المقالة الافتتاحية

الحوسبة

مراحل التطور ـ التطبيقات ـ التحديات ـ الاتجاهات المستقبلية

أ.د. علاء الدين محمد الغزالى

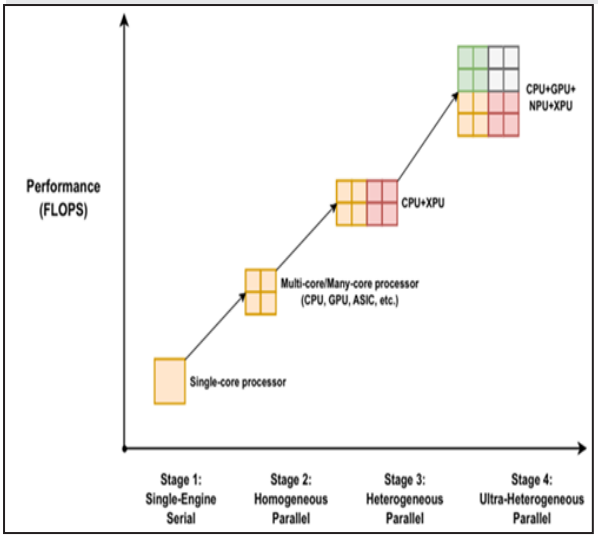
رئيس مجلس إدارة المجلة

a.elghazali@gmail.com

تطور الحوسبة

نبدأ هذه المقالة بتوضيح لتطورالحوسبة ولعل شكل رقم ١ يلقى الضوء على هذا التطور بصورة واضحة ، فالبداية من المعالجة التسلسلية أحادية المحرك ، ثم الحوسبة المتجانسة ، ثم الحوسبة غير المتجانسة ووصولاً إلى الحوسبة فائقة الشمول Ultra-Heterogeneous Parallel (UHC) . يمكن وصف تطور الحوسبة فى أربعة مراحل ، وتجدر الإشارة أنه سوف يتم التركيز على المرحلتين الثالثة والرابعة لكى يتوافق مع الهدف من هذه المقالة.

المرحلة الأولى يتعامل معالج واحد مع جميع المهام الحسابية بالتتابع ، مما يُحدد الأداء بقدرات وحدة معالجة واحدة. ، وهنا نطرح السؤال لماذا تفشل الحوسبة التقليدية؟ مع تزايد تعقيد أحمال العمل المعتمد على الحاسب، أصبح النهج الموحد الذي يعتمد على بنية المعالجات المركزية التقليدية يُشكل عقبة ، حيث صُممت وحدات المعالجة المركزية لمهام عامة، لكنها غالبًا ما تكون أقل كفاءة في المهام المتخصصة مثل التعلم العميق، ومعالجة الصور، وعمليات التشفير. ونتيجة لذلك، نحتاج إلى معالجات مختلفة للتعامل مع مهام محددة بشكل أفضل. لهذا مع تزايد الطلب على أداء أعلى أدى ذلك إلى المرحلة التالية.



شكل رقم ١

تطور مراحل تطور الحوسبة

المرحلة الثانية: التي شهدت إدخال المعالجة المتوازية المتجانسة. الحوسبة المتوازية المتجانسة هي نظام حوسبة متوازية تكون فيه جميع عناصر المعالجة (النوى، المعالجات، إلخ) متطابقة من حيث بنيتها، ومجموعة تعليماتها، وقدرات أدائها. هذا يعني أنها جميعًا قادرة على تنفيذ نفس المهام بنفس الكفاءة . على تنفيذ

نفس المهام بنفس الكفاءة.

إذن فى هذه المرحلة ، تعمل عدة أنوية من نفس النوع.

- مثل وحدات المعالجة المركزية متعددة الأنوية (وجود أكثر من وحدة معالجة (نواة) على شريحة واحدة) أو الدوائر المتكاملة التطبيقية (ASICs)- معًا لأداء المهام بالتوازي. يُحسّن هذا النهج الأداء من خلال توزيع أحمال العمل على عدة معالجات متطابقة.

المرحلة الثالثة: يشهد عالم الحوسبة تغيرات سريعة. ولقد كان ظهور بُنى الحوسبة غير المتجانسة دورًا محوريًا في رسم ملامح المستقبل. فمع تزايد أحجام البيانات وتزايد الطلب على المعالجة الفورية، عجزت نظم الحوسبة التقليدية عن تلبية احتياجات الأداء. ولقد برزت الحوسبة غير المتجانسة، التي تجمع بين أنواع مختلفة من المعالجات وموارد الحوسبة، كحلٍ واعد. فماهية الحوسبة غير المتجانسة، وما هى فوائدها، وكيف ستقود الجيل القادم من الحوسبة.

تشير الحوسبة غير المتجانسة إلى النظم التي تستخدم أنواعًا متعددة من وحدات المعالجة، مثل وحدات المعالجة المركزية Central Processing Units (CPU)، ووحدات معالجة الرسومات Graphics Processing Units (GPU) ، ومصفوفات البوابات القابلة للبرمجة ميدانيًا Field-Programmable Gate Arrays (FPGA)، والدوائر المتكاملة الخاصة بالتطبيقات Application-Specific Integrated Circuits (ASICs)، وحدات معالجة البيانات Data Processing Unit (DPUs) ، وحدات المعالجة العصبية Neural Processing Units (NPU) ، وحدات معاجة متخصصة موحدة (XPU) . وبخلاف النظم المتجانسة التي تعتمد على نوع واحد من المعالجات، تستفيد البُنى غير المتجانسة من نقاط قوة وحدات الحوسبة المختلفة لتحسين الأداء، وكفاءة الطاقة، والمرونة.

وهنا تجدر الإشارة إلى أهمية إيضاح المكونات الرئيسية للحوسبة غير المتجانسة وهى على النحو التالى:-

١. وحدات المعالجة المركزية (CPUs)

تظل وحدات المعالجة المركزية (CPUs) العمود الفقري لمعظم نظم الحوسبة نظرًا لتعدد استخداماتها. ومع ذلك، لم تعد الخيار الأمثل للمهام المتخصصة، مثل العمليات الحسابية عالية الإنتاجية.

٢. وحدات معالجة الرسومات (GPUs)

صُممت وحدات معالجة الرسومات (GPUs) في الأصل لعرض الرسومات، وأصبحت ضرورية لمهام الحوسبة المتوازية مثل التعلم الآلي والتشفير. تتميز وحدات معالجة الرسومات (GPUs) بمعالجة مجموعات البيانات الضخمة وإجراء حسابات متكررة في آنٍ واحد، مما يجعلها مثالية للعمليات كثيفة البيانات.

٣. مصفوفات البوابات القابلة للبرمجة ميدانيًا (FPGAs)

وحدات FPGA هي وحدات أجهزة مرنة يمكن برمجتها بعد التصنيع لأداء مهام محددة. وهي توفر أداءً أعلى من وحدات المعالجة المركزية (CPU) في مهام متخصصة مثل معالجة الإشارات أو الشبكات، كما أنها أكثر كفاءة في استهلاك الطاقة من وحدات معالجة الرسومات (GPU).

٤. الدوائر المتكاملة المخصصة للتطبيقات (ASICs)

بخلاف وحدات FPGA، تُصمم الدوائر المتكاملة التطبيقية (ASICs) خصيصًا لأداء وظيفة محددة، مثل تسجيل عمليلت البيتكوين وطرحها للتداول Bitcoin Mining أو استدلال فى الذكاء الاصطناعي. تقدم هذه الدوائر أفضل أداء، لكنها مكلفة وتستغرق وقتًا طويلاً في التصميم والتصنيع.

٥. وحدات معالجة البيانات (DPUs)

وحدات معالجة البيانات (DPUs) عبارة عن معالجات حاسب قابلة للبرمجة تدمج بشكل وثيق وحدة المعالجة المركزية للأغراض العامة مع أجهزة واجهة الشبكة.

وتعد وحدة معالجة البيانات (DPU) فئة جديدة من المعالجات القابلة للبرمجة تجمع ثلاثة عناصر رئيسية أى يمكن أعتبار وحدة معالجة البيانات (DPU) هي نظام على شريحة (SoC) يجمع بين:

١) وحدة معالجة مركزية (CPU) متعددة الأنوية multi-core ، عالية الأداء، قابلة للبرمجة، ومتوافقة مع معايير الصناعة، وتعتمد عادةً على بنية Advanced RISC Machine (ARM) واسعة الانتشار، ومتصلة بشكل وثيق بمكونات نظام على شريحة (SoC) الأخرى.

٢) واجهة شبكة عالية الأداء قادرة على تحليل البيانات ومعالجتها ونقلها بكفاءة بسرعة الخط، أو سرعة بقية الشبكة، إلى وحدات معالجة الرسومات (GPU) ووحدات المعالجة المركزية (CPU)

٣) مجموعة غنية من محركات التسريع المرنة والقابلة للبرمجة، تعمل على تخفيف العبء وتحسين أداء التطبيقات في مجالات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، وأمان الثقة الصفرية (وهو نموذج أمان يفترض عدم الثقة بأي مستخدم أو جهاز بشكل افتراضي، بغض النظر عما إذا كان داخل محيط الشبكة أو خارجه.) ، والاتصالات، والتخزين، وغيرها.

٦. وحدات المعالجة العصبية (NPUs)

هى أجهزة مُتخصصة سريعة مُصمَّمة للتعامل بكفاءة مع مهام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي. وهى مُحسَّنة لأنواع الحسابات المُستخدمة في الشبكات العصبية، مثل ضرب المصفوفات، والتي تتطلب عمليات حسابية مكثفة لوحدات المعالجة المركزية ووحدات معالجة الرسومات.

٧. وحدات معاجة متخصصة موحدة (XPU)

في سياق الحوسبة، يشير مصطلح XPU إلى أي وحدة معالجة متخصصة مصممة لتسريع أحمال عمل محددة، متجاوزًا بذلك قدرات وحدة المعالجة المركزية التقليدية. وهو مصطلح مرن، حيث يُمثل «X» متغيرًا يمكن ربطه بهياكل أجهزة متنوعة، مثل وحدات المعالجة المركزية (CPU)، ووحدات معالجة الرسومات (GPU)، ووحدات FPGA، وحتى مُسرّعات مخصصة مثل وحدات معالجة البيانات (DPU) أو وحدات معالجة المعلومات (IPU). تهدف استراتيجية Intel الخاصة بـ XPU إلى توفير نموذج برمجة موحد ومجموعة متنوعة من خيارات الأجهزة لتحسين الأداء في مختلف التطبيقات.

فوائد الحوسبة غير المتجانسة

١. تحسين الأداء

من خلال إسناد المهام إلى وحدة المعالجة الأنسب، يمكن للحوسبة غير المتجانسة تحسين الأداء بشكل ملحوظ. على سبيل المثال، يمكن نقل مهام تدريب الذكاء الاصطناعي إلى وحدات معالجة الرسومات (GPU) أو الدوائر المتكاملة التطبيقية (ASICs) أو وحدات المعالجة العصبية (NPUs)، بينما تبقى مهام التحكم التقليدية على وحدة المعالجة المركزية (CPU). يؤدي هذا إلى معالجة أسرع وزمن وصول أقل للتطبيقات المعقدة.

٢. كفاءة الطاقة

تتميز المعالجات المتخصصة، مثل وحدات معالجة الرسومات (GPU) والدوائر المتكاملة التطبيقية (ASICs)، بكفاءة أعلى في استخدام الطاقة لمهام محددة. يمكن أن يؤدي هذا إلى توفير كبير في الطاقة في مراكز البيانات ، مما يقلل من تكاليف التشغيل والتأثير البيئي.

٣. المرونة

يتيح استخدام مصفوفات البوابات القابلة للبرمجة ميدانيًا FPGAs في النظم غير المتجانسة إلى إعادة التهيئة بعد النشر، مما يوفر مستوى من التكيف غير متوفر في النظم التقليدية. وهذا يجعلها مفيدة بشكل خاص في قطاعات مثل الاتصالات والفضاء، حيث تتطور متطلبات النظام بسرعة.

تطبيقات الحوسبة غير المتجانسة

تجدر الإشارة إلى أن هناك العديد من التطبيقات الخاصة بالحوسبة غير المتجانسة وهى على النحو التالى:

١. الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي

أدت الحوسبة غير المتجانسة إلى صعود المعالجات المدمجة بالذكاء الاصطناعي حيث لم يعد الذكاء الاصطناعي يعتمد على نوع واحد من المعالجات، بل أصبحت البُنى الحديثة تدمج وحدات المعالجة المركزية (CPU) ووحدات معالجة الرسومات (GPU) ووحدات المعالجة العصبية (NPU) لتوفير أداء متوازن للذكاء الاصطناعي. تُجسّد سلسلة Intel Core Ultra هذا التوجه، حيث تدمج وحدات المعالجة العصبية (NPU) المدمجة لتخفيف أعباء عمل الذكاء الاصطناعي عن وحدة المعالجة المركزية ووحدة معالجة الرسومات، مما يُحسّن كفاءة تطبيقات الذكاء الاصطناعي الطرفى Edge AI applications. تُقدّم C&T الجيل التالي من لوحة الدوائر المطبوعة SBC

مقاس ٣,٥ بوصة، وهي CT-DML01، المُدعّمة بالذكاء الاصطناعي، والتي تدمج معالجات Intel Meteor Lake لتطبيقات الذكاء الاصطناعي الطرفي.

ومن الجدير بالذكر أن وحدات المعالجة العصبية (NPU) تُعزز حوسبة الذكاء الاصطناعي منخفضة الطاقة في حين لا تزال وحدات معالجة الرسومات (GPUs) مهيمنة في مجال الذكاء الاصطناعي عالي الأداء، تُعدّ وحدات المعالجة العصبية (NPUs) رائدة في استدلال الذكاء الاصطناعي الطرفي، حيث تُعدّ كفاءة الطاقة أمرًا بالغ الأهمية. تستفيد أجهزة مثل نظم الأتمتة الصناعية والروبوتات ذاتية التشغيل من وحدات المعالجة العصبية (NPUs) لمعالجة مهام الذكاء الاصطناعي في الوقت الفعلي، مما يُقلل الاعتماد على الحوسبة السحابية. يُسرّع التوسع السريع للذكاء الاصطناعي في التصنيع الذكي والأمن وإنترنت الأشياء من اعتماد وحدات المعالجة العصبية (NPUs) في التطبيقات المدمجة والصناعية.

٢. الحوسبة عالية الأداء High-Performance Computing (HPC)

تُعد الحاجة إلى قوة حسابية هائلة أمرًا بالغ الأهمية في البحث العلمي، من التنبؤ بالطقس إلى فيزياء الجسيمات.. تُمكّن البنى غير المتجانسة مجموعات الحوسبة عالية الأداء (HPC) من تحقيق عمليات محاكاة أسرع ونماذج أكثر دقة. الحوسبة عالية الأداء (HPC) هي تقنية تستخدم مجموعات من المعالجات القوية التي تعمل بالتوازي لمعالجة مجموعات بيانات ضخمة ومتعددة الأبعاد وحل المشكلات المعقدة بسرعات فائقة. تحل الحوسبة عالية الأداء (HPC) بعضًا من أكثر مشكلات الحوسبة تعقيدًا في الوقت الفعلي. تعمل نظم الحوسبة عالية الأداء عادةً بسرعات تزيد عن مليون مرة عن أسرع نظم الحاسبات المكتبية أو المحمولة أو الخوادم التجارية.

تكشف أحمال عمل الحوسبة عالية الأداء (HPC) عن رؤى جديدة تُطوّر المعرفة البشرية وتُحقق مزايا تنافسية كبيرة. على سبيل المثال، تُجري الحوسبة عالية الأداء تسلسلات الحمض النووي والعمليات الآلية الخاصة بتداول الأسهم. كما تُشغّل خوارزميات ومحاكاة الذكاء الاصطناعي - مثل تلك التي تُمكّن السيارات ذاتية القيادة - والتي تُحلل كميات هائلة من البيانات المُتدفقة من أجهزة استشعار إنترنت الأشياء والرادار وأنظمة تحديد المواقع العالمية (GPS) في الوقت الفعلي لاتخاذ قرارات سريعة.

٣. إنترنت الأشياء Internet of Things (IoT)

مع تزايد انتشار أجهزة إنترنت الأشياء، تُولّد كميات هائلة من البيانات التي تحتاج إلى معالجة آنية. تُمكّن الحوسبة غير المتجانسة أجهزة الحافة من معالجة البيانات المحلية مع نقل المهام الأكثر تعقيدًا إلى السحابة. تُستخدم وحدات FPGA بشكل شائع في تطبيقات إنترنت الأشياء لمعالجة البيانات آنيًا والعمليات منخفضة الطاقة.

٤. المركبات ذاتية القيادة Autonomous Vehicles

مع استمرار تقدم صناعة السيارات نحو القيادة الآلية، يزداد الطلب على أنظمة مساعدة السائق المتقدمة Advanced Driver Assistance Systems (ADAS). تعتمد هذه الأنظمة على معالجة كميات هائلة من بيانات المستشعرات المتنوعة آنياً لاتخاذ قرارات حاسمة. ولتلبية هذه المتطلبات الصعبة، طورت شركة Qualcomm Technologies، حلول Snapdragon Ride القائمة على نظم حوسبة غير متجانسة على الرقائق (SoCs)، وهي تقنية ثورية تهدف إلى إحداث ثورة في نظم مساعدة السائق المتقدمة. تشير الحوسبة غير المتجانسة إلى استخدام وحدات معالجة مختلفة - مثل وحدات المعالجة المركزية (CPU)، ووحدات المعالجة العصبية (NPUs)، ومعالجات الإشارات الرقمية (DSPs)، ووحدات معالجة الرسومات (GPU) ومسرعات الرؤية عن طريق الحاسب - في نظام القيادة لأداء مهام محددة بكفاءة أكبر.

تستفيد منصة ADAS السابق الأشارة إليها من قوة الحوسبة غير المتجانسة لتحقيق ما يلى:

١) أداء وكفاءة مُحسّنان

٢) دمج مُحسّن للمستشعرات

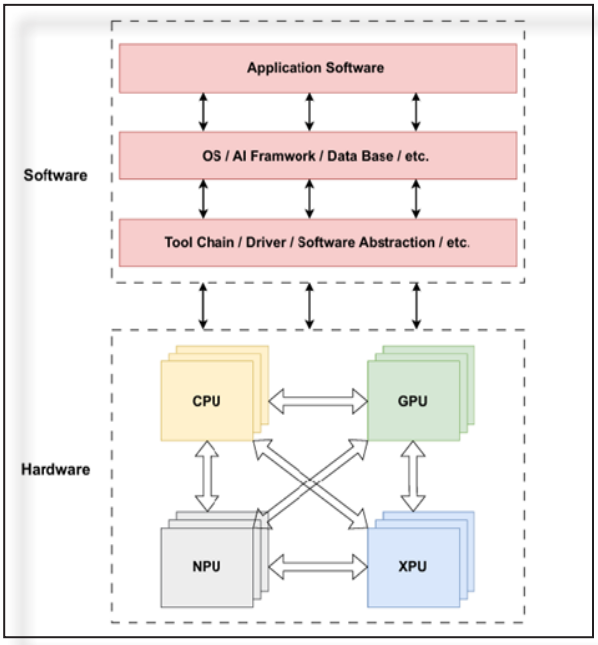
٣) التنقل في البيئات الحضرية حيث يتم الأستفادة بشكل كبير من بنية الحوسبة غير المتجانسة نظم ضغط الذاكرة والبيانات الفعالة التي تدعمها أنظمة SoCs لتلبية زمن الوصول والإنتاجية المطلوبين.

٤) الأستفادة من كل مستشعرات النظام فى حالات استخدام متعددة

٥) استجابة فورية

٦) كفاءة استخدام الطاقة وإدارة الحرارة بما يعزز الموثوقية

المرحلة الرابعة : مع ازدياد تعقيد التطبيقات وتنوعها، أدت الحاجة إلى تعظيم الكفاءة والأداء الحسابي من خلال هذه المرحلة الأخيرة وهى **الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول (UHC)**. تدمج هذه المرحلة أنواعًا متعددة من المعالجات، مثل وحدات المعالجة المركزية (CPU) ووحدات معالجة الرسومات (GPU) ووحدات المعالجة العصبية (NPU) ووحدات معالجة البيانات (DPU)، جامعةً نقاط قوتها المتخصصة لتلبية الاحتياجات الحسابية المعقدة. مع تطور التكنولوجيا، ندخل المراحل الأولى من **الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول (UHC)**، والتي تبشر بأداء أعلى من ذي قبل. على سبيل المثال، أظهرت النظم التي تدمج وحدات المعالجة المركزية (CPU) ووحدات معالجة الرسومات (GPU) ووحدات معالجة البيانات (DPU) تحسينات كبيرة في التعامل مع مختلف مهام الذكاء الاصطناعي. ومع ذلك، تعتمد هذه النظم على دعم كل من البرمجيات والأجهزة. يوضح الشكل ٢ طبقات البرمجيات والأجهزة المطلوبة لنظم **الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول**. تتولى طبقة البرمجيات مسؤولية إدارة وحدات المعالجة المتنوعة وتحسينها بفعالية. تدعم أطر العمل البرمجية التواصل والتنسيق السلس بين مختلف أنواع المعالجات، مما يسمح بتعيين المهام ديناميكيًا إلى وحدة المعالجة الأنسب. وقد عززت التطورات في أطر العمل مثل CUDA وOpenCL بشكل كبير قابلية التشغيل البيني وتوزيع أعباء العمل عبر المعالجات، مما يتيح إدارة المهام الديناميكية بكفاءة. يتضمن ذلك تطوير برامج جدولة متطورة، ومديري موارد، وبروتوكولات اتصال يمكنها التعامل مع تعقيدات بيئات **الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول**. بالإضافة إلى ذلك، يجب أن تتطور نماذج ولغات البرمجة (مثل CUDA وOpenCL وOpenMP وMPI، إلخ) لتوفير تجريدات تُبسط تطوير التطبيقات لنظم الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول ، مما يُمكّن المطورين من الاستفادة الكاملة من موارد الحوسبة المتنوعة دون الحاجة إلى إدارة تفاصيل الأجهزة منخفضة المستوى.



شكل رقم ٢

طبقات الأجهزة والبرمجيات للنظم غير المتجانسة فائقة الشمول

يوضح الشكل السابق مكونات البرامج والأجهزة الأساسية المطلوبة لنظم الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول ، مع التركيز على قابلية التشغيل البيني وتوزيع عبء العمل.

تدمج هياكل الأجهزة الخاصة بالحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول وحدات معالجة متعددة في نظام متماسك. يتضمن ذلك تصميم وصلات توفر اتصالاً عالي النطاق الترددي وسريع الاستجابة بين وحدات المعالجة المركزية (CPU)، ووحدات معالجة الرسومات (GPU)، ووحدات المعالجة العصبية (NPU)، ووحدات المعالجة الرقمية (DPU)، وغيرها من المعالجات المتخصصة.

ستتطور هياكل الذاكرة أيضًا لدعم مشاركة البيانات ونقلها بكفاءة بين وحدات المعالجة المختلفة، مما يقلل من الاختناقات. هناك ابتكارات مثل التكديس ثلاثي الأبعاد وتقنيات التغليف المشترك المتقدمة والتى تؤدى دورًا

محوريًا في تمكين نظم الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول من خلال تقليل تأخير الاتصال وتحسين أداء النظام.

يُبشر مستقبل نظم الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول استخدام واعد، مع تطبيقات محتملة تشمل مجالات مُختلفة، بما في ذلك الذكاء الاصطناعي، والحوسبة العلمية، ومعالجة البيانات في الوقت الفعلي. ومع تزايد الطلب على نظم أكثر قوة وكفاءة، من المُتوقع أن تصبح هياكل نظم الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول أكثر انتشارًا. وستكون التطورات في كل من البنية التحتية التكنولوجية وأطر التطوير فعّالة في دفع هذا التطور، وتسهيل النظم التي تدمج وحدات المعالجة المُتنوعة بسلاسة لتقديم أداء وكفاءة مُتوازيين.

تحديات الحوسبة غير المتجانسة

تُسبب نظم الحوسبة غير المتجانسة مشاكل فريدة لا توجد في نظم الحوسبة المتجانسة التقليدية. يُفاقم وجود العديد من وحدات المعالجة جميع المشكلات التي تُواجهها نظم المعالجة المتوازية المتجانسة، إلا أن مقدار عدم التجانس في النظام قد يُضيف عدم اتساق إلى تطوير النظام، وطرق برمجته، وقدراته العامة. فيما يلي بعض تحديات النظام غير المتجانس:

١. بنية مجموعة التعليماتInstruction-Set Architecture (ISA) وواجهة برمجة التطبيقات Application Programming Interface (API)

تحتوي النظم غير المتجانسة على أجهزة حوسبة متعددة ذات بنى نظام ومجموعات تعليمات ونماذج برمجة مختلفة، وبالتالي، غالبًا ما يكون للنظم غير المتجانسة نماذج برمجة مختلفة عن وحدات المعالجة المركزية. قد تختلف بنى مجموعة تعليمات عناصر الحوسبة (البرامج)، مما يؤدي إلى عدم توافق ثنائيbinary. وبالمثل، قد تُفسر عناصر الحوسبة الذاكرة بطرق عديدة. يشمل ذلك كيفية تخزين أنواع البيانات متعددة البايتسmulti-byte data في الذاكرة (big-endian or little-endian)، واصطلاحات الاستدعاء للقيم والمتغيرات عن طريق الدوال، وتخطيط الذاكرة، ويعتمد ذلك على البنية والمُجمِّع (برنامج يحول الأوامر إلى أكواد تنفذ عن طرق الحاسب) المُستخدمين. يكمن حل هذه المشكلة في السماح لوحدة المعالجة المركزية بالتحكم في الحوسبة وإتمامها بمساعدة وحدة معالجة الرسومات.

٢. واجهة الذاكرة والتسلسل الهرمي

تختلف هياكل ذاكرة التخزين المؤقت cache وبروتوكولات تماسكها في عناصر الحوسبة، وقد يكون الوصول إلى الذاكرة موحدًا أو غير موحد (NUMA) . كما يمكن اكتشاف اختلافات في قدرة قراءة أطوال بيانات عشوائية، حيث لا تستطيع بعض المعالجات/الوحدات سوى قراءة البايتس bytes أو الكلمات أوالنقل السريع للبياناتburst . تقوم ساسلة من التعليمات threads (هى أصغر سلسلة من التعليمات المبرمجة التي يمكن إدارتها بشكل مستقل بواسطة المجدول، وعادةً ما يكون جزءًا من نظام التشغيل). المختلفة في برنامج متوازي بالوصول إلى نفس الذاكرة مع مشاركة البيانات وتضارب الوصول، وذاكرات مختلفة مع نقل البيانات ومشاكل الاتصال، وذاكرات متميزة مع طرق وصول مختلفة وتأخيرات.

٣. الترابط

من التحديات الأخرى التى تواجه الحوسبة غير المتجانسة إدارة حركة البيانات بين أنواع مختلفة من المعالجات. أثناء نقل البيانات بين وحدات المعالجة المركزية (CPU) ووحدات معالجة الرسومات (GPU) والوحدات الأخرى، قد تنشأ اختناقات في زمن الوصول وعرض النطاق الترددي. يجب تحسين تسلسلات الذاكرة والوصلات البينية لضمان تدفق سلس للبيانات.

وبصرف النظر عن واجهات الذاكرة/الناقلات الأساسية، قد تحتوي عناصر الحوسبة على أنواع عديدة من التوصيلات. ومن أمثلة هذه الأجهزة واجهات الشبكة المخصصة، وأجهزة الوصول المباشر إلى الذاكرة (DMA)، وصناديق البريد، وذاكرة First-In, First-Out (FIFO) وهي نوع من الذاكرة (أو بنية بيانات) تعمل على أساس مبدأ أن أول عنصر بيانات يتم كتابته في الذاكرة هو أول عنصر يتم قراءته. علاوة على ذلك، في حين أن أجزاء معينة من نظام غير متجانس قد تكون متسقة مع ذاكرة التخزين

المؤقت، قد تتطلب أجزاء أخرى مشاركة نشطة من البرامج لضمان الاتساق والتماسك. يجب أن يسمح إطار عمل برمجي قوي للبرمجة المتوازية غير المتجانسة للمبرمجين باستخدام الموارد غير المتجانسة الغنية إلى أقصى حد ممكن مع تجنب الاضطرار إلى الاهتمام بتفاصيل الأجهزة المعقدة.

٤. الأداء

في حين أن البنيات غير المتجانسة توفر مزايا في الأداء، إلا أنها تأتي مع زيادة في تعقيد البرمجيات. يتطلب تطوير برمجيات يمكنها توزيع المهام بكفاءة بين وحدات المعالجة المركزية (CPU) ووحدات معالجة الرسومات (GPU) والمعالجات الأخرى أدوات وأطر عمل متخصصة. يشمل ذلك نماذج برمجة مثل CUDA (لوحدات معالجة الرسومات) أو OpenCL، مما يزيد من تعقيد عملية التطوير.

من جهة أخرى في نظم غير متجانسة، قد تحتوي وحدات المعالجة المركزية ذات البنى المتطابقة على اختلافات جوهرية في البنى الدقيقة، مما يؤدي إلى درجات متفاوتة من الأداء. قد تؤدي عدم تناسق القدرات، إلى جانب نماذج البرمجة غير الشفافة وتجريدات أنظمة التشغيل، أحيانًا إلى مشاكل في التنبؤ بالأداء، خاصةً مع أحمال العمل المختلطة . وللتغلب على هذه المشكلة، اقترح الباحثون نموذجًا لتحليل أداء نظم متعددة الأنوية-multi core systems غير متجانسة لتقسيم مهام الحوسبة بشكل عادل .

إدارة الطاقة من الموضوعات الهامة التى تؤثر على الأداء وهنا يتضح أن النظم غير المتجانسة يمكن أن تكون أكثر كفاءة في استخدام الطاقة بشكل عام، إلا أن إدارة استهلاك الطاقة لوحدات المعالجة المتعددة تُمثل تحديًا. غالبًا ما تُستخدم تقنيات مثل القياس الديناميكي للجهد والتردد (DVFS) وبوابات الطاقة لتحسين استخدام الطاقة.

٥. تقسيم البيانات

في حين أن تقسيم البيانات على منصات متجانسة غالبًا ما يكون بسيطًا، فقد ثبت أن المشكلة تكمن في الوقت غير الحتمي المتعدد الحدود NP-Complete في حالة عدم التجانس العامة. وقد ثبت وجود تقسيمات مثالية تُوازن الحمل تمامًا وتُقلل حجم الاتصالات لأعداد محدودة من الأقسام. ومن الضروري إجراء المزيد من الأبحاث للحصول على التقسيم الأمثل في منصة غير متجانسة.

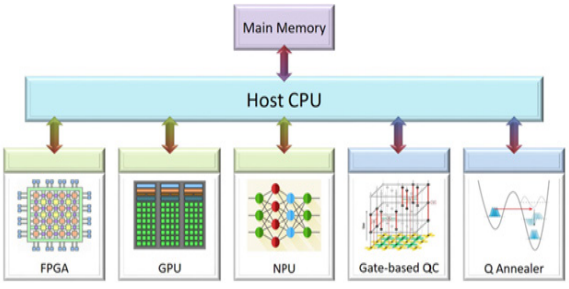
الاتجاهات المستقبلية للحوسبة غير المتجانسة

مع توجه الحوسبة نحو بنية الحوسبة غير المتجانسة فائقة الشمول التي تدمج معالجات متنوعة مثل وحدات المعالجة المركزية (CPU)، ووحدات معالجة الرسومات (GPU)، ووحدات معالجة الرسومات الحرارية (TPU)، ووحدات FPGA، والمسرعات المتخصصة، يتطلب الأمر تقدمًا كبيرًا لمواجهة تحديات قابلية التوسع، وكفاءة الطاقة، والتعقيد . تتمتع هذه البنيات بإمكانية إحداث ثورة في الحوسبة من خلال الاستفادة من نقاط القوة الفريدة لكل نوع من أنواع المعالجات؛ ومع ذلك، فإن نجاح تنفيذها يعتمد على التغلب على العديد من العقبات الحرجة. يتمثل أحد الاتجاهات البحثية الرئيسية في تطوير خوارزميات الجدولة الهجينة. يجب أن تتكيف هذه الخوارزميات ديناميكيًا مع المتطلبات الحسابية المتنوعة، سواءً عبر الإنترنت أو خارجه، مع تحسين كفاءة الطاقة والأداء. بالإضافة إلى ذلك، يُعد تصميم أطر إدارة موارد مراعية للطاقة، تقلل من استهلاك الطاقة دون المساس بالإنتاجية الحسابية، أمرًا بالغ الأهمية لتحقيق أهداف الاستدامة. وفى هذ السياق يمكن الحديث عن الحوسبة غير المتجانسة الخضراء Green Heterogeneous Computing ، وكمثال على هذا النوع من الحوسبة في عصر إنترنت المركبات (IoV) المدعوم بتقنية الجيل السادس ، ساهمت الخدمات التي تركز على قوة الحوسبة في تعزيز تطوير تطبيقات مثل نظام المعلومات والترفيه داخل المركبة (IVI) ومساعدة القيادة الذكية. يوفر التعاون بين قوة الحوسبة المنتشرة بين الحافة والنهاية خدمات حوسبة لتطبيقات أنترنت المركبات. ومع ذلك، نظراً لتنوع مهام الحوسبة وتباين موارد قوة الحوسبة، فإن تخصيص موارد قوة الحوسبة بشكل معقول لتلبية احتياجات المستخدمين يمثل تحدياً. لحل هذه المشكلة، وقد تم اقتراح طريقة تخصيص طاقة حوسبة غير

متجانسة صديقة للبيئة لتقليل استهلاك الطاقة. أولاً، نقوم بتصميم بنية حوسبة غير متجانسة لأنترنت المركبات استنادًا إلى شبكة محددة بالبرمجيات (SDN) لتحقيق التكامل العميق بين طاقة الحوسبة والشبكة من خلال بنية الشبكة الهجينة لتحقيق التعاون بين المركبات والطرق والتعاون بين الطرق. ثم لضمان التوزيع المعقول لمهام الحوسبة المختلفة، نقوم بتصميم مخطط توزيع ذكي للقدرة الحاسوبية غير المتجانسة لتقليل استهلاك الطاقة على الحوسبة غير متجانسة لأنترنت المركبات. علاوة على ذلك، نقوم بصياغة التوزيع المشترك للاتصالات والقدرة الحاسوبية كعملية قرار ماركوف ونستخدم طريقة تحسين سياسة التقريب Proximal Policy Optimization (PPO)لتحقيق توزيع تكيفي للقدرات الحاسوبية غير المتجانسة. وقد أظهرت نتائج المحاكاة فعالية الطريقة المقترحة.

من مجالات التركيز الحيوية الأخرى تقنيات الربط البيني عالية النطاق الترددي ومنخفضة زمن الوصول، وهي ضرورية لتبادل البيانات بسلاسة بين المكونات غير المتجانسة. يمكن للابتكارات مثل الربط البيني الفوتوني والتعبئة ثلاثية الأبعاد أن تخفف من اختناقات النطاق الترددي وتقلل من زمن الوصول، مما يتيح اتصالاً فعالاً بين المعالجات. لتعزيز اعتماد المطورين وتبسيط البرمجة للنظم غير المتجانسة، يُعدّ تحسين أطر العمل مثل CUDA وOpenCL وSYCL وoneAPI، بالإضافة إلى نماذج البرمجة الموحدة الناشئة مثل CodeFlow ، أمرًا ضروريًا. يجب أن توفر هذه الأطر تجريدات قوية، مما يسمح للمطورين بتسخير الإمكانات الكاملة للهياكل المتنوعة دون التعامل مع تعقيدات الأجهزة منخفضة المستوى، حيث تنشأ تعقيدات الأجهزة منخفضة المستوى من التفاصيل المعقدة لكيفية تفاعل البرامج مباشرة مع المكونات المادية للحاسب.

وأخيراً نتحدث عن العلاقة بين الحوسبة الكمية Quantum Computing و الحوسبة غير المتجانسة من خلال برنامج البنى غير المتجانسة للكم Heterogeneous Architectures for Quantum (HARQ) والتابع لوكالة DARPA وهى وكالة مشاريع الأبحاث الدفاعية المتقدمة، وهي وكالة بحث وتطوير تابعة لوزارة الدفاع الأمريكية. مهمتها تطوير تقنيات رائدة للأمن القومي. تشتهر DARPA بتركيزها على الأبحاث عالية المخاطر وعالية العائد، وتأثيرها على التقنيات العسكرية والمدنية. الهدف الرئيسى لهذ البرنامج هو تطوير بنى حاسوبية كمية غير متجانسة للتغلب على قيود قابلية التوسع في النظم أحادية الكيوبت المتجانسة وتعزيز الحوسبة الكمية والاستشعار والاتصالات في المستقبل. ويركز البرنامج على مجمعات الدوائر الكمية والبرمجيات للنظم غير المتجانسة؛ و سلسلة الكتل المؤمنة الكمية Quantum Secured Blockchain (QSB) ، الذي يتناول تقنيات التوصيل البيني لربط أنواع مختلفة من الكيوبت. و تعتبر البنى غير المتجانسة مهمة في الحوسبة الكمية لإنها تجمع بين أنواع مختلفة من المكونات الكمية والكلاسيكية لتحسين الأداء، وتوفر قابلية أكبر للتوسع وكفاءة أعلى من النظم المتجانسة التي تعتمد على نوع واحد فقط من الكيوبت qubit. ومن الجدير بالذكر أن هناك خطط تطوير بنى حاسوبية كمية غير متجانسة لتطبيقات مستقبلية في مجال الحوسبة الكمية وأجهزة الاستشعار الكمية والاتصالات الكمية. يوضح شكل ٣ شكل من أشكل العلاقات بين الحوسبة غير المنتجانسة وحوسبة الكم.



شكل رقم ٣

بنية النظام مع معالجات غير متجانسة

وفى نهاية هذا المقال أود الإشارة بأن ماسبق من نظم متقدمة وكذلك النظم العصبية والحوسبة الضوئية والوصلات الضوئية سوف توفر فرصًا مثيرة للاستكشاف فى المستقبل ، وسيكون تطوير هذه التقنيات متعددة

التخصصات أمراً بالغ الأهمية في تشكيل الجيل القادم من بنى الحوسبة عالية الأداء والموفرة للطاقة.

المراجع

1. Fei Dai, Md Akbar Hossain and Yi Wang, State of the Art in Parallel and Distributed Systems: Emerging Trends and Challenges, Electronics, https://doi.org/10.3390/electronics14040677, 10 February 2025.

2. Heterogeneous Computing Architectures – A Deep Dive into the Future of Computing, https://medium.com/@RocketMeUpIO/heterogeneous-computing-architectures-a-deep-dive-into-the-future-of-computing-9cefb8b7c1a1, Sep 22, 2024.

3. Dr. Sakyasingha Dasgupta, AI Drives the Software-Defined Heterogeneous Computing Era, https://www.edgecortix.com/en/blog/ai-drives-the-software-defined-heterogeneous-computing-era,

4. Sarah Lee, Advanced Heterogeneous Computing Techniques: Optimizing Performance in Complex Systems, https://www.numberanalytics.com/blog/advanced-heterogeneous-computing-techniques, June 19, 2025.

5. Advanced High-Performance Computing (HPC) Approaches for 2025: A Look into the Future, https://gganbumarketplace.com/ai_artificial_intelligence/advanced-hpc/,

6. Anthony Benavides, #15 Is Heterogeneous Computing the Future of AI Performance? https://www.linkedin.com/pulse/heterogeneous-computing-future-ai-performance-anthony-benavides-ru2gc, Mar 24, 2025.

7. C&T Solution Inc., NPU vs GPU: Which Is Better for AI?, https://www.candtsolution.com/news_events-detail/NPU-vs-GPU-Which-Is-Better-for AI/#:~:text=Unlike%20CPUs%20and%20GPUs%2C%20which,%2C%20IoT%2C%20and%20mobile%20devices, Mar 21, 2025

8. Stephanie Susnjara , Ian Smalley, What is high-performance computing (HPC)?, https://www.ibm.com/think/topics/hpc, 9 July 2024.

9. Med Sadek, Steering a revolution: Optimized automated driving with heterogeneous compute: Qualcomm Technologies' latest whitepaper navigates the advantages of Snapdragon Ride Solutions based on heterogeneous compute SoCs, https://www.qualcomm.com/news/onq/202406//steering-a-revolution-optimized-automated-driving-with-heterogeneous-compute , Jun 18, 2024.

10. Sharma G, Poudel P, Current trends in heterogeneous systems: A review. Trends Comput Sci Inf Technol 7(3): 0862022 ,.090-, DOI: 10.17352/tcsit.000055

11. Yingjie Liu, Dan Wang, Bin Song, Xiaojiang Du, Green Heterogeneous Computing Powers Allocation Using Reinforcement Learning in SDN-IoV, IEEE Transactions on Green Communications and Networking (Volume: 7, Issue: 2, June 2023), DOI: 10.1109/TGCN.2022.3187077.

12. John Keller, Researchers ask industry for heterogeneous systems that blend quantum computing and classical computing: The HARQ program›s goal is a new heterogeneous quantum computing paradigm that eliminates the constraints of homogeneous single-qubit systems, https://www.militaryaerospace.com/computers/article/55308981/heterogeneous-systems-combine-quantum-computing-and-classical-computing ,Aug. 12, 2025.