

معماری کامپیوتر (Computer Architecture)

فاطمه علی ملکی، امیررضا جهانگیری، محمدحسین چهکنندی، مهدی حقوردی و خدیجه نظری

چکیده. در این مقاله، به بررسی معماری کامپیوتر، روند توسعه آن، انواع معماری کامپیوتر و پیشرفت‌های آن می‌پردازیم.

۱. مقدمه

۲. معماری کامپیوتر - دیروز تا امروز

در دنیایی که ما امروزه می‌شناسیم رایانه‌ها برای اهداف زیاد و توسط افراد زیادی استفاده می‌شوند. آنها قادرند چیزهای جذابی را به نمایش بگذارند که ذهن ما را متحیر میکند. اتفاقی که زمانی غیر قابل تصور بود برای جامعه ما مرسوم است. تکنولوژی معماری کامپیوتر در طول سالیان متمادی تکامل یافته است. تغییرات در معماری کامپیوتری عمدتاً به دلیل پیشرفت‌های تکنولوژی ساخت قطعات الکترونیکی، نیازهای کاربران و پیشرفت علوم رخ داده است. در ادامه به خلاصه‌ای از تکامل معماری کامپیوتر از زمان ظهور اولین کامپیوترها تا به امروز می‌پردازیم.

(۱) نسل اول کامپیوترها

در سال ۱۹۳۷، اولین کامپیوتر با استفاده از لامپ‌های خلاء توسط پروفیسور ایکن اختراع شد. در سال ۱۹۴۷، دانشگاه پنسیلوانیا کامپیوتری به نام ENIAC را طراحی کرد که از مبنای دودویی برای نمایش اطلاعات استفاده می‌کرد.^۱ در این دوره، کامپیوترها از لامپ‌های خلاء و رله‌ها برای اجرای عملیات استفاده می‌کردند. معماری کامپیوترهای این دوره معمولاً به صورت برداری (Von Neumann) بود که شامل واحدهای حافظه، واحد پردازش، واحد کنترل و واحد ورودی/خروجی می‌شد.

(۲) نسل دوم کامپیوترها

در دهه ۱۹۵۰، ترانزیستورها به جای لامپ‌های خلاء در کامپیوترها استفاده شدند. این باعث کاهش حجم و افزایش سرعت کامپیوترها شد. در این دوره، کامپیوترهای دیجیتال شروع به ظهور کردند و از معماری فرمال برای طراحی استفاده می‌شد. این دوره شاهد ظهور کامپیوترهای دیجیتال و کامپیوترهای مینی‌کامپیوتر بود.

(۳) نسل سوم کامپیوترها

عبارات و کلمات کلیدی: معماری کامپیوتر، واحد پردازش، x86، arm، qbit
دبیرتخصصی رابط: استاد دکتر فریا نصیری مفخم
نوع مقاله: تکلیف کلاسی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۹/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸
^۱ مشهورترین نمونه از این دوره می‌باشد

در دهه ۱۹۶۰، مدارهای مجتمع^۲ جایگزین ترانزیستورها شدند. استفاده از مدارهای مجتمع باعث افزایش قابلیت پیچیدگی و کارایی کامپیوترها شد. به این معنی که تعداد بیشتری ترانزیستور و قطعه الکترونیکی را در یک تراشه کوچک‌تر قرار دادند. این امر به کامپیوترها امکان انجام عملیات پیچیده‌تر و سریع‌تر را می‌داد. به طور خلاصه، مدارهای مجتمع به کامپیوترها امکانات بیشتری را بخشیدند و آن‌ها را کارآمدتر می‌ساختند. در این دوره، معماری مینی‌کامپیوترها و سوپرکامپیوترها توسعه یافت. در این دوره، مدارهای مجتمع بزرگتر و پیچیده‌تری استفاده شدند. کامپیوترهای این دوره از معماری مجموعه دستورات^۳ استفاده می‌کردند. معماری کامپیوتر IBM/360 از معماری‌های مشهور این دوره است.

(۴) نسل چهارم کامپیوترها

در دهه ۱۹۷۰، ریزپردازنده‌ها^۴ به جای مدارهای مجتمع استفاده شدند. این باعث افزایش قابلیت انعطاف‌پذیری و کاهش هزینه ساخت کامپیوترها شد. در این دوره، معماری کامپیوترهای شخصی و کامپیوترهای قابل حمل توسعه یافت

(۵) نسل پنجم کامپیوترها

در دوره نسل پنجم کامپیوترها، که در دهه ۱۹۸۰ آغاز شد، تحولات مهمی در معماری کامپیوتر رخ داد. در این دوره، دو نوع کامپیوتر مهم به وجود آمدند: کامپیوترهای موازی و کامپیوترهای برداری. کامپیوترهای موازی قدرت پردازش را با استفاده از چندین واحد پردازشگر به صورت همزمان افزایش می‌دادند. این کامپیوترها قابلیت انجام همزمان و همروند بسیاری از عملیات‌ها را داشتند و برای برنامه‌هایی که نیاز به پردازش موازی داشتند، بسیار مناسب بودند. کامپیوترهای برداری قدرت پردازش را با استفاده از پردازشگرهای برداری بهبود می‌بخشیدند. این پردازشگرها برای عملیات‌های مربوط به بردارها و ماتریس‌ها بهینه شده بودند و برای برنامه‌های علمی و مهندسی که با داده‌های برداری سر و کار داشتند، مناسب بودند. در این دوره، استفاده از مدارهای مجتمع فوق بزرگ^۵ و مدارهای مجتمع فوق فوق بزرگ^۶ نیز رایج شد. این تکنولوژی‌ها به طراحی و ساخت مدارهای بسیار پیچیده و کوچکتر از نسل‌های قبلی کمک کردند و باعث افزایش کارایی و قدرت پردازش کامپیوترها شدند. در این دوره، شاهد ظهور کامپیوترهای جدیدی نیز بودیم که از جمله آن‌ها می‌توان به کامپیوترهای شخصی^۷ و سیستم‌های توزیع شده^۸ اشاره کرد. کامپیوترهای شخصی با عملکرد مناسب و هزینه کم، به کاربران خانگی و کسب و کارها وارد شدند و سیستم‌های توزیع شده با استفاده از شبکه‌های کامپیوتری، امکان ارتباط و همکاری بین کامپیوترها را فراهم می‌کردند.

۳. اجزا

• اجزای CPU

اگر بخواهیم CPU را در نگاه سطح بالا بررسی کنیم، CPU از ۲ قسمت تشکیل شده: (۱) Datapath (۲) Con-trol Unit

همانطور که در درس معماری کامپیوتر به آن اشاره شد، Datapath در واقع مسیریست که برای انجام یک دستورالعمل طی می‌شود و این مسیر شامل قسمت‌های مختلفی، از جمله Register File، ALU، برای انجام محاسبات، چندین مالتی‌پلکسر، واحدهای جمع، عملیات Extend و... می‌شود.

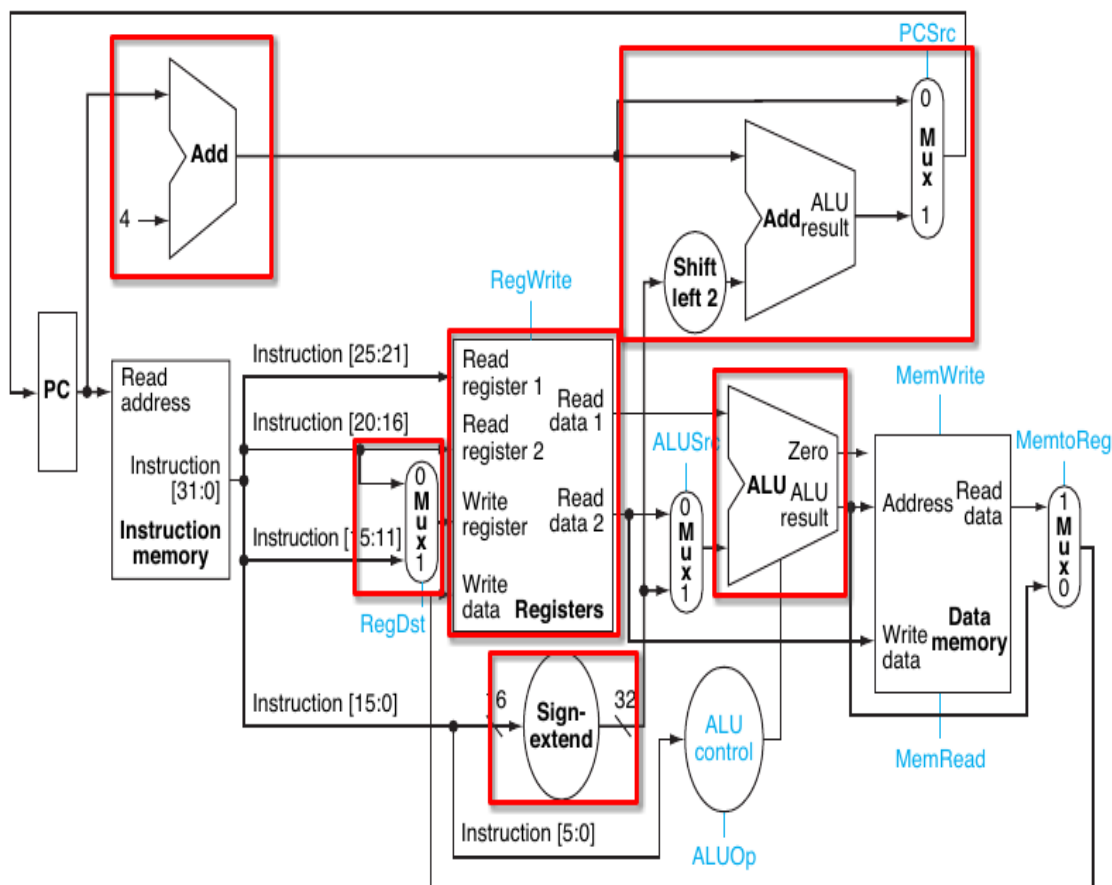
^۲IC ^۳Instruction Set Architecture ^۴Microcontroller ^۵VLSI ^۶ULSI ^۷Personal Computers ^۸Distributed Systems

قسمت Control Unit، یا همان واحد کنترل قسمتی است که Datapath را کنترل می‌کند و تعیین می‌کند که Datapath دستگاه‌های I/O و Memory چه کاری انجام بدهند.

از نگاه سطح بالاتر، CPU شامل ۴ جز اصلی است: Control Unit، Memory، Datapath و دستگاه‌های ورودی/خروجی.

Data path (۱)

در این تصویر ۱ قسمت‌هایی که در بخش Datapath طی می‌شوند با خطوط قرمز رنگ مشخص شده‌اند. همانطور که واضح است، Datapath شامل جمع‌کننده، مالتی پلکسر، رجیستر فایل، Extend و ALU می‌شود.

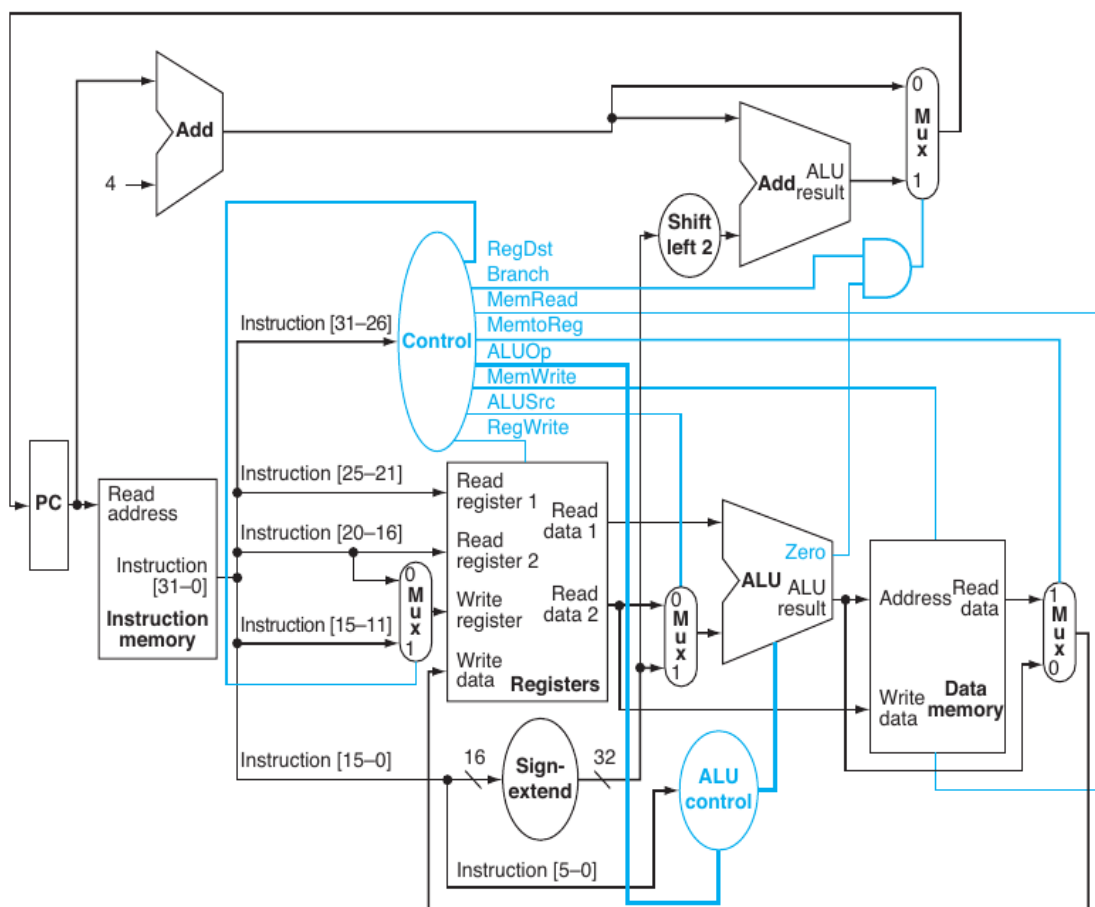


شکل ۱: Datapath در یک نگاه

Control Unit (۲)

وقتی برای یک معماری خاص Instruction Set نوشته می‌شود، در واقع به این معنی است که هر Instruction از یک سری رجیسترهای خاص استفاده کند و همچنین از مسیر خاصی در Datapath رد بشود. این مسیریابی و کدگشایی و کنترل مسیر گذر یک دستور و داده‌های آن، توسط Control Unit انجام می‌شود. تمام کارهایی

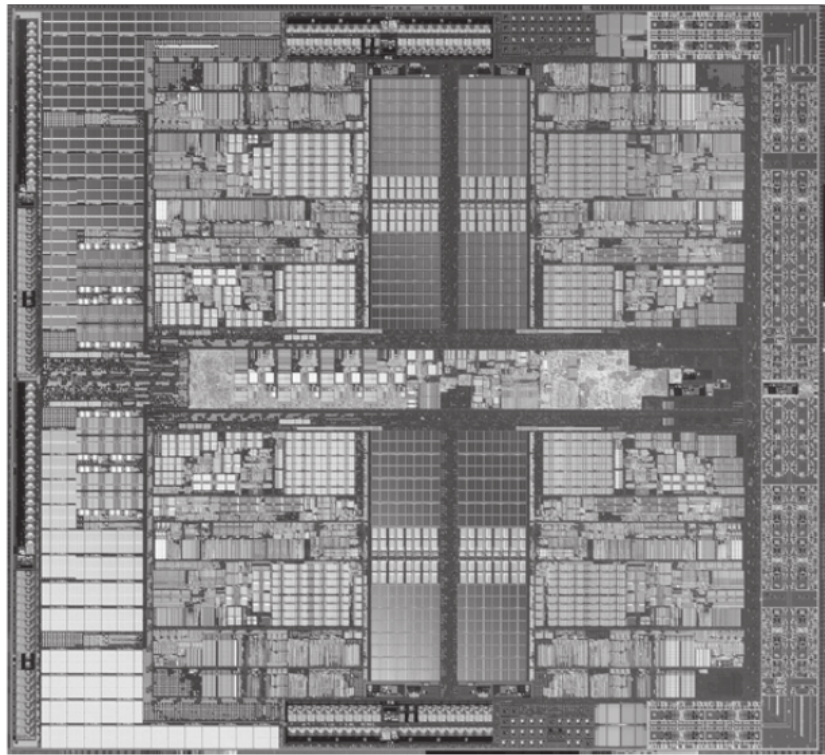
که کنترل یونیت انجام می‌دهد با رنگ آبی در تصویر ۲ مشخص شده‌اند که شامل سیگنال‌هایی است که با فرستادن صفر و ۱ تعیین می‌کنند که یک عملی انجام بشود یا نشود و بدین صورت کنترل یونیت Datapath را کنترل می‌کند.



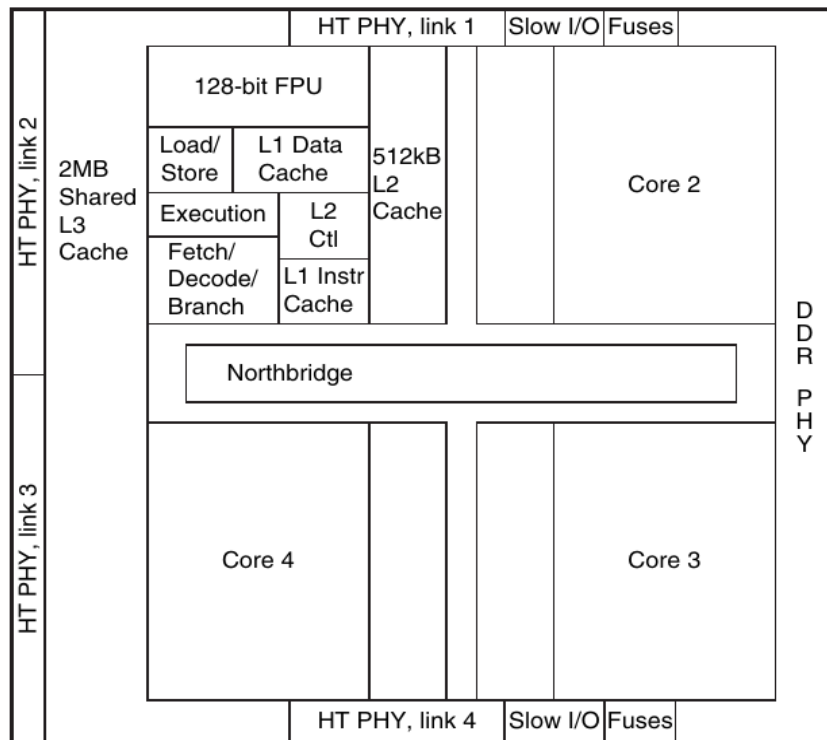
شکل ۲: سیگنال‌های Control Unit در Datapath

● یردازندهی AMD Barcelona

تصویر ۳(آ) معماری پردازنده چند هسته‌ای به نام AMD Barcelona microprocessor می‌باشد که شامل ۴ هسته است. در تصویر ۳(ب) هسته اول آن بطور کامل شرح داده شده است که شامل قسمت‌هایی همچون Load/Store، Fetch/Decode/EXE، بخش حافظه‌ی cache و... است که هرچهار هسته‌ی این پردازنده دقیقاً شامل همین قسمت‌هایی هستند که در هسته اول به آن اشاره شد.



(آ) عکس واقعی پردازنده



(ب) نقشه‌ی طراحی پردازنده

۴. معماری‌های مختلف

دو معماری بسیار معروف در بازار کامپیوتر، معماری‌های x86 و arm هستند که در ادامه به بررسی این دو معماری می‌پردازیم.

• معماری x86

در سال ۱۹۷۲ شرکت Intel معماری Intel 8008 را معرفی کرد. در تصویر ۳ یکی از پردازنده‌های اولیه ساخته بر پایه این معماری را مشاهده می‌کنید.

پس از آن، شرکت اینتل معماری‌های دیگری به نام‌های Intel 8088، Intel 16-bit 8086، Intel 80186، Intel 80286 و... معرفی کرد و این سری معماری x86 نام گرفتند. در واقع تمامی پردازنده‌های کنونی همگی بر پایه‌ی این معماری نوشته شده‌اند و کدهایی که برای آن پردازنده‌های در آن سال‌ها نوشته شده‌اند را می‌توان کامپایل و روی جدیدترین پردازنده‌های کنونی اجرا کرد.

پردازنده‌های شرکت‌های Intel و AMD همگی برپایه‌ی این معماری ساخته می‌شوند.

• معماری arm

نام این معماری برگرفته از Advanced RISC Machines که قبل‌تر از Acorn RISC Machines گرفته شده بود، است.

پردازنده‌های آرم، به دلیل

- قیمت ارزان،

- مصرف انرژی کم و

- تولید گرمای کم

برای دستگاه‌های سبک و دارای باتری مثل تلفن‌های هوشمند و لپ‌تاپ‌ها بسیار مناسب هستند.



شکل ۳: یک نوع پردازنده Intel C8008-1 با سرامیکی بنفش، درب و پین‌های فلزی با روکش طلا.

البته پردازنده‌های آرم پردازنده‌های ضعیفی نیستند و بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ سریع‌ترین سوپرکامپیوتر دنیا (Fugako) هم از پردازنده‌های معماری آرم استفاده می‌کرد. شرکت Apple هم چیپ‌های سری M را برپایه معماری آرم طراحی و تولید می‌کند.

۵. معماری کامپیوتر در آینده

معماری کامپیوتر در آینده بر اساس نیازهای فعلی ما ایجاد خواهد شد. برخی از نیازهای اساسی ما در حوزه‌های زیر می‌باشد:

- هوش مصنوعی و یادگیری ماشین
به عنوان مثال می‌توان به نیاز حسگرهای قدرتمندتری که دیتاهای متنوع‌تر و با کیفیت‌تری را دریافت و پردازش کنند اشاره کرد
- پردازش داده‌های کلان
مغز ما حجم بسیاری از داده‌ها را پردازش می‌کند که نیازمند ساختار پیشرفته‌ای برای مدیریت و پردازش این حجم از داده است. ساختار نوروهای مغز به شیوه‌ایست که در عین انتقال اطلاعات و فعالیت به عنوان انتقال دهنده اطلاعات، مسئول ذخیره‌سازی و پردازش اطلاعات نیز هست. الگو برداری از این مدل می‌تواند منجر به ایجاد معماری‌های جدیدی در آینده‌ی نه چندان دور شود.
- محاسبات کوانتومی
با پیشرفت فناوری کوانتومی، کامپیوترهای کوانتومی قادر به انجام محاسبات با سرعت و کارایی بسیار بالا در پردازش داده‌های پیچیده خواهند بود.
- محاسبات نوروفورمیک
منظور از محاسبات نوروفورمیک، محاسباتی مشابه ساختار مغز انسان است. معماری‌ای که در پردازش موازی قدرتمند بوده و انعطاف‌پذیر است و در عین حال در مصرف انرژی بهینگی بالایی دارد.

معماری کوانتومی

این معماری از ساختارهای کلاسیک بیتی پیروی نکرده و به جای آن، از مفهومی تحت عنوان کیوبیت پیروی می‌کند. این مفهوم دارای پیچیدگی‌های بیشتری نسبت به ساختار بیتی است. به صورت ساده می‌توان کیوبیت را بیتی در نظر گرفت که در آن واحد هم آبی رنگ است و هم قرمز رنگ! در نتیجه با این معماری می‌توان به دستاوردهای زیر اشاره کرد:

- (۱) سرعت بالا در حل مسائل پیچیده
- (۲) توانایی محاسبات مختلف به صورت موازی و همزمان
- (۳) دسترسی به رمزنگاری و امنیت بالاتر
- (۴) فناوری‌های نوروفورمیک

۶. هوش مصنوعی و معماری کامپیوتر

در دهه‌های ۸۰ و ۹۰ میلادی، کامپیوترها هر ۱۸ ماه دو برابر سریع‌تر می‌شدند. این بدان معنا بود که اگر شما یک کامپیوتر می‌خریدید و دوستان یک سال بعد از شما یک کامپیوتر جدیدتر می‌خرید، کامپیوتر دوستان بسیار سریع‌تر بود. مهندسان و مردم به این سرعت پیشرفت کامپیوترها عادت کرده بودند.

اما امروزه، در معماری کامپیوتر، می‌دانیم که تنها راه پیشرفت، افزودن شتاب‌دهنده‌هایی است که فقط برای یک کاربرد خاص خوب کار می‌کنند. برای مثال، پردازنده‌های گرافیکی^۹ برای انجام محاسبات گرافیکی بسیار کارآمد هستند. آنها می‌توانند میلیون‌ها ضرب ماتریس را در هر ثانیه انجام دهند، که برای کارهایی مانند رندرینگ 3D و بازی‌های ویدیویی ضروری است.

با کند شدن قانون مور، دیگر انتظار نمی‌رود که کامپیوترهای همه منظوره سریع‌تر شوند. این به این دلیل است که قانون مور، که بیان می‌کند تعداد ترانزیستورها در یک میکروچیپ هر دو سال دو برابر می‌شود، در حال کند شدن است. این به این دلیل است که ساخت ترانزیستورهای کوچکتر و کوچکتر چالش برانگیزتر می‌شود.

با این حال، مردم همچنان به دنبال راه‌هایی برای بهبود عملکرد کامپیوترهای خود هستند. یکی از راه‌ها افزودن شتاب‌دهنده‌هایی است که فقط برای یک کاربرد خاص خوب کار می‌کنند.

به طور اتفاقی، همزمان با این وقایع، یک انقلاب در هوش مصنوعی به نام یادگیری ماشین رخ داده است. یادگیری ماشین بر ضرب ماتریس متکی است. برای مثال، شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) از ضرب ماتریس برای یادگیری الگوها در داده‌ها استفاده می‌کنند.

واحد پردازش تنسور (TPU) یک نوع شتاب‌دهنده یادگیری ماشین است که توسط گوگل طراحی شده است. TPUها برای انجام ضرب ماتریس بسیار کارآمد هستند، که برای کارهایی مانند آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) ضروری است.

مراجع

[1] A. V. Aho. Compilers: Principles, Techniques, & Tools. Pearson/Addison Wesley, 2007.

خدیجه نظری

ورودی ۱۴۰۰ مهندسی کامپیوتر دانشگاه اصفهان

فاطمه علی‌ملکی

ورودی ۱۴۰۰ مهندسی کامپیوتر دانشگاه اصفهان

مهدی حق‌وردی

ورودی ۱۴۰۰ مهندسی کامپیوتر دانشگاه اصفهان

امیررضا جهانگیری

ورودی ۱۴۰۰ مهندسی کامپیوتر دانشگاه اصفهان

^۹ GPU

محمدحسین چهنندی
ورودی ۱۴۰۰ مهندسی کامپیوتر دانشگاه اصفهان