریتم در مقیاس‌های ۱ تا ۵ است و پس از ۵ بار انجام آزمایش و اجرای تابع همدوسی فاز، بلوک مناسب در تصویر خروجی انتخاب می‌شود. این عمل ۵ بار فراخوانی تابع همدوسی فاز، تا حدودی زمان‌بر است و باعث اندکی پیچیدگی محاسباتی می‌شود. بنابراین این در این جا سعی بر آن است تا با یکبار فراخوانی تابع همدوسی فاز افزایش سرعت الگوریتم ارائه شده حاصل شود.

همانند بخش پیشین، برای یافتن نقاط مطلوب و ویژگی‌های شاخص تصویر، مدل همدوسی فاز پیاده‌سازی شد و تصاویر همدوسی فاز متناظر با تصاویر ورودی، همان‌گونه که در شکل ۲ نشان داده شده، به دست آمد. پس از استخراج اطلاعات لبه تصاویر ورودی به بلوک‌های ۱۶×۱۶ تقسیم می‌شوند و با استفاده از مقدار حاصل‌ضرب میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک در تصاویر همدوسی فاز، میزان اطلاعات لبه‌ی آن سنجیده شده و سپس انتخاب بلوک خروجی انجام می‌پذیرد که این عملیات دو مرحله‌ای است.

در مرحله اول، پس از محاسبه میزان اطلاعات لبه، اختلاف این مقادیر برای بلوک‌های متناظر در تصاویر ورودی را به دست آورده و در این مرحله میانگین این اختلاف‌های محاسبه شده و به‌عنوان آستانه‌ی موردنظر، معیار انتخاب بلوک‌های خروجی می‌شود. بنابراین این مقادیر اختلاف محاسبه‌شده‌ی هر بلوک با مقدار آستانه مقایسه شده و فقط بلوک‌هایی که دارای مقدار بزرگ‌تری از آستانه هستند، در مکان متناظرشان در تصویر خروجی قرار می‌گیرند و سایر بلوک‌ها برای گزینش در مرحله‌ی بعد، باقی می‌مانند.

در مرحله‌ی دوم به‌منظور انتخاب بلوک مناسب از بین بلوک‌های باقی‌مانده که در مرحله‌ی اول انتخاب نشده‌اند، از روش خوشه‌بندی K-Means استفاده می‌شود. ایده‌ی به‌کارگیری این روش آن است که در خوشه‌بندی سعی می‌شود تا داده‌ها به خوشه‌هایی تقسیم شوند که شباهت بین داده‌های درون هر خوشه بیشینه و شباهت بین داده‌های درون خوشه‌های متفاوت کمینه شود، و ما به دنبال آن هستیم که مجموعه‌ی بلوک‌های باقیمانده را به دو دسته، بلوک‌هایی که در تصویر خروجی گنجانده می‌شوند و بلوک‌های باقی‌مانده که باید به مرحله‌ی بعد منتقل شوند، تقسیم کنیم. بنابراین در این مرحله بر روی داده‌هایی که معادل با اطلاعات متناظر هر بلوک ورودی است، یعنی همان مقدار اختلاف حاصل‌ضرب میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک در تصاویر همدوسی فاز، طی یک فرآیند تکراری الگوریتم K-Means اعمال می‌شود و در هر بار تکرار برخی از بلوک‌های مناسب باقی‌مانده در تصویر خروجی قرار می‌گیرند تا سرانجام تصویر کامل حاصل از ادغام به دست آید. در نهایت به‌منظور بهبود کیفیت تصویر حاصل از ادغام و کاهش خطای این روش و داشتن یک خروجی

با توجه به آزمایش‌های انجام‌شده، پس از تجزیه‌ی تصاویر همدوسی فاز دو تصویر ورودی به بلوک‌های ۱۶×۱۶، مقدار میانگین و واریانس متناظر با هر بلوک محاسبه می‌شود. آن‌گاه از بین بلوک‌های متناظر در دو تصویر ورودی، بلوکی که بیشینه مقدار حاصل‌ضرب میانگین و واریانس مقادیر همدوسی فاز را دارد به‌عنوان بلوکی با محتوای اطلاعاتی بالاتر برای ایجاد تصویر با وضوح بیشتر انتخاب خواهد شد و در نهایت برای بهبود کیفیت تصویر خروجی عمل پس‌پردازش با استفاده از فیلتر اکثریت صورت می‌گیرد.

مقدار میانگین μ و واریانس σ^2 برای یک بلوک $N \times N$ بر روی تصویر $x(m, n)$ به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$\mu = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(m, n) \quad (7)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{N^2} \sum_{m=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x^2(m, n) - \mu^2 \quad (8)$$

جدول ۱: نتایج کمی متناظر با معیارهای بررسی شده

معیارها	شکل(ث)	شکل(ت)	شکل(پ)	شکل(ب)	شکل(الف)
SSIM	۱	۰/۹۹۶۳	۰/۹۹۸۴	۰/۸۶۶	۰/۹۷۳۵
PSNR	۱۰۰	۵۱/۱۳	۵۳/۸۴۱	۳۶/۸۴۶	۴۲/۳۴۹

۳-۳- پس‌پردازش برای بهبود کیفیت تصویر

برای بهبود کیفیت تصویر حاصل از ادغام و کاهش خطای این روش و داشتن یک خروجی همگن، از یک روش تصدیق سازگاری (CV)^۸ مبتنی بر فیلتر اکثریت استفاده شده است. انجام تصدیق سازگاری هر چند که موجب اندکی افزایش محاسبات در ادامه‌ی فرآیند ادغام می‌شود، ولی تاثیر به‌سزایی بر روی کیفیت تصویر خواهد داشت. اگر فرض کنیم در یک همسایگی بلوکی $N \times N$ از بلوک مورد پردازش (که N اندازه‌ی فیلتر مورد استفاده است) در تصویر حاصل شده از ادغام، اکثریت بلوک‌های همسایه از تصویر ورودی A انتخاب شده باشند، بلوک مرکزی نیز باید از تصویر A انتخاب شود.

در این مقاله، نتیجه‌ی فیلتر اکثریت، به ازای ۵ مقیاس اول بانک فیلتر، حاصل شده است. به بیانی دیگر، مبنای تصدیق سازگاری برای انتخاب بلوک مرکزی بر اساس رای الگوریتم در مقیاس‌های ۱ تا ۵ برای بلوک‌های موجود در همسایگی 3×3 است. یعنی در این همسایگی پس از ۵ بار انجام آزمایش و یافتن تعلق بلوک‌های همسایگی به هر یک از تصاویر ورودی، بلوک مرکزی بر اساس تعداد دفعات حضور بیشتر بلوک‌های همسایگی در مکان متناظرش در تصویر خروجی، انتخاب می‌شود. برای فیلتر اکثریت، پنجره‌ی همسایگی 3×3 اعمال شده و نشان داده شده است که هر چه اندازه پنجره بزرگتر شود، کیفیت تصویر خروجی بهتر شده، ولی به قیمت پیچیدگی محاسباتی بیشتر است.

دسته اول، ۶ تصویر نشان داده شده در شکل ۶ است که برای تولید تصاویر چندفوکوسه ورودی، با یک دیسک به شعاع ۵ تار شدند.



شکل ۶: تصاویر استفاده شده در شبیه سازی

برای ارزیابی نتایج به دست آمده از این تصاویر، از معیارهایی که برای ارزیابی عملکرد ادغام به تصویر مرجع نیاز دارند مانند: شباهت ساختاری SSIM [۱۳] و بیشینه نسبت سیگنال به نویز (PSNR) استفاده شده است که در واقع تصاویر مرجع تصاویر شکل ۶ هستند.

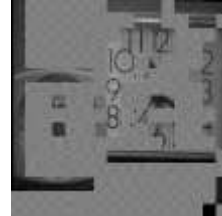
دسته دوم تصاویری هستند که به صورت واقعی و با تفاوت در تمرکز دوربین حاصل شدند. این نوع تصاویر از پایگاه داده Rockinger [۱۴] گرفته شدند. نتایج به دست آمده از آن‌ها با استفاده از معیارهایی، که بدون نیاز به تصویر مرجع عمل می‌کنند، یعنی معیار پتروویچ و زیدیس ($Q_F^{A/B}$) [۱۵] و معیار اطلاعات متقابل ویژگی‌ها FMI [۱۶] ارزیابی شدند.

در الگوریتم پیشنهادی پارامترهایی از قبیل اندازه‌ی بلوک، اندازه‌ی فیلتر اکثریت و تعداد مقیاس‌های بانک فیلتر دخیل بودند و نقش مهمی در پیچیدگی محاسباتی و همچنین بهبود کیفیت نتیجه‌ی ادغام داشتند. از این رو آزمایش‌هایی برای تعیین نقش این پارامترها در نتیجه‌ی ادغام صورت گرفت که شکل‌های ۷، ۸ و ۹ چگونگی انتخاب این پارامترها را نشان می‌دهند.

۵-۱- انتخاب تعداد مقیاس‌های بانک فیلتر

الگوریتم پیشنهادی با مقیاس‌های گوناگون از ۲ تا ۸ و اندازه‌ی بلوک ۸ تا ۱۶ و فیلتر اکثریت با اندازه‌های ۳×۳، ۵×۵ و ۹×۹ اجرا شد و پس از ۴۲ بار آزمایش، نمودارهای شکل ۷ و ۸ به دست آمد. این نمودارها میزان تغییرات مقادیر SSIM به ازای مقیاس‌های مختلف بانک فیلتر با در نظر گرفتن اندازه‌ی فیلتر، اکثریت مشخص در یک اندازه‌ی بلوک ثابت را نشان می‌دهند. همان‌گونه که دیده می‌شود با فرض اجرای برنامه در یک اندازه‌ی بلوک ثابت، هرچه اندازه‌ی فیلتر اکثریت بیشتر شود، تغییرات مقدار SSIM نسبت به مقیاس کاهش یافته و الگوریتم عملکردی مستقل از مقدار مقیاس بانک فیلتر گابور خواهد داشت که در نمودارهای ۷ و ۸ این استقلال و یکنواختی تا مقیاس ۵ قابل مشاهده است. به منظور کاهش زمان اجرای برنامه، تعداد مقیاس‌های دخیل در الگوریتم، ۵ مقیاس اول برگزیده شد.

همگن، با استفاده از روش تصدیق سازگاری مبتنی بر فیلتر اکثریت که در بخش قبل ارائه شد، کیفیت تصویر خروجی را افزایش می‌دهیم. تصویر نتایج در پایان هر مرحله، برای تصویر «clock» در شکل ۵ نشان داده شده است.



(الف)



(ب)



(پ)



(ت)



(ث)



(ج)



(چ)



(ح)



(خ)

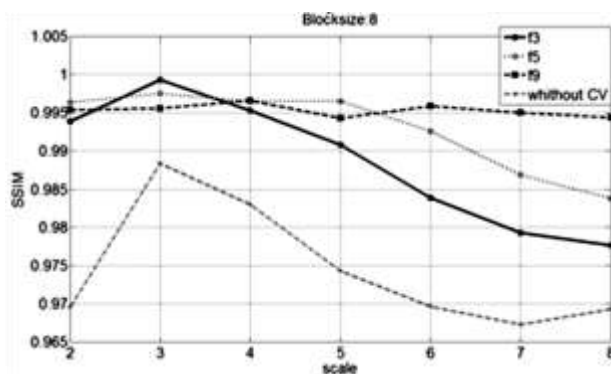
شکل ۵: تصاویر خروجی در هر مرحله از الگوریتم پیشنهادی

۵- ارزیابی الگوریتم پیشنهادی

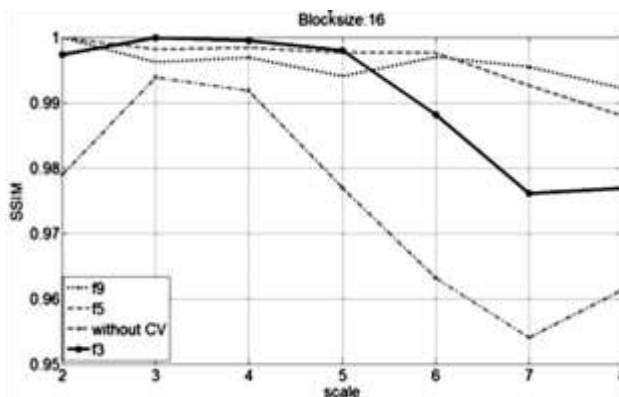
در این بخش با استفاده از آزمایش‌های گوناگونی به مقایسه کارایی روش‌های پیشنهادی با برخی از روش‌های دیگر می‌پردازیم. تمامی شبیه‌سازی‌های این بخش با نرم‌افزار MATLAB نسخه R2008a انجام گرفته است. آزمایش‌ها بر روی دو دسته تصویر صورت گرفته است،

۵-۲- انتخاب اندازه‌ی بلوک

مقایسه‌ی نمودارهای شکل ۷ و ۸ نشان می‌دهد که در یک مقیاس ثابت از بانک فیلتر گابور و اندازه‌ی مشخص فیلتر اکثریت، هر چه اندازه بلوک‌های انتخابی برای تقسیم‌بندی تصاویر ویژگی متناظر با منابع، بیشتر شود، مقدار SSIM افزایش یافته و عملکرد الگوریتم بهبود می‌یابد. بنابراین این تصاویر ویژگی بر این اساس به بلوک‌های ۱۶×۱۶ تقسیم می‌شوند.



شکل ۷: نمودار تغییرات SSIM نسبت به مقیاس بانک فیلتر گابور با فرض اندازه‌ی بلوک ۸



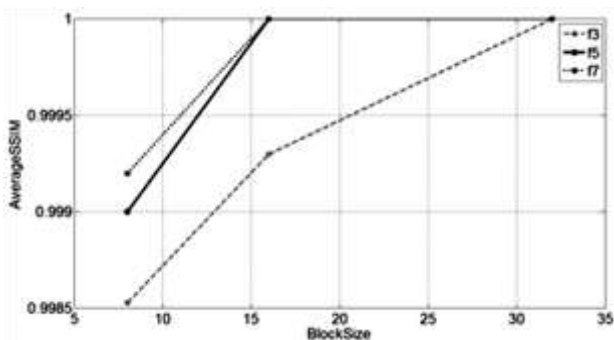
شکل ۸: نمودار تغییرات SSIM نسبت به مقیاس بانک فیلتر گابور با فرض اندازه‌ی بلوک ۱۶

۵-۳- بررسی استقلال الگوریتم نسبت به محتوای تصاویر ورودی و انتخاب اندازه‌ی فیلتر اکثریت

با انجام آزمایش بر روی تصاویر شکل ۶ به ازای اندازه‌های گوناگون بلوک ۸، ۱۶ و ۳۲ و فیلترهای اکثریت به اندازه‌های ۳×۳، ۵×۵ و ۷×۷، محاسبه‌ی میانگین مقدار SSIM به‌دست‌آمده از همه‌ی تصاویر ورودی، نمودار شکل ۹ حاصل شد. این نمودار تغییرات میانگین SSIM به ازای اندازه بلوک مختلف با فرض مشخص بودن اندازه‌ی فیلتر اکثریت را نشان می‌دهد. نتایج مشاهده‌شده در این نمودار، تصدیق می‌کنند که عملکرد الگوریتم با افزایش اندازه‌ی بلوک و همچنین افزایش اندازه‌ی فیلتر اکثریت بهبود می‌یابد. اما از آنجایی که هرچه اندازه‌ی فیلتر اکثریت افزایش یابد، پیچیدگی محاسباتی الگوریتم نیز بیشتر می‌شود و انتخاب اندازه بزرگ برای فیلتر، مقرون‌به‌صرفه نیست، اندازه فیلتر

۳×۳ و اندازه‌ی بلوک ۱۶×۱۶ برگزیده شد. همان‌طور که توضیح داده شد، در این شرایط در بازه‌ی یک تا پنج عملکرد الگوریتم مستقل از مقیاس است.

نمودار شکل‌های ۷ و ۸ ارزیابی نتایج حاصل از یک نوع تصویر را نشان می‌دهند و نمودار شکل ۹ بر اساس میانگین SSIM ۶ تصویر طراحی شده‌اند. از آنجایی که هر ۳ نمودار محدوده‌ی مقادیر SSIM را در بازه‌ی [۰/۹ - ۱] اعلام می‌کنند، می‌توان نتیجه گرفت که عملکرد الگوریتم مستقل از محتوای تصویر است. این مطلب یک ویژگی برتر روش ارائه‌شده را مطرح می‌کند.



شکل ۹: نمودار تغییرات میانگین SSIM برای تصاویر شکل ۴ نسبت به اندازه‌ی بلوک

۵-۴- مقایسه روش ارائه‌شده با برخی روش‌های موجود

برای ارزیابی عملکرد روش‌های پیشنهادشده، نتایج حاصل از این الگوریتم با نتایج به‌دست‌آمده از روش‌های حوزه تبدیل موجود در مرجع [۷] یعنی روش‌های DCT+Average و DCT+Contrast، DCT+variance [۸]، همچنین روش استاندارد و پرتعداد DWT [۴] و Bilateral Gradient [۱۷] و FBA_AT و ABS_AT [۹] که در سال‌های اخیر ارائه شده‌اند، مقایسه می‌شود. روش ادغام DWT با پایه DBSS(2,2) است که برای شبیه‌سازی این روش از جعبه ابزار ادغام تصاویر تهیه‌شده توسط Rokinge استفاده شده است [۱۴]. نتایج کمی ارزیابی اعمال الگوریتم‌های فوق در جدول‌های ۲ و ۳ و مقایسه کیفی آن در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آمده است.

با دقت در تصاویر به‌دست‌آمده از ادغام در روش‌های مختلف به روشنی دیده می‌شود که روش DCT+Average در عین سادگی دارای کیفیت بسیار پایینی بوده و اثر محوشدگی شدیدی در آن مشاهده می‌شود. در روش DCT+Contrast اثر بلوکی شدیدی وجود دارد، که علت آن دست‌کاری ضرایب DCT در انتخاب‌های مختلف از تصاویر ورودی است. روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک DWT، دارای نوعی اثر حلقوی شدن است. این اثر یک مشکل معمول در روش‌های مبتنی بر تبدیل موجک است که به دلیل توابع پایه و استفاده از فیلتر بالاگذر در شاخه مربوط به جزئیات، به وجود می‌آید. مرحله زیرنمونه‌برداری در تجزیه تبدیل موجک نیز دامنه این اثر را افزایش می‌دهد. روش مبتنی بر Bilateral Gradient نیز به‌خوبی نتوانسته است نقاط ویژگی مورد



(الف)



(ب)



(پ)



(ت)



(ث)



(ج)



(چ)



(ح)



(خ)

نیاز برای عملیات ادغام را استخراج کند و در نواحی لبه، نتیجه خروجی تا حدودی نامطلوب است و تصویر خروجی کیفیت بالایی ندارد. همچنین در روش‌های FBS-AT و ABS-AT واضح است که برخی بلوک‌ها به درستی انتخاب نشده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج روش پیشنهادی پیشرفت قابل ملاحظه‌ای نسبت به روش‌های قبلی دارد. نتایج کمی حاصل شده با استفاده از معیارهای ارزیابی معرفی شده این نتایج را تصدیق می‌کنند.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید برای ادغام تصاویر ارائه شده است. روش پیشنهادی بر این اساس بنا شده است که به جای آنکه برای استخراج و جمع‌آوری اطلاعات مهم و شاخص هر یک از منابع ورودی، از عملگرهای تشخیص لبه مانند Prewitt و گرادیان که به شدت لبه حساس هستند استفاده کنیم، به استخراج ویژگی‌ها با استفاده از مؤلفه‌ی فاز تصاویر پردازیم. معیار همدوسی فاز، که مستقل از شدت نور و کنتراست است، برای این امر انتخاب شده است. بدین ترتیب این روش با استخراج قابل قبول و کافی نقاط ویژگی، موجب ادغام بهتر و کامل‌تر تصاویر ورودی خواهد شد. همان‌گونه که نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد، می‌توان از این الگوریتم برای توصیف دقیق‌تر صحنه که به وسیله‌ی تصاویر چندفوکوسه گرفته شده‌اند، استفاده کرد.

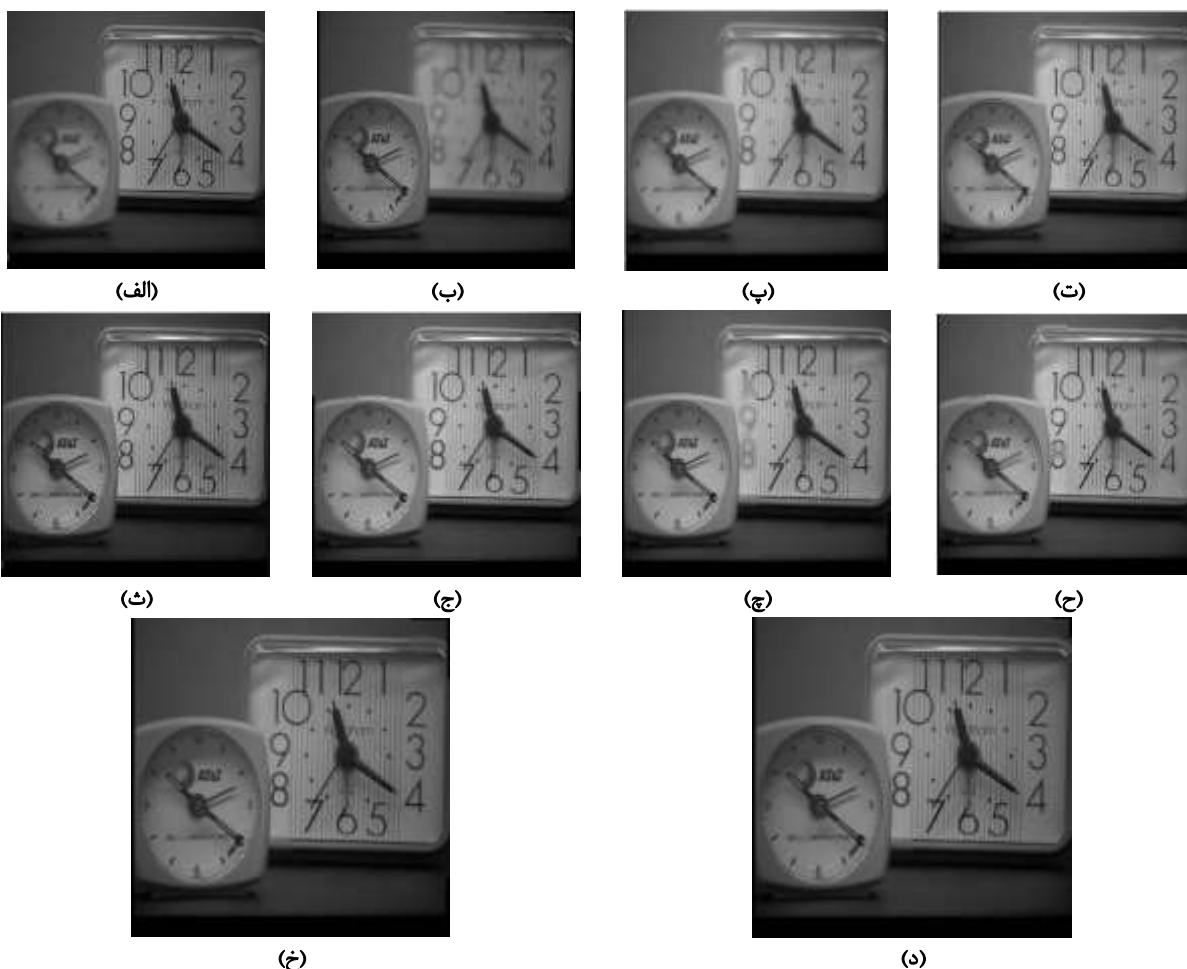
شکل ۱۰: تصاویر منبع حاصل از تصویر «Cameraman» و نتایج ادغام: (الف) تصویر با فوکوس در سمت راست، (ب) تصویر با فوکوس در سمت چپ، (پ) نتیجه روش DCT+Average [7]، (ت) نتیجه روش DCT+Contrast [7]، (ث) نتیجه روش DWT [4]، (ج) نتیجه روش Bilateral Gradient [17]، (چ) نتیجه روش DCT+Varianc [17]، (ح) نتیجه روش چند مقیاسه پیشنهادی، (خ) نتیجه بهبود روش پیشنهادی با استفاده از K-Means.

جدول ۲: ارزیابی کمی الگوریتم‌های ادغام تصاویر برای تصاویر شکل ۴

روش‌ها	DCT+ Average [۷]	DCT+ Contrast [۷]	DWT [۴]	Bilateral Gradient [۱۷]	DCT+ Variance [۸]	روش چندمقیاسه پیشنهادی	بهبود روش پیشنهادی با K-Means
SSIM	۰/۹۲۰	۰/۹۴۶	۰/۹۶۱	۰/۹۲۵	۰/۹۹۸	۱	۱
PSNR	۳۵/۶۷۶	۴۱/۶۷	۷۲/۰۹	۳۸/۵۷۷	۸۵/۸۲۹	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۳: نتایج کمی ارزیابی کیفیت روش‌های ادغام مربوط به شکل ۹

روش‌ها	DCT+ Average [۷]	DCT+ Contrast [۷]	DWT [۴]	DCT+ Variance [۸]	FBS-AT [۹]	ABS-AT [۹]	روش چندمقیاسه پیشنهادی	بهبود روش پیشنهادی با K-Means
$Q_F^{A/B}$	۰/۵۸۵	۰/۵۹۲	۰/۶۶۱	۰/۷۱۴	۰/۶۹	۰/۷۰۵	۰/۷۳۲۱	۰/۷۳۸۶
FMI	۰/۹۳۲	۰/۹۳۴	۰/۹۳۹	۰/۹۴۷	۰/۹۱۲	۰/۹۳۱	۰/۹۵۳	۰/۹۵۸



شکل ۱۱: تصاویر منبع پایگاه داده «clock» و نتایج ادغام: (الف) تصویر با کانون در سمت راست، (ب) تصویر با کانون در سمت چپ، (پ) نتیجه روش DCT+Average [۷]، (ت) نتیجه روش DCT+Contrast [۷]، (ث) نتیجه روش DWT [۴]، (ج) نتیجه روش DCT+Variance [۸]، (چ) نتیجه روش FBS-AT [۹]، (ح) نتیجه روش ABS-AT [۹]، (خ) نتیجه روش چندمقیاسه پیشنهادی، (د) نتیجه بهبود روش پیشنهادی با K-Means

مراجع

^۱ Feature Mutual Information

- [۱] محمدباقر، اکبری حقیقت، ادغام تصاویر شبکه‌های حسگری دیداری در حوزه‌ی تبدیل، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه تبریز، تبریز، صفحه ۶ و ۸، شهریور ۱۳۸۹.
- [2] W. Wu, X. Yang, Y. Pang, J. Peng and Gw. Jeon "A multifocus image fusion method by using hidden Markov model," Optics Communications, vol. 287, pp.63-72, 2013.
- [3] P. J. Burt and E. H. Adelson, "The laplacian pyramid as a compact image code," IEEE Transactions on Communications, vol. 31, no. 4, pp. 532-540, April 1983.
- [4] H. Li, B. Manjunath, and S. Mitra, "Multisensor image fusion using the wavelet transform," Graph Models Image Process, vol. 57, no. 3, pp.235-245, 1995.
- [5] O. Rockinger, "Image sequence fusion using a shift_invariant wavelet transform," Proceedings of IEEE International Conference On Image Processing, vol.3, pp.288-291,1997.
- [6] H. Li, Y. Chai, H. Yin and G. Liu, "Multifocus image fusion and denoising scheme based on homogeneity similarity," Optics Communications, vol. 285, pp.91-100, 2012.
- [7] J. Tang, "A contrast based image fusion technique in DCT domain," Digital Signal Process, vol.14, no. 3, pp.218-226, 2004.
- [8] M. B. Akbari Haghghat, A. Aghagolzadeh and H. Seyedarabi, "Multi-focus image fusion for visual sensor network in DCT domain," Computers and Electrical Engineering, vol. 37, no. 5, pp. 789-797, 2011.
- [9] P. Shah, A. Kumar, A. N. Merchant and U. B. Desai, "Multifocus image fusion algorithm using iterative segmentation based on edge information and adaptive threshold," 15th International Conference on Information Fusion, pp. 1976-1981, 2012.
- [10] M. H. Arif and S. Shah, "Block level multi-focus image fusion using wavelet transform," IEEET International Conference on Signal Acquisition and Processing, 2009.
- [11] P. Kovesi, *Invariant measures of image features from Phase Information*, Ph.D. Thesis, University of Western Australia, May 1996.
- [12] A. Zafari, M. Sayadi and F. Fneaiach, "Edge segmentation of satellite image using phase congruency model," International Journal of Information and Communication Engineering 6, 2010.
- [13] Z. Wang, A. C. Bovik, H. K. Sheikh and E. P. Simoncelli, "Image quality assessment: from error visibility to structural similarity," IEEE Trans Image Process, vol. 13, no. 4, pp.600-612, 2004.
- [14] <http://www.metapix.de/toolbox.htm>
- [15] C. S. Xydeas and V. Petrovic, "Objective image fusion performance measure," Electron Lett, vol. 36, no. 4, pp. 308-309, 2000.
- [16] M. B. Akbari Haghghat, A. Aghagolzadeh, and H. Seyedarabi, "Non-reference image fusion metric based on mutual information of image features," Computers and Electrical Engineering, vol. 37, no. 5, pp. 744-756, 2011.
- [17] J. Tain, L. Chen, L. Ma and W. Yu, "Multi-focus image fusion using a bilateral gradient-based sharpness criterion," Optics Communications, vol. 284, pp. 80-87 2011.

زیرنویس‌ها

- ^۱ Multi Scale Transform,
^۲ Discrete Wavelet Transform
^۳ Shift Invariant DWT
^۴ Discrete Cosine Transform
^۵ Phase Congruency
^۶ Structural Similarity Index Measure
^۷ Peak Signal-to-Noise Ratio
^۸ Compatibility Verification