

روشی نوین برای توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی با استفاده از کدگذاری تُنک و ویژگی‌های چهارگانی

هادی هادی زاده

چکیده

رنگ و بافت دو مولفه بسیار مهم در تشخیص و تمایز بین اشیاء مختلف در دنیای واقعی می‌باشند. اخیراً، نمایش چهارگانی (کوآترینونی) تصاویر تبدیل به یک شیوه کارآمد برای توصیف تصاویر رنگی شده است. با استفاده از نمایش چهارگانی تصاویر رنگی، امکان پردازش و در نظر گرفتن اطلاعات متقابل بین کانال‌های رنگی تصاویر به صورت توأمان فراهم می‌شود. تاکنون عملگرهای چهارگانی ساده‌ای همچون عملگرهای چرخش، انعکاس و انتقال کلیفورد برای تصاویر رنگی توسعه یافته‌اند. با اعمال این عملگرهای ساده بر تصاویر رنگی، می‌توان اطلاعات کم‌عمقی در خصوص رابطه بین کانال‌های رنگی یک تصویر به دست آورد. در این مقاله، ابتدا عملگرهای چهارگانی جدیدی موسوم به عملگرهای چهارگانی ترکیبی را پیشنهاد می‌دهیم که از ترکیب متوالی و دلخواه عملگرهای چهارگانی ساده تشکیل می‌شوند. با استفاده از عملگرهای پیشنهادی می‌توان اطلاعات عمیق‌تری از تصاویر رنگی را استخراج نمود. سپس، روشی مبتنی بر مفهوم کدگذاری تُنک را برای دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی توصیف شده توسط عملگرهای چهارگانی ترکیبی پیشنهاد می‌دهیم. نتایج تجربی نشان می‌دهند که روش پیشنهادی برای دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی از دقت بالاتری در مقایسه با سایر روش‌های موجود بر روی سه پایگاه مشهور از تصاویر بافتی رنگی برخوردار است.

کلیدواژه‌ها

بافت، کدگذاری تُنک، چهارگان، اتم، عملگرهای چهارگانی، رنگ

۱ مقدمه

کاربردهای فراوانی در زمینه‌های گوناگون نظیر تشخیص اشیاء، کنترل کیفیت محصولات، اتوماسیون، کاربردهای پزشکی، سنجش از راه دور، فشرده‌سازی تصاویر و غیره دارد [۱]. گام اول در توصیف یک بافت، استخراج ویژگی‌های مناسب از تصویر آن می‌باشد. در دهه‌های گذشته، روش‌های بسیار متعددی برای استخراج ویژگی و دسته‌بندی تصاویر بافتی پیشنهاد شده‌اند [۹-۱]. به عنوان مثال، در [۲]، ویژگی‌های آماری استخراج شده از ماتریس‌های هم‌رخداد سطوح خاکستری^۱ تصویر به عنوان ویژگی‌های بافتی استفاده شدند. در [۳]، فیلترهای مشهور گابور^۲ بر روی تصاویر در جهات و مقیاس‌های متفاوت اعمال می‌شوند و سپس میانگین پاسخ خروجی این فیلترها به عنوان ویژگی‌های بافتی

در پردازش تصاویر، به الگوی تغییرات یک سیگنال بصری بر روی سطح یک جسم فیزیکی بافت گفته می‌شود که خصوصیت بسیار مهمی برای تمایز بین اشیاء مختلف در دنیای واقعی به شمار می‌رود. توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافت، یک مسئله اساسی و چالش برانگیز در پردازش تصویر و بینایی رایانه می‌باشد که دارای این مقاله در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۷ دریافت، در اسفندماه سومین بازنگری و در فروردین‌ماه ۱۳۹۸ پذیرفته شد.

*گروه مهندسی برق-مخابرات دانشگاه صنعتی قوچان
رایانامه: h.hadizadeh@qiet.ac.ir

^۱Grayscale Co-occurrence Matrices

^۲Gabor Filters

شوند. در عمده روش‌های پردازش تصاویر رنگی موجود، کانال‌های رنگی مختلف به صورت مجزا و انفرادی مورد بررسی و پردازش قرار می‌گیرند و لذا اطلاعات متقابل بین کانال‌های رنگی مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. در مقابل، تحقیقات مختلفی نشان داده‌اند که نمایش چهارگانه قادر به مدل‌سازی تعامل و ارتباط متقابل بین کانال‌های رنگی مختلف می‌باشد و در عین حال از حجم محاسباتی کمتری نیز در مقایسه با روش‌های مرسوم برخوردار می‌باشند. در حقیقت، نمایش چهارگانه تصاویر رنگی در کاربردهای موفق مختلفی همچون نوین‌سازی [۱۶-۱۵]، هموارسازی [۱۷]، ناحیه‌بندی تصاویر [۱۹-۱۸]، استخراج ویژگی از تصاویر [۲۳-۲۰] و غیره مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

برای نمایش چهارگانه تصاویر، عملگرهای چهارگانه مختلفی نیز توسعه یافته‌اند که از جمله مشهورترین آنها می‌توان به عملگرهای چرخش و انتقال کلیفورد اشاره نمود [۲۴]. با اعمال این عملگرها بر روی پیکسل‌های چهارگانه تصاویر رنگی، می‌توان مشخصه‌های مختلف و همبستگی‌های متقابل بین کانالی تصاویر رنگی را استخراج نمود. در تحقیقات مختلف، از این عملگرها در کاربردهای مختلف پردازش تصویر استفاده شده است [۲۶-۲۴].

اگرچه عملگرهای مذکور با موفقیت در کاربردهای مختلف استفاده شده‌اند، آنها اطلاعات بین کانالی محدودی را مورد استفاده قرار می‌دهند چراکه این عملگرها صرفاً ارتباط و همبستگی بین حداکثر دو یا سه چهارگان مختلف را در نظر می‌گیرند. بدیهی است اگر بتوان عملگرهایی طراحی کرد که قادر به در نظر گرفتن ارتباطات متقابل بین بیش از سه چهارگان مختلف باشند، می‌توان اطلاعات عمیق‌تر و پیچیده‌تری از تصاویر رنگی را توسط آنها استخراج نمود.

در این مقاله، ابتدا عملگرهای چهارگانه جدیدی موسوم به "عملگرهای چهارگانه ترکیبی"^۵ را پیشنهاد می‌دهیم که محدودیت‌های عملگرهای چهارگانه مرسوم را ندارند و قادرند تا اطلاعات عمیق‌تر و پیچیده‌تری از تصاویر رنگی را استخراج نمایند. عملگرهای پیشنهادی از ترکیب متوالی و دلخواه عملگرهای چهارگانه مرسوم به دست آیند و لذا توسط این عملگرها می‌توان ارتباط و اطلاعات متقابل بین چندین چهارگان را در نظر گرفت. سپس، روشی مبتنی بر کُدگذاری تُنک^۶ [۲۷-۲۸] را با استفاده از سه نمونه از عملگرهای چهارگانه ترکیبی پیشنهاد می‌دهیم و از آن برای توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی استفاده می‌کنیم.

توجه فرمایید که در تحقیقات پیشین نشان داده شده است که به طور کلی تصاویر طبیعی را می‌توان بر اساس "تعداد محدودی" از عناصر ساختاری ابتدایی^۷ همانند خطوط، نقطه‌ها، لبه‌ها و امثال آنها، توصیف نمود [۲۷، ۲۸]. چنین ساختارهای ساده‌ای عمدتاً

استفاده می‌شوند. در [۴]، از ویژگی‌های آماری ضرایب تبدیل موجک^۱ دوبعدی برای توصیف بافت استفاده می‌شود. در [۵]، روشی مبتنی بر آموزش کتابی^۲ از اتم‌های تصویری پیشنهاد گردید که توسط آن از توزیع آماری اتم‌های سازنده یک بافت تصویری جهت توصیف بافت استفاده می‌شود. در [۶]، روشی با حجم محاسباتی پایین موسوم به "الگوی باینری محلی"^۳ پیشنهاد گردید که در آن ابتدا همسایگی‌های محلی در تصویر بافت ورودی با کُدهایی خاص توصیف می‌گردند و سپس نمودار انباشتگی کُد‌های به دست آمده در کل تصویر به عنوان یک بردار ویژگی جهت توصیف بافت استفاده می‌شود. این روش جزو یکی از موفق‌ترین روش‌های موجود در این زمینه به شمار می‌رود و نسخه‌های بهبود یافته فراوانی از آن تاکنون توسعه یافته‌اند [۷].

در اکثر روش‌های موجود برای توصیف تصاویر بافتی، صرفاً از کانال‌های روشنایی تصاویر جهت استخراج ویژگی‌ها استفاده می‌شود و اطلاعات رنگی نادیده گرفته می‌شود [۱]. این در حالیست که رنگ نیز همانند بافت یک خصوصیت بسیار مهم برای درک و تمایز بین اشیاء مختلف می‌باشد. بنابراین، بدیهی است که با استفاده مناسب از اطلاعات رنگ، می‌توان انتظار بهبود دقت فرآیند توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافتی را داشت. از جمله مشهورترین روش‌های توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. در [۸]، تصویر بافت رنگی به صورت یک گراف در هر کانال رنگ مدل می‌شود و سپس آماره‌های مختلف بر روی کوتاه‌ترین مسیر بین رئوس مختلف گراف استخراج شده و از آنها به عنوان ویژگی‌های بافتی استفاده می‌شود. در [۹]، روشی مبتنی بر هیستوگرام‌های رنگی و الگوی باینری محلی برای دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی پیشنهاد گردید که در آن، اطلاعات متقابل بین کانال‌های رنگی در نظر گرفته می‌شود. در [۱۰]، از پیچیدگی بافتی در هر یک کانال‌های رنگی به صورت مجزا و همچنین به صورت توأمان جهت توصیف بافت استفاده می‌شود.

اخیراً، یک شیوه جدید نمایش تصاویر رنگی موسوم به نمایش چهارگانه (QR^۴) پیشنهاد شده است که توجه محققان فعال در حوزه پردازش تصاویر رنگی را به خود جلب کرده است [۱۳-۱۱]. یک چهارگان، یک عدد مختلط چهار بعدی می‌باشد که از ترکیب خطی یک عدد حقیقی با سه عدد موهومی تشکیل می‌شود [۱۴]. در نمایش چهارگانه تصاویر رنگی، هر پیکسل از یک تصویر رنگی توسط یک چهارگان توصیف می‌شود که ضرایب موهومی آن برابر با مولفه‌های قرمز، سبز و آبی پیکسل می‌باشد و ضریب حقیقی آن برابر با صفر می‌باشد. بدین ترتیب، هر سه مولفه رنگی یک پیکسل به صورت توأمان با یک عدد، کُد می‌شود.

¹Wavelet Transform

²Dictionary

³Local Binary Pattern

⁴Quaternionic Representation

⁵Hybrid Quaternionic Operator

⁶Sparse Coding

⁷Structural Primitives

چارچوب مبتنی بر کدگذاری تُنگ دانست. در حقیقت، تا آنجا که اطلاع داریم، ایده استفاده از عملگرهای چهارگانی ترکیبی برای استخراج اطلاعات رنگی از "تصاویر رنگی" برای اولین بار مطرح شده است. همچنین، تا آنجا که اطلاع داریم، ایده استفاده از کدگذاری تُنگ برای توصیف و دسته بندی "تصاویر رنگی بافتی" پیش پردازش شده توسط عملگرهای چهارگانی نیز برای اولین بار مطرح شده است.

طرح و سازمان کلی این مقاله به شرح ذیل است. در بخش ۲ به صورت خلاصه مفهوم ریاضیات چهارگانی و نمایش چهارگانی تصاویر را بررسی می‌کنیم. در بخش ۳، عملگرهای چهارگانی ترکیبی و همچنین روش پیشنهادی برای توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی ارائه می‌شود. آزمایشات تجربی و نتایج به دست آمده در بخش ۴ شرح داده می‌شوند و در نهایت، در بخش ۵، به جمع بندی و نتیجه گیری از مباحث مطرح شده می‌پردازیم.

۲ مفاهیم پایه

در این بخش، به مرور خلاصه مفهوم ریاضیات چهارگانی و نمایش چهارگانی تصاویر رنگی می‌پردازیم.

۱-۲ مفهوم چهارگان

مفهوم چهارگان^۵ (کوآترنیون) اولین بار توسط همیلتون ریاضی دان دان ایرلندی با بسط اعداد مختلط دو بعدی به چهار بعدی پیشنهاد شد [۱۴]. به طور کلی، یک عدد چهارگانی \vec{q} به صورت بردار مختلط زیر تعریف می‌شود:

$$\vec{q} = a1 + bi + cj + dk, \quad (۱)$$

که در آن $\{a, b, c, d\}$ ضرایب بردار هستند و قواعد زیر بر روی سه بردار پایه $\{i, j, k\}$ تعریف می‌شوند:

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1, \quad (۲)$$

$$ij = -ji = k, \quad (۳)$$

$$jk = -kj = i, \quad (۴)$$

$$ki = -ik = j. \quad (۵)$$

روابط فوق نشان می‌دهند که ضرب دو عدد چهارگانی جابجا پذیر نمی‌باشد. بر روی اعداد چهارگان، عملگرهای مختلفی همانند عملگر جمع و ضرب، مزدوج، اندازه و معکوس می‌تواند اعمال شود که تعریف ریاضی سه مورد اخیر به صورت زیر می‌باشد:

$$\vec{q}^* = a1 - bi - cj - dk, \quad (۶)$$

$$|\vec{q}| = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}, \quad (۷)$$

$$\vec{q}^{-1} = \frac{\vec{q}^*}{|\vec{q}|^2} = \frac{a1 - bi - cj - dk}{a^2 + b^2 + c^2 + d^2}. \quad (۸)$$

در روابط فوق، چنانچه $a = 0$ ، آنگاه به عدد چهارگان حاصله، عدد چهارگان خالص^۶ گفته می‌شود.

در تصاویر بافتی مشاهده می‌شوند. لذا، اگر چنین ساختارهایی را به عنوان اتم‌های سازنده تصاویر بافتی در نظر بگیریم، یک تصویر بافتی دلخواه را می‌توان با ترکیب خطی تعداد اندکی از این اتم‌های سازنده توصیف و یا بازسازی نمود [۲۸]. به عبارت دیگر، ضرایب ترکیب خطی به دست آمده عمدتاً صفر و یا نزدیک به صفر خواهند بود که این به معنی تُنگی ضرایب می‌باشد.

از دیدگاه دیگر، تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که اگر تصاویر طبیعی حاوی بافت را توسط مجموعه‌ای از فیلترهای گابور لگاریتمی^۱ پالایش (فیلتر) نماییم و هیستوگرام پاسخ‌های به دست آمده را نمایش دهیم، چنین هیستوگرام‌هایی عمدتاً کورتوسیس^۲ (کشیدگی قله) بالایی را نشان می‌دهند که چنین اثری عمدتاً برای سیگنال‌ها با ساختار تُنگ اتفاق می‌افتد چراکه، اگر یک سیگنال در یک حوزه تبدیل^۳ تُنگ باشد، اکثر ضرایب تبدیل آن صفر و یا نزدیک به صفر بوده و لذا هیستوگرام ضرایب تبدیل آن حول صفر دارای قله برجسته یا کشیده خواهد بود [۲۸].

از یک دیدگاه دیگر، تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که اگر یک روش کدگذاری تُنگ را بر روی تکه‌هایی از تصاویر طبیعی اعمال نماییم، اتم‌ها یا پایه‌های به دست آمده دارای شکل ظاهری شبیه به گیرنده‌های نوری موجود در شبکیه چشم و نرون‌ها یا سلول‌های موجود در سیستم بینایی مغز انسان (همانند LGN^۴ها) هستند [۲۷]. تحلیل محققان از این موضوع این است که سیستم بینایی مغز انسان به دلیل توان پردازشی محدود نیاز دارد تا اطلاعات را به صورت انتخابی پردازش کند تا حجم اطلاعات ارسالی به لایه‌های پردازشی بالاتر را کاهش دهد. به عبارت دیگر، سیستم بینایی مغز سیگنال‌های تصویری دریافتی را توسط چنین گیرنده‌ها یا سلول‌ها پردازش می‌کند تا پاسخ خروجی آنها تا حد امکان تُنگ باشد [۴۷]. جالب است که بدانیم شکل ظاهری چنین فیلترهای بیولوژیکی را می‌توان با پارامترهای مختلف فیلترهای گابور لگاریتمی شبیه‌سازی نمود [۴۴]. مطالب فوق، انگیزه و دلیل اصلی برای استفاده از کدگذاری تُنگ برای توصیف تصاویر بافتی در این مقاله را بیان می‌دارند.

نتایج آزمایشات تجربی به دست آمده نشان می‌دهد که روش پیشنهادی از دقت بالاتری در مقایسه با سایر روش‌های دسته بندی تصاویر بافتی موجود بر روی سه پایگاه داده چالش برانگیز از تصاویر بافتی رنگی، برخوردار است.

لازم به ذکر است که در تحقیقات پیشین، روش‌های مختلفی برای دسته بندی تصاویر بافتی با استفاده از کدگذاری تُنگ توسعه یافته‌اند [۴۰-۴۲]. لذا مهمترین نوآوری این مقاله را می‌توان ارائه ایده عملگرهای چهارگانی ترکیبی برای استخراج اطلاعات غنی تر از تصاویر بافتی رنگی در قالب یک مرحله پیش پردازش در یک

^۱Log-Gabor Filters

^۲Kurtosis

^۳Transform Domain

^۴Lateral Ganglion Neurons

^۵Quaternion

^۶Pure Quaternion

۲-۲ نمایش چهارگانی تصاویر رنگی

فرض کنید $R(x, y)$ ، $G(x, y)$ و $B(x, y)$ به ترتیب بیانگر مولفه های قرمز، سبز و آبی یک تصویر رنگی دلخواه در موقعیت (x, y) باشند. در اکثر روش های موجود برای پردازش تصاویر رنگی، مولفه های رنگی به صورت جداگانه پردازش می شوند. چنانچه بخواهیم هر سه مولفه رنگی را به صورت توامان با یکدیگر در نظر گرفته و بر روی آنها پردازش انجام دهیم، می توانیم از نمایش چهارگانی تصویر رنگی به صورت زیر استفاده کنیم:

$$\vec{q}(x, y) = R(x, y)\mathbf{i} + G(x, y)\mathbf{j} + B(x, y)\mathbf{k}. \quad (9)$$

که در آن $\vec{q}(x, y)$ ، بیانگر عدد چهارگانی تصویر در موقعیت (x, y) می باشد. بدیهی است با اعمال یک عملگر پردازشی دلخواه بر روی $\vec{q}(x, y)$ ، هر سه مولفه رنگی به صورت همزمان مورد استفاده قرار می گیرند.

۲-۳ عملگرهای تک کاره و دوکاره چهارگانی

در تحقیقات و کاربردهای مختلف پردازش تصویر، عملگرهای متعددی برای اعداد چهارگانی تعریف شده اند [۲۹]. از جمله آنها می توان به عملگرهای چرخش، انعکاس و انتقال کلیفوردا^۱ اشاره نمود. به طور کلی، می توان چنین عملگرهایی را می توان به دو دسته عملگرهای "چهارگانه چند بخشی تک کاره" (SAMQ) و عملگرهای "چهارگانه چند بخشی دو کاره" (DAMQ) تقسیم بندی کرد [۲۹]. یک عملگر SAMQ تعامل (ارتباط) بین دو عدد چهارگان \vec{q} و \vec{p} را به صورت زیر در نظر می گیرد:

$$\varphi(\vec{q}, \vec{p}) = \vec{q}\vec{p}. \quad (10)$$

$$\varphi(\vec{p}, \vec{q}) = \vec{p}\vec{q}. \quad (11)$$

چنانچه \vec{p} یک عدد چهارگانه با اندازه واحد^۲ باشد، عملگر SAMQ حاصله را انتقال کلیفوردا می نامند. به منظور در نظر گرفتن، تعاملات و ارتباطات بیشتر، می توان از عملگرهای DAMQ استفاده نمود. یک عملگر DAMQ برای \vec{q} به صورت زیر تعریف می شود:

$$\psi(\vec{p}_1, \vec{q}, \vec{p}_2) = \vec{p}_1\vec{q}\vec{p}_2. \quad (12)$$

که در آن \vec{p}_1 و \vec{p}_2 دو عدد چهارگان دلخواه می باشند که با تعریف مناسب آنها می توان تبدیلات متفاوتی را به وجود آورد. به عنوان مثال، چنانچه هر سه چهارگان $\vec{p}_1, \vec{q}, \vec{p}_2$ خالص باشند و $\vec{p}_1 = \vec{p}_2$ و $|\vec{p}_1| = |\vec{p}_2| = 1$ ، آنگاه عملگر DAMQ حاصله تبدیل انعکاس سه بعدی خوانده می شود [۲۹]. همچنین، اگر \vec{q} یک چهارگان خالص باشد، $\vec{p}_1 = \vec{p}_2^{-1}$ یک چهارگان واحد باشد و $\vec{p}_2 = \vec{p}_1^{-1}$ ، آنگاه عملگر حاصله چرخش سه بعدی نامیده می شود [۲۹]. برای کسب اطلاعات بیشتر در این زمینه، لطفاً به [۲۹] مراجعه نمایید.

۳ روش پیشنهادی

همانطور که در مقدمه ذکر شد، در این مقاله، ابتدا عملگرهای چهارگانی جدیدی موسوم به عملگرهای چهارگانی ترکیبی را پیشنهاد می کنیم و سپس با استفاده از آنها و مفهوم کُدگذاری تُنک، روشی جدید جهت توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی رنگی ارائه می دهیم. در این بخش، به شرح این موارد پیشنهادی می پردازیم.

۳-۱ عملگرهای چهارگانی ترکیبی

همانطور که در مقدمه ذکر شد، در پردازش تصاویر رنگی، عمدتاً کانال های رنگی به صورت مجزا در نظر گرفته می شوند، در حالیکه با استفاده از نمایش چهارگانی تصاویر و بکارگیری عملگرهای SAMQ و DAMQ می توان اطلاعات و ویژگی های پیچیده تری از تصاویر رنگی را به صورت توامان به دست آورد. برای استخراج اطلاعات عمیق تر از تصاویر رنگی، در این بخش "عملگرهای چهارگانی ترکیبی" موسوم به HQO را پیشنهاد می دهیم که از ترکیب عملگرهای SAMQ و DAMQ در یک ساختار سلسه مراتبی همانند ساختارهای سلسه مراتبی در شبکه های عصبی عمیق به دست می آیند.

عملگرهای پیشنهادی از یک ساختار سلسه مراتبی تولید می شوند که در آن، عناصر سازنده ساختار، عملگرهای SAMQ و DAMQ می باشند و با اعمال این عملگرها به صورت متوالی، عملگر نهایی به دست می آید. به بیان ریاضی، تبدیل یک چهارگان \vec{q} با استفاده از $\{\vec{p}_1, \dots, \vec{p}_n\}$ توسط یک عملگر HQO را به صورت زیر تعریف می کنیم:

$$\Omega(\vec{q}, \vec{p}_1, \dots, \vec{p}_n) = \prod_{i=1}^n f_i(\vec{q}, P_i). \quad (13)$$

که در آن f_i می تواند به صورت دلخواه یک عملگر SAMQ یا DAMQ باشد و P_i یک زیرمجموعه تک عضوی یا دو عضوی دلخواه از $\{\vec{p}_1, \dots, \vec{p}_n\}$ می باشد. توجه نمایید، اگر f_i یک عملگر SAMQ باشد، P_i تک عضوی خواهد بود و چنانچه f_i یک عملگر DAMQ باشد، P_i دو عضوی خواهد بود. با استفاده از عملگر پیشنهادی، می توان تبدیلات بسیار مختلفی را تولید نمود و از آنها برای استخراج اطلاعات عمیق مختلف از تصاویر رنگی استفاده نمود. به عنوان مثال، در این مقاله، سه عملگر چهارگانی ترکیبی زیر را برای توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی رنگی پیشنهاد می دهیم:

$$\Omega_1(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = \vec{q}\vec{p}_1\vec{q}\vec{p}_2. \quad (14)$$

$$\Omega_2(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = \vec{p}_1\vec{q}\vec{p}_1^{-1}\vec{p}_2\vec{q}\vec{p}_2^{-1}. \quad (15)$$

$$\Omega_3(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = \vec{p}_1\vec{q}\vec{p}_1^{-1}\vec{q}\vec{p}_2. \quad (16)$$

می توان دید که عملگر پیشنهادی $\Omega_1(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2)$ از ترکیب دو عملگر SAMQ به صورت زیر به دست می آید:

$$\Omega_1(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = f_1(\vec{q}, P_1)f_2(\vec{q}, P_2). \quad (17)$$

¹ Clifford Translation

² Single Action Manifold of Quaternion

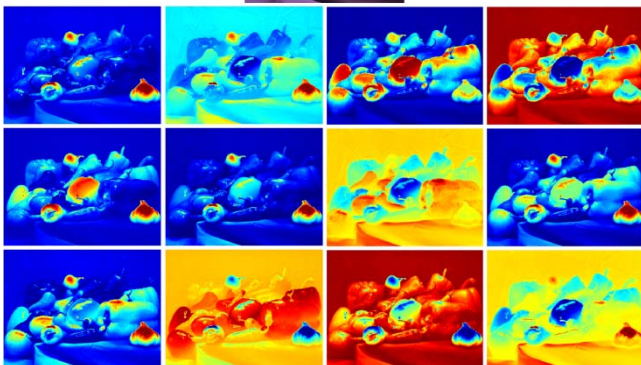
³ Double Action Manifold of Quaternion

⁴ Unit Quaternion

حول \vec{p}_1 و \vec{p}_2 می باشند که هر کدام، یک چهارگان جدید را نتیجه می دهند. سپس دو چهارگان حاصله همانند (۱۵) در یکدیگر ضرب می شوند تا یک چهارگان جدید به وجود آید. همانند بحث فوق، ضرایب چهارگان نهایی، رابطه بین دو چهارگان به دست آمده پس از چرخش را توصیف می نماید.

به طریق مشابه می توان نشان داد که سومین عملگر پیشنهادی یعنی $\Omega_3(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2)$ ترکیبی از یک چرخش $(\vec{p}_1 \vec{q} \vec{p}_1^{-1})$ و یک انتقال کلیفورد $(\vec{q} \vec{p}_2)$ می باشد. به عبارت دیگر، با استفاده از این عملگر، ابتدا \vec{q} حول \vec{p}_1 چرخش می یابد. از طرف دیگر، $\vec{q} \vec{p}_2$ شباهت های درون کانالی و تفاوت های بین کانالی \vec{q} و \vec{p}_2 را می سنجد. سپس، شباهت های درون کانالی و تفاوت های بین کانالی چهارگانه حاصله از چرخش حول \vec{p}_1 و $\vec{q} \vec{p}_2$ سنجیده می شود.

شکل ۱، یک تصویر نمونه رنگی به همراه نمایش چهارگانی حاصل از اعمال هر یک از سه عملگر پیشنهادی مذکور نشان می دهد. توجه نمایید، از آنجاییکه که هر عملگر دارای چهار ضریب می باشد، با اعمال یک عملگر بر روی یک تصویر رنگی، چهار تصویر مجزا به وجود می آید که هر تصویر در بردارنده یکی از ضرایب چهارگانی می باشد. همانطور که از این مثال مشاهده می شود، هر یک از تصاویر چهارگانی به دست آمده اطلاعات بخش های مختلفی از تصویر ورودی را استخراج می نماید.



شکل ۱: یک تصویر رنگی نمونه (سطر اول) و نمایش چهارگانی آن حاصل از اعمال Ω_1 (سطر دوم)، حاصل از اعمال Ω_2 (سطر سوم)، حاصل از اعمال Ω_3 (سطر چهارم). برای نمایش هر کانال چهارگانه (که خود به مثابه یک تصویر سطح خاکستری است) از یک نقشه حرارتی (Heat Map) استفاده شده است تا بدین صورت بتوان ساده‌تر به مقایسه کانال های مختلف پرداخت.

همانطور که ذکر شد، عملگرهای چهارگانی ترکیبی پیشنهادی از ترکیب دلخواه مجموعه ای از عملگرهای SAMQ و DAMQ در یک ساختار سلسه مراتبی تشکیل می شوند. بدیهی است، عملگرهای مختلف، اطلاعات مختلفی را استخراج می نمایند. در حقیقت، ساختار سلسه مراتبی عملگرهای چهارگانی ترکیبی پیشنهادی را می توان همانند ساختار سلسه مراتبی شبکه های

که در آن $P_1 = \{\vec{p}_1\}$ و $P_2 = \{\vec{p}_2\}$. همچنین عملگر پیشنهادی $\Omega_2(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2)$ از ترکیب دو عملگر DAMQ به صورت زیر به دست می آید:

$$\Omega_2(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = f_1(\vec{q}, P_1) f_2(\vec{q}, P_2). \quad (18)$$

که در آن $P_1 = \{\vec{p}_1, \vec{p}_1^{-1}\}$ و $P_2 = \{\vec{p}_2, \vec{p}_2^{-1}\}$. عملگر پیشنهادی $\Omega_3(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2)$ از ترکیب یک عملگر DAMQ و یک عملگر SAMQ به صورت زیر به دست می آید:

$$\Omega_3(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = f_1(\vec{q}, P_1) f_2(\vec{q}, P_2). \quad (19)$$

که در آن $P_1 = \{\vec{p}_1, \vec{p}_1^{-1}\}$ و $P_2 = \{\vec{p}_2\}$. برای درک این موضوع که چگونه هر یک از این عملگرها اطلاعات و یا ویژگی های مختلفی را از تصویر رنگی استخراج می کنند، در ادامه، بسط ریاضی هر یک از سه عملگر ترکیبی پیشنهادی را به صورت مفهومی بررسی می کنیم. برای این منظور، فرض کنید که $\vec{q} = (R_0 \mathbf{i} + G_0 \mathbf{j} + B_0 \mathbf{k})$ بیانگر چهارگان یک پیکسل از یک تصویر رنگی مفروض باشد. همچنین، فرض کنید که $\vec{p}_1 = (R_1 \mathbf{i} + G_1 \mathbf{j} + B_1 \mathbf{k})$ و $\vec{p}_2 = (R_2 \mathbf{i} + G_2 \mathbf{j} + B_2 \mathbf{k})$ در مورد اولین عملگر، به دست می آوریم:

$$\begin{aligned} \vec{q} \vec{p}_1 &= (R_0 \mathbf{i} + G_0 \mathbf{j} + B_0 \mathbf{k})(R_1 \mathbf{i} + G_1 \mathbf{j} + B_1 \mathbf{k}) \\ &= -(R_0 R_1 + G_0 G_1 + B_0 B_1) \mathbf{1} + (G_0 B_1 - B_0 G_1) \mathbf{i} \\ &\quad + (B_0 R_1 - R_0 B_1) \mathbf{j} + (R_0 G_1 - G_0 R_1) \mathbf{k} \\ &\triangleq -\zeta_1 \mathbf{1} + \alpha_1 \mathbf{i} + \beta_1 \mathbf{j} + \eta_1 \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (20)$$

از رابطه فوق مشاهده می کنیم که ضرایب $\vec{q} \vec{p}_1$ را می توان به دو بخش تقسیم کرد. بخش اول، حاصل ضرب نظیر به نظیر (R_0, G_0, B_0) در (R_1, G_1, B_1) می باشد، در حالیکه بخش دوم تفاوت ضرب ضرایب بین کانالی مختلف می باشد. به طریق مشابه داریم:

$$\begin{aligned} \vec{q} \vec{p}_2 &= (R_0 \mathbf{i} + G_0 \mathbf{j} + B_0 \mathbf{k})(R_2 \mathbf{i} + G_2 \mathbf{j} + B_2 \mathbf{k}) \\ &= -(R_0 R_2 + G_0 G_2 + B_0 B_2) \mathbf{1} + (G_0 B_2 - B_0 G_2) \mathbf{i} \\ &\quad + (B_0 R_2 - R_0 B_2) \mathbf{j} + (R_0 G_2 - G_0 R_2) \mathbf{k} \\ &\triangleq -\zeta_2 \mathbf{1} + \alpha_2 \mathbf{i} + \beta_2 \mathbf{j} + \eta_2 \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (21)$$

بنابراین، هر دوی $\vec{q} \vec{p}_1$ و $\vec{q} \vec{p}_2$ یک نوع مشخصه یکسان از \vec{q} را با مقایسه مستقیم ضرایب آن با ضرایب دو چهارگان متفاوت \vec{p}_1 و \vec{p}_2 استخراج می کنند. حال با جایگذاری (۲۰) و (۲۱) در (۱۷)، به دست می آوریم:

$$\Omega_1(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2) = \zeta_3 \mathbf{1} + \alpha_3 \mathbf{i} + \beta_3 \mathbf{j} + \eta_3 \mathbf{k}. \quad (22)$$

که در آن:

$$\zeta_3 = \zeta_1 \zeta_2 - \alpha_1 \alpha_2 - \beta_1 \beta_2 - \eta_1 \eta_2. \quad (23)$$

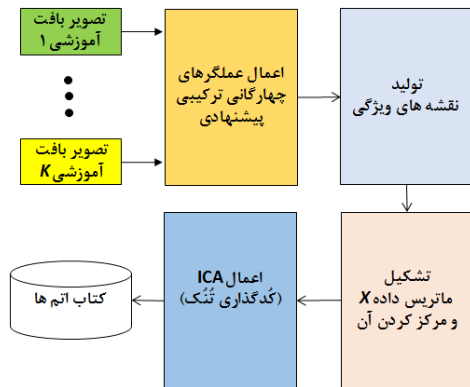
$$\alpha_3 = \beta_1 \eta_2 - \zeta_1 \alpha_2 - \zeta_2 \alpha_1 - \eta_1 \beta_2. \quad (24)$$

$$\beta_3 = \eta_1 \alpha_2 - \zeta_1 \beta_2 - \zeta_2 \beta_1 - \alpha_1 \eta_2. \quad (25)$$

$$\eta_3 = \alpha_1 \beta_2 - \zeta_1 \eta_2 - \zeta_2 \eta_1 - \beta_1 \alpha_2. \quad (26)$$

با توجه به روابط فوق، مشاهده می کنیم که ضرایب عملگر ترکیبی $\Omega_1(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2)$ ، توصیفی سطح بالاتر از تفاوت (یا شباهت) بین \vec{q} و \vec{p}_1 و \vec{p}_2 را در مقایسه با $\vec{q} \vec{p}_1$ و $\vec{q} \vec{p}_2$ فراهم می سازند. در مورد دومین عملگر پیشنهادی یعنی $\Omega_2(\vec{q}, \vec{p}_1, \vec{p}_2)$ ، می توان نشان داد که $\vec{p}_1 \vec{q} \vec{p}_1^{-1}$ و $\vec{p}_2 \vec{q} \vec{p}_2^{-1}$ به ترتیب بیانگر چرخش \vec{q}

بخش ۴-۲ نشان داده می‌شود، به صورت تجربی از $W = 8$ استفاده می‌شود. بدین صورت، در هر کانال، یک نقشه ویژگی F_l از ابعاد $\left(\frac{M}{W}\right) \times \left(\frac{N}{W}\right)$ به دست می‌آید که در آن $l = 1, \dots, C$. پس از آن، هر یک از نقشه‌های F_l حاصله، برداری شده و در یک سطر از یک ماتریس داده به نام X قرار می‌گیرد. بنابراین ماتریس X از ابعاد $C \times L$ خواهد بود که در آن $L = \left(\frac{M}{W}\right) \times \left(\frac{N}{W}\right)$. سپس، میانگین هر ستون از ماتریس داده X محاسبه شده و از کلیه درایه‌های موجود در آن ستون کم می‌شود تا بدین صورت داده‌های به دست آمده برای هر بلوک، حول صفر مرکز شوند.



شکل ۲: نمودار گردش کار مرحله ساخت کتاب اتم‌های سازنده تصاویر بافتی در روش پیشنهادی

تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که ارتباط نزدیکی بین کُدگذاری تُنک و آنالیز مولفه‌های مستقل (ICA^۳) وجود دارد [۳۰]. دلیل این موضوع این است که تُنکی یک سیگنال در یک حوزه تبدیل به معنی این است که توزیع آماری ضرایب تبدیل آن سیگنال به صورت یک ابرگاوسین^۴ است، یعنی هیستوگرام ضرایب تبدیل آن دارای قله بسیار کشیده است و یا به عبارتی کورتوسیس آن بالاست [۲۸]. ICA نیز دقیقاً تلاش می‌کند تا مولفه‌های مستقل سازنده یک سیگنال را به گونه‌ای به دست آورد که توزیع آماری ضرایب مولفه‌های به دست آمده تا حد امکان به یک ابرگاوسین نزدیک شود [۳۰]. در حقیقت، برای به دست آوردن مولفه‌های مستقل در ICA از یک مسئله بهینه‌سازی استفاده می‌شود که در آن میزان کورتوسیس ضرایب مولفه‌های مستقل به دست آمده بیشینه می‌شود. به این دلیل، در تحقیقات بسیاری، از ICA به عنوان یک الگوریتم کُدگذاری تُنک استفاده می‌شود [۳۰].

بر اساس مطالب فوق، برای ساخت کتاب، از الگوریتم پرسرعت [۳۰FastICA] استفاده می‌کنیم که این الگوریتم شیوه‌ای سریع برای پیاده‌سازی ICA در عمل می‌باشد. برای این منظور، ماتریس داده X را به عنوان ورودی الگوریتم FastICA استفاده می‌کنیم. خروجی این الگوریتم، یک کتاب (دیکشنری) در قالب یک

عصبی چند لایه در نظر گرفت که در آن هر عملگر SAMQ یا DAMQ همانند یک نرون عصبی است که یک یا چند ورودی دارد و یک خروجی. در تحقیقات بسیاری [۴۵، ۴۶]، از مقدار خروجی نرون‌های لایه‌های مختلف شبکه‌های عصبی به عنوان ویژگی برای کاربردهای مختلف همانند تشخیص اشیاء و تشخیص صحنه استفاده شده است. اما در عمده این تحقیقات، این مسئله که خروجی کدام نرون‌ها و یا کدام لایه‌ها برای کاربرد مورد نظر می‌بایست مورد استفاده قرار گیرد، موضوعی است که یا به صورت تجربی حل می‌شود یا بر اساس یک معیار خاص یا بهینه‌سازی یک تابع هدف مشخص. به عبارت دیگر، برای یک کاربرد مشخص، لزوماً استفاده از خروجی یک نرون یا یک لایه خاص ممکن است مفید نباشد. همین موضوع برای عملگرهای چهارگانه ترکیبی پیشنهادی نیز صدق می‌کند. یعنی، لزوماً هر عملگر چهارگانه ترکیبی جدید برای کاربرد مورد نظر مفید نیست و انتخاب آنها بسته به کاربرد دارد. در حقیقت، به عنوان یک کار آتی، در نظر داریم تا روشی برای یافتن عملگرهای چهارگانه ترکیبی بهینه برای کاربردهای مختلف از جمله دسته‌بندی بافت‌های رنگی طراحی نماییم. اما در این مقاله، صرفاً از سه عملگر ترکیبی مذکور استفاده می‌نماییم.

۲-۳ روش پیشنهادی برای توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافتی رنگی

روش پیشنهادی برای توصیف و دسته‌بندی تصاویر بافتی از سه مرحله زیر تشکیل می‌یابد: (۱) ساخت کتاب اتم‌های سازنده تصاویر بافتی، (۲) استخراج ویژگی‌های تُنک و (۳) دسته‌بندی تصویر بافتی. در ادامه به شرح هر یک از این مراحل می‌پردازیم.

۳-۲-۱- ساخت کتاب اتم‌های سازنده تصاویر بافتی

فرض کنید تعداد K تصویر رنگی آموزشی از ابعاد $M \times N$ در اختیار داریم. ابتدا هر یک از سه عملگر ترکیبی پیشنهادی در بخش قبل بر روی هر یک از این تصاویر اعمال می‌شوند. بدین صورت، برای هر پیکسل از هر تصویر، یک بردار از طول ۴ توسط هر یک از سه عملگر مذکور به دست می‌آید که اعضای هر بردار برابر با ضرایب چهارگان حاصل از اعمال عملگر مربوطه بر روی تصویر می‌باشد. بدین صورت، با الحاق سه بردار به دست آمده برای هر پیکسل، یک بردار ویژگی به طول $C = 12$ به دست می‌آید که توصیف‌کننده اطلاعات رنگی آن پیکسل می‌باشد. بدین ترتیب، هر تصویر آموزشی را می‌توان به صورت یک تصویر با C کانال در نظر گرفت. سپس، به منظور کاهش حجم اطلاعات، کلیه کانال‌های هر تصویر آموزشی به بلوک‌های $W \times W$ غیر همپوشان تقسیم بندی می‌شود و میانگین هر بلوک به عنوان نماینده آن بلوک در آن کانال در نظر گرفته می‌شود. در این مقاله، همانطور که در

² Feature Map

³ Independent Component Analysis

⁴Super-Gaussian

¹Dictionary

همانند زیر، از ضرب کتاب D در ماتریس داده X_{test} یک ماتریس ویژگی G از ابعاد $C \times B$ به دست می‌آید:

$$G = DX_{test} \quad (27)$$

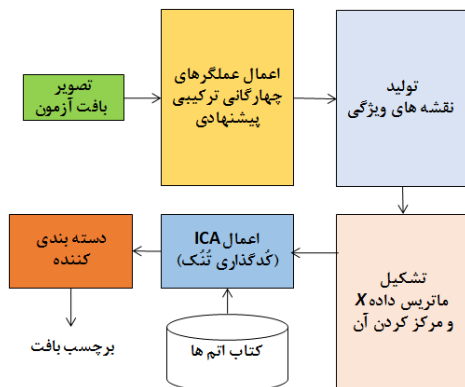
که در آن، هر ستون از ماتریس G حاوی بردار ویژگی \mathbf{t}_{kk} متناظر با یک بلوک از تصویر ورودی می‌باشد. برای به دست آوردن یک بردار ویژگی کلی از تصویر ورودی، g ، میانگین کلیه ستون‌های موجود در G را به صورت زیر به دست می‌آوریم و از آن برای توصیف تصویر بافت ورودی استفاده می‌کنیم:

$$g(i) = \frac{1}{B} \sum_{j=1}^B G(i, j), \quad (28)$$

که در آن $G(i, j)$ بیانگر عنصر موجود در موقعیت (i, j) در ماتریس G می‌باشد و $i = 1, \dots, C$. توجه نمایید که بردار g از طول C خواهد بود.

۳-۲-۳- دسته بندی تصویر بافتی

در این مقاله، برای دسته بندی تصاویر بافتی از طبقه بندی کننده نزدیکترین همسایه با فاصله کای مربع (χ^2) استفاده می‌کنیم. برای این منظور، لازم است تا از هر دسته از تصاویر بافتی آموزشی، بردار ویژگی \mathbf{t}_{kk} به دست آمده توسط (۲۸) برای حداقل یک نمونه، ذخیره گردد. شکل ۳ نمودار گردش کار مرحله استخراج ویژگی‌های \mathbf{t}_{kk} و مرحله دسته بندی یک تصویر بافتی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمودار گردش کار مرحله استخراج ویژگی‌های \mathbf{t}_{kk} و دسته بندی یک تصویر بافتی آزمون

۴ آزمایشات و نتایج تجربی

در این بخش، به ارزیابی روش پیشنهادی برای توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی رنگی می‌پردازیم. در ادامه، از عنوان HQO برای مشخص کردن روش پیشنهادی استفاده می‌شود.

۴-۱ پایگاه های داده مورد استفاده

برای ارزیابی دقت دسته بندی روش پیشنهادی از سه پایگاه داده از تصاویر بافتی رنگی با دسته مشخص زیر استفاده گردید:

- پایگاه داده [KTH-TIPS2-a-31]: این پایگاه داده حاوی ۴۳۹۵ تصویر از ابعاد 200×200 از ۱۱ دسته متفاوت از

ماتریس D حاوی C اتم، هر یک از طول C می‌باشد که در آن، هر اتم در یک سطر از کتاب قرار دارد. کتاب به دست آمده برای مراحل بعد در حافظه ذخیره می‌شود. توجه فرمایید که ساخت کتاب فقط یکبار در حالت غیر برخط^۱ انجام می‌شود و در دفعات بعد، صرفاً از کتاب ذخیره شده استفاده می‌شود. تنها پارامتر الگوریتم FastICA یک آستانه کوچک ϵ است که از آن برای تعیین شرط همگرایی الگوریتم استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، ϵ بیانگر حداکثر خطای مجاز برای همگرایی الگوریتم است. هر چه ϵ کوچکتر باشد، تعداد دفعات تکرار بیشتری برای کاهش خطای همگرایی الگوریتم نیاز است. در این مقاله، به صورت تجربی $\epsilon = 10^{-6}$ در نظر گرفته شده است.

شکل ۲ نمودار گردش کار این مرحله از روش پیشنهادی را نشان می‌دهد. در این مقاله، از ۲۴ تصویر رنگی موجود در پایگاه تصویری [Kodak ۳۹] برای ساخت کتاب مذکور استفاده می‌کنیم. توجه شود که در این مقاله، هدف استفاده از اطلاعات بافت و اطلاعات رنگ به صورت "توامان" جهت حصول به دقت بالا در دسته بندی تصاویر بافتی رنگی می‌باشد. تبدیلات چهارگانه ترکیبی پیشنهادی صرفاً در قالب یک عملیات "پیش پردازش"، فقط "اطلاعات رنگی" هر پیکسل از تصویر بافت را به صورت یک بردار ویژگی مدل می‌نمایند و سپس عملیات \mathbf{t}_{kk} سازی بر روی بلوک‌ها یا تکه‌های تصویری در حوزه مکان (و نه در حوزه مولفه های چهارگانه) انجام می‌شود؛ با این تفاوت که در فرآیند \mathbf{t}_{kk} سازی، به جای استفاده از مقدار روشنایی هر پیکسل، از بردار ویژگی آن پیکسل استفاده می‌شود. به عبارت دیگر، عملیات \mathbf{t}_{kk} سازی همچنان در حوزه مکان صورت می‌گیرد. بنابراین، ویژگی‌های به دست آمده همچنان ویژگی‌های بافتی می‌باشند اما اطلاعات رنگ نیز به صورت ضمنی در آن‌ها مستتر می‌باشند. در حقیقت، اتم‌های به دست آمده در دیکشنری حاصله به صورت بلوک‌های مکانی هستند که هر پیکسل آن‌ها دارای یک بردار ویژگی می‌باشد. به طور خلاصه، عملگرهای چهارگانه پیشنهادی صرفاً برای استخراج اطلاعات رنگی پیکسل‌ها و عملیات \mathbf{t}_{kk} سازی اعمالی بر روی بلوک‌های مکانی تصویر، برای استخراج اطلاعات بافتی استفاده می‌شود.

۳-۲-۲- استخراج ویژگی های تئک

هدف اصلی این مرحله، استخراج یک بردار ویژگی (کُد) \mathbf{t}_{kk} از یک تصویر ورودی با استفاده از کتاب تولید شده می‌باشد. برای این منظور، همان فرآیند تولید ماتریس داده X که در مرحله آموزش انجام می‌گیرد را بر روی تصویر ورودی اعمال می‌کنیم تا یک ماتریس داده X_{test} از ابعاد $C \times B$ به دست آید که در آن B بیانگر تعداد بلوک‌های استخراج شده از تصویر ورودی می‌باشد. سپس،

¹ Offline

² Sparse feature vector

۴-۲ نتایج به دست آمده

برای مقایسه دقت روش پیشنهادی بر روی هر یک از پایگاه‌های داده معرفی شده، از دو دسته از روش‌های موجود استفاده گردید. دسته اول شامل برخی از برجسته‌ترین روش‌های توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی سطح خاکستری هستند که آن‌ها را به صورت مجزا بر روی هر یک از کانال‌های رنگی اعمال نمودیم. برای این منظور از روش‌های [۳۴SIFT]، [۳۵WLD]، [۳۶DRLBP]، [۳۶DRLTP]، [۳۷LCVBP]، [۴۳LTP]، [۴۸NrCLBP] و [۸Shortest Graph] استفاده کردیم. دسته دوم شامل روش‌های مشابه موجود بر مبنای نمایش چهارگانه تصاویر بافتی رنگی می‌باشند. برای این منظور از روش‌های [۲۲QLBP]، [۳۸QLRBP] و [۲۶QMCPBP] استفاده نمودیم. برای پیاده‌سازی روش‌های استفاده شده در آزمایشات، از کد اصلی روش‌های DRLBP، WLD، SIFT، LTP، LBP، DRLTP، QMCPBP، QLRBP، QLBP، DRLTP، Matlab در محیط استفاده شد. این کدها بر روی اینترنت موجود می‌باشند. اما کد روش‌های Shortest Graph، LCVBP، از طریق نامه نگاری با نویسندگان آنها به دست آمد. فقط روش NrCLBP توسط نویسنده پیاده‌سازی گردید. کلیه نتایج مربوط به مقالات پیشین توسط نویسنده به دست آمده است که با نتایج گزارش شده در مقالات مربوطه تطابق دارد. برای رعایت عدالت، کلیه آزمایشات انجام شده در این بخش، تحت یک شرایط یکسان به دست آمدند. اعتبار سنجی کلیه روش‌ها توسط شرایط ذکر شده در بخش قبل برای هر یک از سه پایگاه داده استفاده شده، انجام گرفت. مجدداً توجه فرمایید که شرایط اعتبار سنجی مذکور، عیناً مشابه شرایط اعتبارسنجی استفاده شده در مقالات رقیب اخیر می‌باشد [۲۶]. این امر امکان مقایسه مستقیم نتایج گزارش شده در این مقاله با سایر مقالات پیشین را فراهم می‌کند.

نتایج به دست آمده بر روی پایگاه داده KTH-TIPS2 در جدول ۱ گزارش شده است. همانطور که از این نتایج مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی (HQO) بیشترین دقت را در میان همه روش‌های مقایسه شده بر روی این پایگاه داده نتیجه می‌دهد. پس از روش پیشنهادی، روش QMCPBP در رتبه دوم با اختلاف حدود ۲ درصد قرار می‌گیرد. این روش ترکیبی از روش LBP، کنتراست مابکسون و نمایش چهارگانه است. همچنین، ملاحظه می‌شود که روش پیشنهادی از عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش‌های مبتنی بر نمایش چهارگانه برخوردار است.

نتایج به دست آمده برای پایگاه داده USPTex در جدول ۲ گزارش شده است. مجدداً مشاهده می‌شود که روش پیشنهادی همچنان بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر روش‌ها از خود نشان می‌دهد. پس از روش پیشنهادی، روش‌های LCVBP و WLD به ترتیب در جایگاه دوم تا سوم قرار می‌گیرند.

نتایج به دست آمده برای پایگاه داده Outex TC00013 در جدول ۳ گزارش شده است. از این نتایج مشاهده می‌شود که روش

تصاویر بافتی رنگی می‌باشد. در سطر اول شکل ۴ چند تصویر نمونه از این پایگاه، نمایش داده شده است. نمونه‌های موجود در هر دسته، در مقیاس‌ها، جهات نور متفاوت و موقعیت‌های مختلف تصویر برداری شده‌اند. به منظور مقایسه عادلانه روش پیشنهادی با سایر روش‌های موجود، همانند آزمایشات انجام شده در تحقیقات قبلی بر روی این پایگاه داده، از هر دسته سه نمونه تصادفی انتخاب می‌کنیم و از ۳۳ تصویر به دست آمده برای آموزش (ساخت) دسته بند نزدیک‌ترین همسایه و از سایر تصاویر به عنوان تصاویر آزمون استفاده می‌کنیم. همچنین، از نسبت تعداد تصاویری که به صورت صحیح دسته بندی می‌شوند به تعداد کل تصاویر آزمون به عنوان معیار دقت دسته بندی استفاده می‌نماییم. این رویه را ۴ بار تکرار می‌کنیم و دقت میانگین حاصله بر روی این ۴ بار تکرار را به عنوان دقت نهایی دسته بندی در نظر می‌گیریم.

- پایگاه داده [۳۲USPTex]: این پایگاه داده حاوی ۲۲۹۲ تصویر بافت رنگی در ۱۹۱ دسته مختلف است که در آن، هر دسته حاوی ۱۲ تصویر است. هر تصویر از ابعاد 128×128 می‌باشد. چند نمونه از تصاویر این پایگاه، در سطر دوم شکل ۴ نمایش داده شده است. همانند آزمایشات انجام شده در تحقیقات قبلی، دو سوم از کل تصاویر این پایگاه داده به صورت تصادفی به عنوان تصاویر آموزشی در نظر گرفته می‌شوند و از سایر تصاویر به عنوان تصاویر آزمون استفاده می‌شود. در نهایت، دقت میانگین حاصله بر روی تصاویر آزمون در ۱۰ تکرار تصادفی به عنوان دقت نهایی دسته بندی روش مورد نظر استفاده می‌شود.

- پایگاه داده [۳۳Outex TC00013]: این پایگاه داده حاوی ۱۳۶۰ تصویر بافت رنگی در ۶۸ دسته هر یک حاوی ۲۰ تصویر می‌باشد. هر تصویر از ابعاد 128×128 می‌باشد. نمونه‌هایی از تصاویر این پایگاه داده در سطر سوم شکل ۴ نمایش داده شده است. به منظور محاسبه دقت دسته بندی روش‌های مختلف بر روی این پایگاه داده، مطابق تحقیقات مشابه پیشین، از همان روش شرح داده شده برای پایگاه داده USPTex استفاده می‌نماییم.



شکل ۴: نمونه‌هایی از تصاویر موجود در پایگاه تصاویر بافتی KTH-TIPS2-a (سطر اول)، پایگاه USPTex (سطر دوم) و پایگاه Outex TC00013 (سطر سوم).

از تبدیلات پیشنهادی استفاده می‌کند از دقت به مراتب بیشتری در مقایسه با HQO_{rgb} و HQO_{gray} برخوردار است. همچنین، دقت HQO_{rgb} از HQO_{gray} بیشتر است که این امر نشان می‌دهد که اطلاعات رنگ نقش بسزایی را در دقت دسته بندی تصاویر بافتی رنگی بازی می‌کند. این نتایج به طور ضمنی، نشان می‌دهند که تبدیلات پیشنهادی یا عملگرهای چهارگانی ترکیبی پیشنهادی قادرند تا دقت دسته بندی تصاویر بافتی رنگی را به طور قابل ملاحظه ای افزایش دهند. در حقیقت، از آنجاییکه اطلاعات رنگ و بافت مکمل یکدیگر هستند، هرچه میزان اطلاعات رنگی استخراج شده بیشتر و بهتر باشد، دقت دسته بندی تصاویر بافتی رنگی نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، اگر تبدیلات چهارگانی جدیدی بتوانند اطلاعات رنگی بیشتر و بهتری را در مقایسه با سه تبدیل پیشنهادی استخراج نمایند، آنگاه با استفاده از آن‌ها قادر خواهیم بود تا دقت دسته بندی تصاویر بافتی رنگی را افزایش دهیم.

در جدول ۶، متوسط زمان اجرای روش پیشنهادی برای استخراج بردار ویژگی یک تصویر از پایگاه KTH-TIPS2-a با سایر روش‌های رقیب مقایسه شده است. این مقادیر متوسط بر اساس صد بار اجرای مستقل هر یک از روش‌ها بر روی یک سیستم با پردازنده Intel i5 CPU@2.50 GHz با 8 GB RAM در محیط Matlab 2017 بر روی یک تصویر نمونه از پایگاه مذکور به دست آمده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، سریع‌ترین روش، LBP و کندترین روش Shortest Graph می‌باشد و روش پیشنهادی مقام نهم را در بین ۱۱ روش مقایسه شده به خود اختصاص می‌دهد. البته لازم به ذکر است که بسته به پیچیدگی عملگرهای چهارگانی ترکیبی استفاده شده، زمان اجرای روش پیشنهادی ممکن است بیشتر از زمان ذکر شده نیز باشد.

جدول ۱: دقت دسته بندی روش‌های مختلف بر روی پایگاه تصاویر بافتی KTH-TIPS2-a

روش	دقت دسته بندی
LBP [۶]	0.582
LTP [۴۳]	0.618
NrCLBP [۴۸]	0.624
SIFT [۳۴]	0.595
WLD [۳۵]	0.610
DRLBP [۳۶]	0.590
DRLTP [۳۶]	0.626
LCVBP [۳۷]	0.615
Shortest Graph [۸]	0.620
QLBP [۲۲]	0.617
QLRBP [۳۸]	0.645
QMCBP _q [۲۶]	0.680
HQO	0.705

پیشنهادی دقت بهتری را در مقایسه با سایر روش‌ها نتیجه می‌دهد. پس از روش پیشنهادی، روش‌های WLD و Shortest Graph به ترتیب در جایگاه دوم تا سوم قرار می‌گیرند. دلیل اختلاف فاحش در نتایج به دست آمده برای سه پایگاه داده استفاده شده، پیچیدگی متفاوت تصاویر موجود در این سه پایگاه می‌باشد. لطفاً توجه فرمایید که این اختلاف در دقت نه تنها برای روش پیشنهادی بلکه برای سایر روش‌های پیشین نیز مشهود است. به طور کلی، در این زمینه تخصصی، در حال حاضر پایگاه داده KTH-TIPS2-a پیچیده‌ترین و چالش برانگیزترین پایگاه داده موجود است. بر اساس نتایج گزارش شده فوق، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی برای توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی رنگی، از دقت مطلوبی برخوردار است.

در بخش ۳-۲-۱، اشاره نمودیم که در روش پیشنهادی، مقدار W برابر با ۸ در نظر گرفته می‌شود. برای بررسی اثر مقدار این پارامتر بر دقت روش پیشنهادی، دقت دسته بندی روش پیشنهادی را بر اساس مقادیر مختلف W بر روی پایگاه KTH-TIPS2-a اندازه گیری نمودیم. نتایج به دست آمده در جدول ۴ نشان داده شده است. همانطور که از این نتایج مشاهده می‌شود، به ازای $W = 8$ ، بیشترین دقت حاصل می‌شود. بر روی دو پایگاه دیگر نیز رفتار مشابه ای مشاهده گردید.

برای نشان دادن اثر و اهمیت استفاده از اطلاعات رنگ، در مقاله بازنگری شده، روش پیشنهادی (HQO) را در دو حالت زیر بررسی نموده و دقت آن را بر روی سه پایگاه داده محاسبه نمودیم:

- حالت اول: در این حالت، از تبدیلات چهارگانی ترکیبی پیشنهادی استفاده نکردیم و بردار ویژگی برای هر پیکسل را از الحاق مقدار مولفه های رنگی (RGB) آن پیکسل تولید کردیم. روش پیشنهادی به دست آمده در این حالت را به اختصار HQO_{rgb} نامیدیم.
- حالت دوم: در این حالت، مجدداً از تبدیلات چهارگانی ترکیبی پیشنهادی استفاده نکردیم و بردار ویژگی هر پیکسل را برابر مقدار سطح خاکستری آن پیکسل در نظر گرفتیم. روش پیشنهادی به دست آمده در این حالت را به اختصار HQO_{gray} نامیدیم. واضح است که در این حالت، روش پیشنهادی از صرفاً از اطلاعات روشنایی و نه رنگی استفاده می‌کند.

در جدول ۵، دقت روش پیشنهادی اصلی یعنی HQO با HQO_{gray} و HQO_{rgb} بر روی سه پایگاه داده مقایسه شده است. دقت کنید که در روش پیشنهادی اصلی از تبدیلات چهارگانی ترکیبی استفاده می‌شود و لذا تعداد کانال‌های ویژگی رنگی استفاده شده برابر ۱۲ است در حالیکه در HQO_{rgb} تعداد کانال‌های ویژگی رنگی برابر با ۳ و در HQO_{gray} تعداد کانال‌های ویژگی رنگی برابر با صفر است. همانطور که از نتایج مندرج در این جدول مشاهده می‌شود، روش پیشنهادی اصلی HQO که

جدول ۶: متوسط زمان استخراج ویژگی روش های مختلف بر روی پایگاه تصاویر بافتی KTH-TIPS2-a بر حسب میلی ثانیه

زمان اجرا	روش
6.1	LBP [۶]
8.4	LTP [۴۳]
14.3	NrCLBP [۴۸]
432	SIFT [۳۴]
128	WLD [۳۵]
23	LCVBP [۳۷]
1287	Shortest Graph [۸]
265	QLBP [۲۲]
279	QLRBP [۳۸]
288	QMCPB _q [۲۶]
323	HQO

۵ نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا عملگرهای جدیدی برای پیش پردازش تصاویر رنگی در حوزه نمایش چهارگانه تصاویر پیشنهاد کردیم که از ترکیب متوالی و دلخواه عملگرهای چهارگانه ساده و سنتی همچون عملگرهای چرخش و انتقال کلیفورد تشکیل می شوند. این عملگرها قادرند تا اطلاعات عمیق تر و پیچیده تری از تصاویر رنگی استخراج نمایند. سپس، با استفاده از این عملگرها و مفهوم کُدگذاری تُنک تصاویر، روشی جهت توصیف و دسته بندی تصاویر بافتی رنگی پیشنهاد نمودیم. آزمایشات تجربی نشان دادند که روش پیشنهادی از دقت دسته بندی بالاتری در مقایسه با برخی از روش های مشهور و کارآمد اخیر در این زمینه برخوردار است. به عنوان یک زمینه تحقیقاتی آتی، می توان از عملگرهای چهارگانه ترکیبی پیشنهادی در زمینه های مختلف دیگر همچون قطعه بندی تصاویر، ارزیابی کیفیت تصاویر، تشخیص اشیاء و غیره استفاده نمود. لازم به ذکر است که روش پیشنهادی را می توان بدون تغییر در ساختار بر روی تصاویر بافتی سطح خاکستری نیز اعمال کرد. چرا که برای توصیف یک پیکسل سطح خاکستری توسط یک چهارگان، صرفاً می توان مقدار روشنایی پیکسل را برابر با یکی از مولفه های چهارگان قرار داد و سایر مولفه ها را برابر صفر در نظر گرفت. اما، بدیهی است، از آنجاییکه اساساً عملگرهای چهارگانه ترکیبی پیشنهادی برای استخراج اطلاعات غنی تر از تصاویر رنگی طراحی شده اند، اعمال آن ها بر روی تصاویر بافتی سطح خاکستری عملاً اثری در بهبود دقت دسته بندی روش پیشنهادی نخواهد داشت. در نهایت، لازم به ذکر است که در این مقاله، به صورت "تجربی" نشان دادیم که سه عملگر چهارگانه ترکیبی پیشنهادی قادر هستند تا اطلاعات رنگی مفیدی را برای توصیف تصاویر بافتی رنگی استخراج نمایند. اما این موضوع به این معنا نیست که این عملگرها بهترین عملگرهای موجود برای این منظور

جدول ۲: دقت دسته بندی روش های مختلف بر روی پایگاه تصاویر بافتی USPTex

دقت دسته بندی	روش
0.878	LBP [۶]
0.846	LTP [۴۳]
0.853	NrCLBP [۴۸]
0.901	SIFT [۳۴]
0.923	WLD [۳۵]
0.924	LCVBP [۳۷]
0.667	Shortest Graph [۸]
0.848	QLBP [۲۲]
0.867	QLRBP [۳۸]
0.910	QMCPB _q [۲۶]
0.936	HQO

جدول ۳: دقت دسته بندی روش های مختلف بر روی پایگاه تصاویر بافتی Outex TC00013

دقت دسته بندی	روش
0.846	LBP [۶]
0.862	LTP [۴۳]
0.873	NrCLBP [۴۸]
0.786	SIFT [۳۴]
0.890	WLD [۳۵]
0.796	LCVBP [۳۷]
0.880	Shortest Graph [۸]
0.781	QLBP [۲۲]
0.791	QLRBP [۳۸]
0.811	QMCPB _q [۲۶]
0.901	HQO

جدول ۴: دقت دسته بندی روش پیشنهادی به ازای مقادیر مختلف W بر روی پایگاه تصاویر بافتی KTH-TIPS2-a

W	5	6	7	8	9	10
دقت	0.684	0.691	0.698	0.705	0.695	0.693

جدول ۵: دقت دسته بندی روش پیشنهادی در سه حالت مختلف بر روی سه پایگاه تصاویر بافتی مختلف

پایگاه داده	HQO	HQO _{rgb}	HQO _{gray}
KTH-TIPS2-a	0.705	0.672	0.656
USPTex	0.936	0.905	0.865
Outex TC00013	0.901	0.882	0.847

- [13] C. E. Moxey, S. J. Sangwine, and T. A. Ell, "Hypercomplex correlation techniques for vector images," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 51, no. 7, pp. 1941–1953, 2003.
- [14] W. R. Hamilton and W. E. Hamilton, *Elements of quaternions*. London: Longmans, Green, & Company, 1866.
- [15] L. Jin, H. Liu, X. Xu, and E. Song, "Color impulsive noise removal based on quaternion representation and directional vector order-statistics," *Signal Processing*, vol. 91, pp. 1249–1261, 2011.
- [16] L. Jin, Z. Zhu, X. Xu, and X. Li, "Two-stage quaternion switching vector filter for color impulse noise removal," *Signal Processing*, vol. 128, pp. 171–185, 2016.
- [17] O. S. Subakan and B. C. Vemuri, "A quaternion framework for color image smoothing and segmentation," *International Journal of Computer Vision*, vol. 91, no. 3, pp. 233–250, 2011.
- [18] S. C. Pei and C. M. Cheng, "Color image processing by using binary quaternion-moment-preserving thresholding technique," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 8, no. 5, pp. 614–628, 1999.
- [19] P. Denis, P. Carre, and C. Fernandez-Maloigne, "Spatial and spectral quaternionic approaches for colour images," *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 107, no. 1, pp. 74–87, 2007.
- [20] B. Chen, H. Shu, H. Zhang, G. Chen, C. Toumoulin, J.-L. Dillenseger, and L. M. Luo, "Quaternion Zernike moments and their invariants for color image analysis and object recognition," *Signal Processing*, vol. 92, no. 2, pp. 308–318, 2012.
- [21] B. Chen, H. Shu, G. Coatrieux, G. Chen, X. Sun, and J. L. Coatrieux, "Color image analysis by quaternion-type moments," *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, vol. 51, no. 1, pp. 124–144, 2015.
- [22] R. Lan, Y. Zhou, Y. Y. Tang, and C. L. P. Chen, "Person reidentification using quaternionic local binary pattern," in *IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2014, pp. 1–6.
- [23] R. Lan, Y. Zhou, and Y. Y. Tang, "Quaternionic weber local descriptor of color images," *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, vol. 27, no. 2, pp. 261–274, 2017.
- [24] C. Cai and S. K. Mitra, "A normalized color difference edge detector based on quaternion representation," In: *IEEE Signal Processing Society Conference on Image Processing*, pp. 816–819, 2000.
- [25] X. Geng, X. Hu, and J. Xiao, "Quaternion switching filter for impulse noise reduction in color image," *Signal Processing*, vol. 92, pp. 150–162, 2012.
- [26] R. Lan and Y. Zhou, "Quaternion-michelson descriptor for color image classification," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 25, no. 11, pp. 5281–5292, 2016.
- هستند. همچنین، این موضوع به این معنا نیز نیست که هر عملگر ترکیبی جدیدی می‌تواند مفید باشد. در حقیقت، به عنوان یک کار آتی، قصد داریم تا روشی خودکار جهت به دست آوردن عملگرهای چهارگانه ترکیبی بهینه برای دسته بندی تصاویر بافتی رنگی طراحی نماییم.

مراجع

- [1] M. Mirmehdi, X. Xie, and J. Suri, "Handbook of texture analysis," Imperial College Press, 2008.
- [2] R. M. Haralik, K. Shanmugam, and I. Dinstein, "Texture features for image classification," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 3, no. 6, pp. 610–621, 1973.
- [3] A. C. Bovik, M. Clark, and W. S. Geisler, "Multichannel texture analysis using localized spatial filters," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 12, no. 1, pp. 55–73, Jan. 1990.
- [4] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, Jul. 1989.
- [5] M. Varma, and A. Zisserman, "A statistical approach to texture classification from single images," *International Journal of Computer Vision*, vol. 62, no. 1–2, pp. 61–81, 2005.
- [6] T. Ojala, M. Pietikainen, and T. Maenpaa, "Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 7, pp. 971–987, 2002.
- [7] J. Ryu and S. Hong and H. S. Yang, "Sorted Consecutive Local Binary Pattern for Texture Classification," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 24, no. 7, pp. 2254–2265, 2015.
- [8] J. J. de Mesquita Sa Junior, P. C. Cortez, and A. R. Backes, "Color texture classification using shortest paths in graphs," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 23, no. 9, pp. 3751–3761, 2014.
- [9] M. Pietikainen, T. Maenpaa, and J. Viertola, "Color texture classification with color histograms and local binary patterns," *IWTAS*, pp. 109–112, 2002.
- [10] A. R. Backes, D. Casanova, and O. M. Bruno, "Color texture analysis based on fractal descriptors," *Pattern Recognition*, vol. 45, no. 5, pp. 1984–1992, 2012.
- [11] S. J. Sangwine, "Fourier transforms of colour images using quaternion or hypercomplex numbers," *Electronics Letters*, vol. 32, no. 21, pp. 1979–1980, 1996.
- [12] T. Ell and S. Sangwine, "Hypercomplex Fourier transforms of color images," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 16, no. 1, pp. 22–35, 2007.

- [45] B. Zhou, A. Lapedriza, J. Xiao, A. Torralba, and A. Oliva, "Learning Deep Features for Scene Recognition using Places Database," in Proc. NIPS'14, pp. 487-495, Dec. 2014.
- [46] B. Zhou, A. Kholsa, A. Lapedriza, A. Oliva, and A. Torralba, "Learning Deep Features for Discriminative Localization," in CVPR'16, Jun. 2016.
- [47] A. B. Watson, Digital Images and Human Vision, A Bradford Book, Oct. 1993.
- [48] S. Fekri Ershad and F. Tajeripour, "Multi-Resolution and Noise-Resistant Surface Defect Detection Approach Using New Version of Local Binary Pattern," in Applied Artificial Intelligence, vol. 31:5-6, pp. 395-410, 2017.
- [49] D. J. Field and B. A. Olshausen, "Emergence of simple-cell receptive field properties by learning a sparse code for natural images," Nature, vol. 381, no. 6583, pp. 607-609, 1996.
- [50] B. A. Olshausen and D. J. Field, "Sparse coding with an overcomplete basis set: A strategy employed by V1?" Vision Research, vol. 27, no. 23, pp. 3311-3325, 1997.
- [51] J. Weeks, R. Lehoucq, and J. P. Uzan, "Detecting topology in a nearly flat spherical universe," Classical and Quantum Gravity, vol. 20, no. 8, pp. 1529, 2003.
- [52] A. Hyvriinen, "Fast and robust fixed-point algorithms for independent component analysis," IEEE Trans. Neural Netw., vol. 10, no. 3, pp. 626-634, May 1999.
- [53] <http://www.nada.kth.se/cvap/databases/kth-tips/>.
- [54] <http://fractal.ifsc.usp.br/dataset/USPtex.php>
- [55] http://www.outex.oulu.fi/index.php?page=outex_home.
- [56] D. G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints," International Journal of Computer Vision, vol. 60, no. 2, pp. 91-110, 2004.
- [57] J. Chen, S. Shan, C. He, G. Zhao, M. Pietikainen, X. Chen, and W. Gao, "WLD: A robust local image descriptor," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 32, no. 9, pp. 1705-1720, 2010.
- [58] A. Satpathy, X. Jiang, and H. Eng, "LBP based edge-texture features for object recognition," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 23, no. 5, pp. 1953-1963, 2014.
- [59] S. H. Lee, J. Y. Choi, Y. M. Ro, and K. N. Plataniotis, "Local color vector binary patterns from multichannel face images for face recognition," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 21, no. 4, pp. 2347-2353, 2012.
- [60] R. Lan, Y. Zhou, and Y. Y. Tang, "Quaternionic local ranking binary pattern: A local descriptor of color images," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 25, no. 2, pp. 566-579, 2016.
- [61] <http://r0k.us/graphics/kodak/>
- [62] J. Yang, X. Feng, E. D. Angelini, and A. F. Laine, "Texton and Sparse Representation Based Texture Classification of Lung Parenchyma in CT Images," in Proc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc., pp. 1276-1279, Aug. 2016.
- [63] M. J. Gangeh, A. Ghodsi, M. S. Kamel, "Dictionary Learning in Texture Classification," Image Anal. Recong., pp. 335-343, 2011.
- [64] E. Plenge, S. S. Klein, W. J. Niessen, and E. Meijering, "Multiple Sparse Representations Classification," PLOS ONE, vol. 10, no. 8, Jul. 2015.
- [65] X. Tan and B. Triggs, "Enhanced local texture feature sets for face recognition under difficult lighting conditions," IEEE Trans. Image Process., vol. 19, no. 6, pp. 1635-1650, Jun. 2010.
- [66] T. Lindeberg, "Normative theory of visual receptive fields," arXiv, Feb. 2017.

هادی هادی‌زاده مدرک کارشناسی و کارشناسی ارشد برق در گرایش الکترونیک خود را به ترتیب از دانشگاه صنعتی شاهرود در سال ۱۳۸۴ و دانشگاه علم و صنعت ایران در سال ۱۳۸۷ اخذ کرده است. وی مدرک دکتری خود را در رشته برق گرایش مخابرات از دانشگاه Simon Fraser کانادا در سال ۱۳۹۲ دریافت



کرده و از همان سال به عنوان استادیار در دانشگاه صنعتی قوچان فعالیت می‌نماید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان پردازش و فشرده‌سازی تصاویر و ویدیوهای دیجیتال، شبکه‌های مخابراتی، بینایی و آموزش ماشین، بازشناسی الگو و مدل‌سازی سیستم بینایی مغز انسان می‌باشد. دکتر هادی زاده از سال ۲۰۰۹ تاکنون، موفق به کسب ۲۲ عنوان و افتخار علمی مختلف از دانشگاه‌های داخلی و بین‌المللی شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به کسب عنوان بهترین مقاله در کنفرانس بین‌المللی-IEEE ICME2012 در ملبورن استرالیا، اخذ گرنت Microsoft Research و Canon Information Systems Research Australia (CiSRA) و نیز اخذ عنوان بهترین مقاله کنفرانس بین‌المللی مهندسی برق در دانشگاه تهران اشاره نمود. در سال ۲۰۱۳ نیز به عنوان دبیر اجرایی IEEE Signal Processing Society در حوزه ونکوور کانادا فعالیت نموده‌اند. ایشان تجربه کاری در شرکت‌های بین‌المللی همچون Dolby Laboratories و Icron Technologies را دارد.