دانشگاه زنجان

دانشکده مهندسی

گروه برق

پایان‌نامه کارشناسی

گرایش : الکترونیک

عنوان :

پیاده‌سازی بلوک‌های تقریبی و استفاده از آنها در پردازش تصویر

استاد راهنما : آقای دکتر علی آذرپیوند

نگارش : امیرحسین معلّمی

پاییز ۹۵

فهرست مطالب

چکیده ت

مقدمه ۱

فصل اول : محاسبات تقریبی ۴

۱,۱ مقدمه ۴

۱,۲ محاسبه‌ی سبک ۵

۱,۳ محاسبات تقریبی ۶

۱,۳,۱. مدارهای تقریبی : ۷

۱,۳,۲. ذخیره‌ی تقریبی : ۷

۱,۳,۳. تقریب در سطح نرم‌افزار: ۷

۱,۴ جمع‌کننده‌های غیردقیق ۹

۱,۴,۱. جمع‌کننده‌های مبتنی بر سگمنت ۱۰

۱,۴,۲. جمع‌کننده‌های تقریبی ۱۲

۱,۴,۳. جمع‌کننده‌های با قابلیت تنظیم دقت ۱۲

۱,۵ .چند جمع‌کننده‌ی تقریبی ۱۲

۱,۵,۱. جمع‌کننده‌ی ETA ۱۳

۱,۵,۲. جمع‌کننده‌های تقریبی Trunk ۱۳

۱,۵,۳. جمع‌کننده‌های غیردقیق با استفاده از ماژول‌های منطقی ۱۵

۱,۶. ضرب‌کننده‌ی تقریبی ۱۶

۱,۶,۱. ضرب‌کننده دقیق در مبنای دلخواه ۱۷

۱,۶,۲. ریکدر ۱۷

۱,۶,۳. ضرب‌کننده‌ی TEPPE ۱۸

۱,۶,۴. ضرب‌کننده‌یLLL ۱۹

۱,۷ مصرف توان ۲۱

۱,۸. معیارهایی برای اندازه‌گیری خطا در محاسبات تقریبی ۲۲

۱,۸,۱. فاصله‌ی اشتباه ۲۳

۱,۸,۲. نرخ اشتباه ۲۳

فصل دوم : آرایه گیت‌های برنامه‌پذیر میدانی ۲۴

۲,۱ مقدمه ۲۴

۲,۲ تاریخچه ۲۶

۲,۳ مقایسه FPGA و میکروکنترلر ۲۷

۲,۴ کاربردهای FPGA ۲۷

۲,۴,۱ کاربرد FPGA در صنعت ۲۸

۲,۴,۲ کاربردهای نظامی FPGA ۲۸

۲,۴,۳ کاربرد های پزشکی FPGA ۲۸

۲,۴,۴ کاربرد FPGA در ناوبری و حمل و نقل ۲۸

۲,۵ برد DE2-115 ۲۹

۲,۵,۱ مدارهای کلاک ۳۱

۲,۵,۲ دکمه‌های فشاری ۳۲

۲,۵,۳ SDRAM ۳۳

۲,۵,۴ SDCARD ۳۳

۲,۵,۵ نحوه پروگرام‌کردن اطلاعات ۳۵

۲,۵,۶ پروسسور نایوس ۲ ۳۶

فصل سوم : نحوه‌ی انجام پروژه ۳۸

۳,۱ مقدمه ۳۸

۳,۲ بلوک‌های تقریبی ۳۸

۳,۲,۱ جمع‌کننده‌ی تقریبی ۳۸

۳,۲,۲ ضرب‌کننده ی تقریبی ۴۰

۳,۳ پردازش تصویر ۴۱

۳,۳,۱ تشخیص لبه در عکس ۴۱

مراجع ۴۶

چکیده

از دیرباز نحوه کارکرد کامپیوترها مورد مطالعه و بررسی دانشمندان بوده است. امروزه آنقدر کامپیوترهای بزرگ و کوچک با زندگی روزمره ما عجین شده‌اند که دوری جستن از آنها برایمان سخت‌تر شده است. استفاده غیر قابل انکار انسان از کامپیوترها دارای معایب و مزیت‌هایی است که دانشمندان در تلاش‌اند تا معایب آن را به صفر برسانند و مزایای آن را گسترش دهند. یکی از روش‌های بهبود کامپیوترها استفاده از معماری تقریبی در پردازنده‌های آنها است. حال اینکه معماری تقریبی چه اساسی دارد و چگونه طراحی می شود، هدف اصلی این پژوهش بوده است. به طور مشخص‌تر این پژوهش بر معماری جمع‌کننده و ضرب‌کننده تقریبی تمرکز دارد. ابتدا چندین جمع‌کننده و ضرب‌کننده‌ی تقریبی مورد بررسی قرار خواهد گرفت، و در ادامه نیز چگونگی بهره‌مندی از این بلوک‌ها در یکی از کاربردهای پردازش تصویر مورد مطالعه قرار گرفته شده است. در پایان هم با ایجاد بالانس بین کیفیت مدار و کمیت آن توانستیم با هزینه‌ی کمتر به خروجی دلخواه دست پیدا کنیم.

مقدمه

در اطراف ما انسان‌هایی با افکار، عقاید و فرهنگ‌های متفاوتی زندگی می‌کنند و هرکدام از آنها نگرش خاصی نسبت به زندگی دارند. همه‌ی انسان‌ها درارتباط با مسائل مختلف گاهی با یکدیگر اتفاق‌نظر دارند و در مواردی نیز با یکدیگر اختلاف نظر دارند. اما چرا اغلب در رابطه با اختلاف‌نظرها با هم به مناظره می‌نشـــینند؟! اکثر این تفاهمات از افکار مشترک آنها سرچشمه می‌گیرد. به نظر میرسد، تنها چیزی که می‌تواند افکار ما را هدایت کند کتاب‌ها و یا شاید طرز تفکر و اندیشه و دیدگاه‌های نویسندگان باشند.

اما یکی از اولین نکاتی که می‌تواند نظر آدمی را به یک نو شته جلب کند، طرح و نقش یا زیبایی روی جلد یک کتاب و یا حتی معروفیت نوی سنده آن نی ست بلکه محتوی نو شته ا ست. یقینا آنچه که به عنوان سرآغاز نو شته به چ شم خواننده می‌آید مقدمه آن اســت و این مقدمه اســت که می‌تواند خواننده را ترغیب به خواندن کتاب کند. من نیز در این پژوهش سعی کرده‌ام به این نکته توجه نمایم و در مقدمه‌ی خود نکاتی را ذکر کنم که توجه خواننده را به ا صل موضوع جلب کنم .

تاریخ همواره کمک حال ما انســان‌ها بوده و حکایت‌های بســیار در آن نهفته اســت که بعضــا یا فاش نشــده‌اند و یا مسکوت مانده‌اند و به آنها کمتر توجه شده است و در مواردی هم این حکایت‌ها بزرگ نمایی شده‌اند و یا به آنها پر و بال داده شــده به طوری که به افســانه تبدیل شــده‌اند. اگر کمی با هم برگ‌های تاریخ را ورق بزنیم، درمیابیم که از ابتدای قرن ۲۰ میلادی آلمانی‌ها برای ارتباطات سرّی نظامی و دیپلماتیک و سیا سی خود از ما شین‌های معروف به ماشــین‌های انیگما[1] اســتفاده می‌کردند و نحوه‌ی رمزگزاری این ماشــین‌ها به‌گونه‌ای بوده اســت که معروف‌ترین رمزگشــایان و زبان‌شــناســان غرب هم نمی‌توانســتند آن را رمزگشــایی کنند تا اینکه این معضــل قبل از پایان جنگ جهانی دوم بیش از پیش نمایان شد و دولت‌های غربی را واداشت تا برای رمزگشایی این ماشین‌ها چاره‌ای بیندیشند و مســیر جنگ را به نفع خود و مردمانشــان تغییر دهند. این نقطه‌ی عطفی در تاریخ بود که ریاضــی‌دان برجســته‌ی انگلیســی به نام آلن تیورینگ[2] توانســت با ســاخت ماشــینی جلوی غول انیگما را بگیرد و به اصــطلاح آن را کرک[3] یا رمزگشایی کند و مسیر جنگ را تغییر دهد و تعداد کشته‌شدگان را در جنگ به طور قابل توجهی کاهش دهد.

---

[1] Enigma machines
[2] Alan Mathison Turing
[3] Crack

حال این تحولات مهم علمی در تاریخ معاصر جهان چه ارتباطی با موضوع نوشته‌ی بنده دارد و اینکه کجای پردازش تصویر و یا محاسبات تقریبی به آقای تیورینگ مرتبط است؟!

ما می‌دانیم با استفاده از معماری ماشینی، که این ریاضی‌دان بزرگ قرن ۲۰ موفق به ساخت آن شد، بعدها ماشین‌های دیگری ساختند که به ماشین‌های تیورینگ معروف شدند و الهام بخش کامپیوترهای امروزی شدند.

در واقع کسی که اولین بار منطق باینری و دیجیتال را در عمل بکار برد همین دانشمند انگلیسی بود.

پس از گذشت تقریبا نیم قرن، در حال حاضر به نقطه‌ای رسیده‌ایم که در ابتدای قرن ۲۱ صحبت از الکترونیکی شدن همه ی و سایلی ا ست که امروزه در زندگی روزمره به کار می‌بریم، به طوری که کامپیوترها و ما شین‌ها با زندگی اکثر عامه مردم عجین شده است و اکثر دانشمندان از مصرف بیش از اندازه برق نگران‌اند، حال برای صرفه جویی در مصرف بیش از حد برق و انرژی چه باید کرد؟ در دنیایی که نمی‌توان به عدم استفاده از لوازم الکترونیکی رای داد چه چاره‌ای می‌توان اندیشد ؟

با کمی دقت درکاربردهای کامپیوترهای کنونی درمیابیم که در مواردی نیاز نیست که ما دقت، انرژی و توان بالایی برای رسیدن به مقصود مورد نظر اختصاص دهیم بلکه با هزینه‌های کمتر هم می‌توانیم همان نتیجه را بگیریم. بگذارید با یک مثال ساده مقصود خود را بیان کنم، در نظر داشته باشید که ما برای مثال فقط می‌خواهیم بدانیم که حا صل ضرب دو عدد زوج ا ست یا فرد ! برای این مثال م شخص شما ترجیح می‌دهید که کل ضرب را برای دو عدد انجام دهید ؛یا فقط یکان را که بد ست آوردید و از آن مطمئن شدید دیگر عمل ضرب را ادامه ندهید؟ جواب بسیار ساده است، شما قطعا به حالت دوم رای می‌دهید و کاری به بقیه اعمال پیچیده و سخت ضرب ندارید. کاری که شما انجام دادید، در واقع یک محاسبه تقریبی ساده از یک ضرب پیچیده شاید خیلی مشکل به نظر برسد . پس ملاحظه می‌کنیم که می‌توان با هزینه‌ی کم به پاسخ مورد نظر رسید و انرژی و زمان را هم ذخیره کرد.

امروزه معماری کامپیوترها به‌گونه‌ای طراحی شده است که همه‌ی اعمال و محاسبات را بصورت دقیق و با نتیجه کامل انجام می‌دهند و همه این اعمال هزینه‌ی بسیار دارند. حال در عصر کنونی برخی دانشمندان با تکیه بر این حقیقت که طبیعت برخی از کاربردهای کامپیوتری نیاز به پاسخ بسیار دقیق نیستند، معماری تقریبی را پیشنهاد داده‌اند تا با کمی تغییر هم کیفیت حفظ شود و هم انرژی، زمان و هزینه‌ی کمتری مصرف شود.

در فصل اول این گفتار کمی پیرامون فلسفه و معماری محاسبات تقریبی سخن به میان آورده شده است که امیدوارم برای خوانندگان مفید باشد و به طور مشخص‌تر به دو عملگر جمع و ضرب تقریبی پرداخته‌ام. طبق تحقیقات، نشان داده شده است که در بسیاری از محاسبات و کاربردها می‌توان از جمع‌کننده تقریبی به عنوان یک تخمین‌گر مناسب استفاده کرد.

اما محسبات تقریبی[1] به مثال ساده‌ای که ذکر شد خلاصه نمی شود، بلکه دارای کاربردهای بسیاری در زمینه‌هایی مانند پردازش تصویر[2]، شبکه‌های عصبی[3] و ... است.

در فصل آخر روند کاری این پروژه برایتان شرح داده شده است که به توضیح یک مجموعه جمع‌کننده و ضرب‌کننده خاص پرداخته می‌شود تا با کمک آنها بتوان پردازش تصویر با معماری دقیق و بدون خطا اتفاق افتاده را با معماری تقریبی مقایسه کرد و مقایسه‌ی کیفیت هم به خواننده واگذار می‌شود که خود دریابد چه تغییری در مجموعه پردازش تصویر حاصل شده است. برای نشان دادن این دو مقایسه از یک FPGA استفاده شده است تا بتوان توان مصرفی و تاخیر در دو مورد را با هم مقایسه کرد که هدف اصلی ما در این پروژه بوده است.

راستی سخن از FPGA شد، این دستگاه همانطور که از اسم آن پیداست، یک سری ماژول‌های آماده‌ای را در اختیار ما قرار می‌دهد تا خودمان معماری دلخواه‌مان را با آنها انجام دهیم و به همین خاطر است که کاربردهایی در نوع خود دارد. معرفی این دستگاه و کاربردهای آن هم در فصل دوم این نوشتار ذکر شده است که در آنجا به تفصیل، به مطالعه‌ی درون این دستگاه پرداخته می‌شود.

در پایان مقدمه به خواننده محترم پیشنهاد می‌کنم اگر علاقمند به دنیای دیجیتال و زیبایی‌های آن هستند این پروژه را مورد مطالعه قرار دهند و در جهت تکمیل این پروژه اقدام نمایند .

با تقدیر و تشکر فراوان از استاد محترم آقای دکتر علی آذرپیوند و دو تن از دانشجویان کارشناسی ارشد دانشگاه زنجان، آقای مهندس احمد محمدی و خانم مهندس درجانی که مرا در این راه راهنمایی نموده‌اند.

امیرحسین معلمی

دی ماه ۱۳۹۵

[1] Approximate Computing
[2] Image Processing
[3] Neural Network

فصل اول : محاسبات تقریبی

۱,۱ مقدمه

بسیاری از مسائل جذاب مهندسی و علمی با استفاده از مدل‌ها و الگوریتم‌های دقیق، واضح و قطعی حل می شوند. این روش‌ها و تکنیک‌های بسیار دقیق که به عنوان محاسبات سنگین[1] شناخته می‌شوند، به طور معمول برای حل آن دسته از مسائل که دارای خواص مشابهی از قبیل دقت بالا، قابل پیش‌بینی بودن و آنالیزهای دقیق هستند، مورد استفاده قرار می‌گیرند.

از این روش‌ها که برای حل بسیاری از مسائل موجود در مهندسی استفاده می‌شود با دو نوع از مشاهدات دانشمندان در تضاد است:

۱- اکثر مسائل و کاربردهای موجود در دنیای واقعی، ذاتا غیردقیق و با درجه پایینی از دقت هستند.

۲- استفاده از دقت بسیار بالا زمانیکه دقت کمتری مورد نیاز است باعث تحمیل هزینه‌های پیاده‌سازیِ بالایی می‌شود.

الگوی محاسبه‌ی سبک[2] از دو تضاد یا به عنوانی راهکار پیشنهادی فوق به عنوان پایه‌ی اساسی خود استفاده می‌کند تا استراتژی محاسبه‌ی سنگین را بهبود دهد. برای واضح‌تر شدن مفهوم محاسبه‌ی سبک به توضیح زیر کفایت کنید تا در ادامه بیشتر به شرح آن پرداخته شود.

محاسبه‌ی سبک یک مجموعه‌ای از روش‌های رشد و در حال توسعه، با هدف استخراج تحمل سیستم مورد نظر برای غیردقیق بودن، عدم‌قطعیت داشتن و درستی جزئی است که برای رسیدن به یک خوش‌فکری، نیرومندی و هزینه‌ی کم تلاش می‌کند. امروزه روش‌ها و تئوری‌های محاسبه‌ی سبک در بین دانشمندان و کاربران بسیار محبوب هستند زیرا نقش اساسی در شبیه‌سازی هوش‌های مصنوعی ایفا می‌کنند.

- اما حال سوال مورد تامل در اینجا، این است که چرا گرایش به روش‌های محاسبه‌ی سبک به مانند محاسبات تقریبی اینقدر محبوبیت یافته است؟

فاصله‌ی بین توانایی‌های تکنولوژی سیماس[3] و احتیاجات برای کاربردهای آینده به طرز غیرقابل باوری در حال افزایش است. در این بین، روش‌های طراحی کاملا تضمین شده‌ای وجود دارند که این فاصله را بطور چشمگیری کاهش می‌دهد. محاسبات تقریبی یکی از این روش‌هاست که در سال‌های اخیر توجهات بسیاری را از سوی جامعه

[1] Hard Computing
[2] Soft Computing
[3] CMOS (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor)

مهند سان و دانشمندان به خود جلب کرده ا ست. در ا صل، محا سبات تقریبی در ابتدا قابلیت وجود خطای ذاتی در یک سیستم را بررسی و استخراج می‌کند و سپس با استفاده از آن بالانسی بین میزان محاسبات و کیفیت حاصله و تلاش صورت‌گرفته برای پیاده‌سازی آن انجام می‌دهد.

حال بگذارید با طرح چند سوال که ممکن است تا کنون در ذهن شما نیز نقش بسته باشد به ادامه‌ی بحث بپردازیم، که در واقع منشا مابقی این فصل است:

۱- محاسبه‌ی سبک که تا اینجا بارها از آن نام برده شده بصورت دقیق چیست؟

۲- عامل اصلی این محاسبه‌ی سبک یعنی محاسبه‌ی غیردقیق چه مفهومی دارد؟

۳- کاربردهای این نوع از محاسبات در چه زمینه‌هایی است؟

۱,۲ محاسبه‌ی سبک

همانطور که پیشتر هم گفته شد، اکثر روش‌های محاسبه‌ی سبک بر این اساس پایه‌ریزی می‌شوند که بیشتر مسائل و کاربردهای انسان‌ها در دنیای واقعی کمی غیردقیق بودن ذاتی در وجودشان نهفته شده است و یک درجه‌ای از تغییر را دربردارند. بنابراین، برای حل یک چنین مسائلی استفاده کردن از مدل‌ها، ماژول‌ها و الگوریتم‌های کاملا دقیق، واضح و بدون خطا توصیه نمی‌شود. از طرف دیگر، نمی‌توان این حقیقت غیرقابل انکار را نادیده گرفت که کاربردهای عملی این محاسبات سبک با استفاده از سخت‌افزارهای دیجیتالی که مبتنی بر منطق باینری با درجه بالایی از دقت و قابل پیش‌بینی بودن است. پس مشکل اصلی که خودش را در اینجا نمایان می‌کند این است که در بستری اینچنین دقیق با ماژول‌های پیاده سازی کاملا بدون خطا چگونه باید کاربردها و روش‌هایی که ذاتا قابلیت خطا در خود دارند و می‌توان با استفاده از محاسبات سبک انجام شوند را انجام داد؟!

این تضاد، یعنی جایی که در پیاده‌سازی محاسبات سبک از سخت‌افزار دیجیتال معمول و متعارف استفاده شود که بسیار دقیق هستند و با مصرف انرژی بالایی هم دارند، مزیت اصلی متدهای محاسبات سبک سرکوب شده است، پس در پیاده‌سازی محاسبات سبک هم باید از ماژول‌های متفاوتی استفاده شود.

پیاده‌سازی محاسبات سبک با استفاده از پیاده‌سازی آنالوگ، مزیت‌های خودش را دارد اما پیاده‌سازی دیجیتالی این متد بهتر است زیرا دارای یک سری ویژگی‌های خاص مربوط به خود است که اکثر دانشمندان از جایگزینی این نوع پیاده سازی نسبت به پیاده سازی آنالوگ رای داده‌اند. همانطور که میدانید، مدارات مجتمع دیجیتال یا آی سی‌ها که همان پیاده‌سازی سخت‌افزاری متد فوق است قابل تکیه و اعتماد، بدون جریان نفوذی و غالبا بدون نویز هستند و دارای رفتاری قابل پیش‌بینی و تکرارپذیرند. همچنین دارای فرآیند طراحی‌های دیجیتال ساده‌تر و رو به جلوتری

هستند و بسیاری از ابزارهای توسعه‌یافته‌ی سیستم‌های دیجیتال پیشرفته را می‌توان در مدارات و سیستم‌های سنگین‌تر که با میلیون‌ها ترانزیستور پیاده‌سازی شده‌اند استفاده نمود.

برای اینکه مفهوم کلی محاسبه سبک بهتر مورد مطالعه قرار گیرد، خلاصه‌ای از آنچه که تا اینجا گفته شده در چند سطر آینده آمده است.

همانطور که در مقدمه این فصل گفته شد اساس محاسبه‌ی سبک وجود یک خطای نهفته در اکثر کاربردهای طبیعی اطراف ماست، پس نیاز به دقت بالا و عملگرهای دقیق برای استفاده از آنها ملزم نیست. حال اینکه اکثر دانشمندان عصر جدید بهره‌مندی از این مزیت را راه‌حل مناسب و مفیدی برای کاهش اختلاف بین رشد تکنولوژی و پتانسیل موجود در سیستم‌ها یافته‌اند. اما تضاد و تناقضی که اینجا بسیار نمایان است این است که ابزار یک همچنین کاری برای دانشمندان فراهم نیست زیرا در دنیای باینری و دیجیتال در همه‌ی سطوح دقت و صراحتی مثال نزدنی وجود دارد. برای حل این مشکل می‌توان هم از ابزارهای آنالوگی و هم از ابزارهای دیجیتالی استفاده کرد که طبق تحقیقات به عمل آمده و ویژگی‌های بارز و برتری‌هایی که ابزارهای دیجیتال نسبت به هم‌نوعان آنالوگ خود دارند ترجیح داده شد که از آنها استفاده شود و با اعمال تغییراتی در ابزارهای دیجیتالی موجود، آنها را به نحوی تغییر دهیم تا بتوانیم از مزیت‌های محاسبه سبک بهره‌مند شویم.

اکنون که به یک آشنایی نسبی نسبت به محاسبات سبک رسیده‌ایم به سوال دوم مطرح شده می‌پردازیم که محاسبات تقریبی چیست و چه معماری را در خود جای داده است؟!

۱,۳ محاسبات تقریبی[1]

اگر بتوان تعریفی در یک یا چند جمله برای عبارت تقریبی ارائه داد، در واقع می‌توان، به هر نوع محاسبه‌ای که جواب دقیق تضمین شده‌ای را در خروجی آن شاهد نباشیم و امکان وجود خطا در هر خروجی آن باشد، اشاره کرد. یکی از اساسی‌ترین و بنیادی‌ترین الزامات محاسبه‌ی تقریبی، انجام تقریب و تخمین در داده‌های غیرحساس است، زیرا اگر تقریب در داده‌های حساس انجام شود ممکن است عواقب و نتایج فاجعه‌باری داشته باشد.

همانطور که یکی از دکترهای دانشگاه پرودو[2] هند گفته است، احتیاج برای محاسبه‌ی تقریبی بر دو پایه‌ی زیر بنا می‌شود:

۱- یک تغییر اساسی در ماهیت وظایف سنگین محاسباتی

۲- احتیاج برای بهبود راندمان منابع جدید و دردسترس

[1] Approximate Computing
[2] Prude University

دانشجویان محترم:

جهت دسترسی به متن کامل پایان نامه‌ها به کتابخانه دانشکده مهندسی و یا آزمایشگاه پروژه گروه برق مراجعه فرمایید.

مراجع

[1] H. R. Mahdiani, A. Ahmadi, S. M. Fakhraie, and C. Lucas, “Bio-Inspired Imprecise Computational Blocks for Efficient VLSI Implementation of Soft-Computing Applications”, IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUITS AND SYSTEMS—I: REGULAR PAPERS, VOL. 57, NO. 4, APRIL 2010

[2] *Sunil Dutt, Sukumar Nandi and Gaurav Trivedi*, A Comparative Survey of Approximate Adders”, *26th Conference Radioelektronika 2016*,

[3] M. D. Hill and C. Kozyrakis, “Outbrief of DARPA/ISAT Workshop: Advancing Computer Systems without Technology Progress, http://www.sigarch.org/2012/07/28/outbriefof-darpaisat -workshop-advancing computer-systems-withouttechnology-progress/,”.

[4] T. N. Jeppe, “Imprecise Arithmetic for Low Power Signal Processing. ’’, 2012

[5] Manual of DE2-115 Board

[6] A. K. Verma, P. Brisk, and P. Ienne, “Variable Latency Speculative Addition: A New Paradigm for Arithmetic Circuit Design,” in Design, Automation and Test in Europe Conference and Exhibition (DATE), Mar. 2008, pp. 1250–1255.

[7] A. B. Kahng and S. Kang, “Accuracy-configurable Adder for Approximate Arithmetic Designs,” in 49th Design Automation Conference (DAC), Jun. 2012, pp. 820–825.

[8] R. Ye, T. Wang, F. Yuan, R. Kumar, and Q. Xu, “On Reconfiguration-oriented Approximate Adder Design and its Application,” in IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD), Nov. 2013, pp. 48–54.

[9] B. Garg, S. Dutt, and G.K. Sharma, “Bit-width-aware Constant-delay Run-time Accuracy Programmable Adder for Error-resilient Applications,” Microelectronics Journal, vol. 50, pp. 1 – 7, April 2016.

[10] H. Esmaeilzadeh, E. Blem, R. St. Amant, K. Sankaralingam, and D. Burger, “Dark Silicon and the End of Multicore Scaling,” in 38th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), June 2011, pp. 365–376.

[11] L. A. Zadeh, “Soft computing and fuzzy logic,” IEEE Software, vol. 11, no. 6, pp. 48–56, Nov. 1994.

[12] M. Hamzeh, H. R. Mahdiani, A. Saghafi, S. M. Fakhraie, and C. Lucas, “Computationally efficient active rule detection method: Algorithm and architecture,” Elsevier Fuzzy Sets Syst., vol. 160, no. 4, pp. 554–568, Feb. 2009.

[13] F. Frustaci, M. Lanuzza, P. Zicari, S. Perri, and P. Corsonello, “Designing high-speed adders in power-constrained environments,” IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 56, no. 2, pp. 172–176, Feb.2009.

[14] J. F. Lin, Y. T. Hwang, M. H. Sheu, and C. C. Ho, “A novel highspeed and energy efficient 10-transistor full adder design,” IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers, vol. 54, no. 5, pp. 1050–1059, May 2007.

[15] S. G. Lee and J. D. Carpinelli, “VHDL implementation of very highspeed integer fuzzy controller,” in IEEE Int. Conf. Systems, Man Cybern.,Oct. 2005, vol. 1, pp. 588–593.

[16] A. Kandel and G. Langholz, Fuzzy Hardware: Architectures and Applications. New York: Springer, 1998.

[17] G. Giustolisi, G. Palmisano, and G. Palumbo, “An efficient fuzzy controller architecture in SC technique,” IEEE Trans. Circuits Syst. II, Anal. Digit. Signal Process., vol. 49, no. 3, pp. 208–218, Mar. 2002.

[18] A. Rodriguez-Vazquez, R. Navas, M. Delgado-Restituto, and F.Vidal-Verdu, “A modular programmable CMOS analog fuzzy controller chip,” IEEE Trans. Circuits Syst. II, Anal. Digit. Signal Process., vol. 46, no. 3, pp. 251–265, Mar. 1999.

[19] K. Basterretxea, J. M. Tarela, I. del Campo, and G. Bosque, “An experimental study on nonlinear function computation for neural/fuzzy hardware design,” IEEE Trans. Neural Netw., vol. 18, no. 1, pp. 266–283, Jan. 2007.

[20] Z. Xun, W. Peng, and J. Dongming, “VLSI architectures of domain adaptive fuzzy logic system,” in Proc. Int. Conf. ASIC, Oct. 2005, vol.1, pp. 257–260.

[21] P. Moerland and E. Fiesler, Handbook of Neural Computation: Neural Network Adaptations to Hardware Implementations. New York: Inst. Of Physics/Oxford Univ. Press, 1997.

[22] T. J. Koickal, A. Hamilton, S. L. Tan, J. A. Covington, J. W. Gardner, and T. C. Pearce, “Analog VLSI circuit implementation of an adaptive neuromorphic olfaction chip,” IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers,vol. 54, no. 1, pp. 60–73, Jan. 2007.

[23] S. M. Fakhraie and K. C. Smith, VLSI-Compatible Implementations for Artificial Neural Networks. Norwell, MA: Kluwer, 1997.

[24] H. R. Mahdiani, A. Banaiyan, and S. M. Fakhraie, “Hardware implementation and comparison of new defuzzification techniques in fuzzy processors,” in Proc. IEEE ISCAS, May 2006, pp. 4619–4622.

[25] B. Choi and K. Tipnis, “New components for building fuzzy logic circuits,”in Proc. Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowledge Discovery, Aug. 2007,vol. 2, pp. 586–590.

[26] Q. Cao, M. H. Lim, J. H. Li, Y. S. Ong, and W. L. Ng, “A contex switchable fuzzy inference chip,” IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 14, no.4, pp. 552–567, Aug. 2006