วารสารพัฒนบริหารศาสตร์ ปีที่ 35 ฉบับที่ 2 เมษายน-มิถุนายน 2538

ซูเปอร์คอมพิวเตอร์และการคำนวณยิ่งยวด

วิทยา วัชระวิทยากุล*

1. บทนำ

ในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2537 ประเทศไทยได้ติดตั้งซูเปอร์คอมพิวเตอร์เครื่องแรก ณ ศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ เหตุการณ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ประเทศไทยมีศักยภาพและความพร้อมที่จะก้าวสู่ยุคเทคโนโลยีชั้นสูงสุด ซูเปอร์คอมพิวเตอร์คือประเภทเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุดและราคาแพงที่สุดในยุคสมัยนั้นๆ นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรจำนวนมากมีความใฝ่ฝันที่จะได้ใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหา แต่ก็มีเพียงจำนวนน้อยเท่านั้นที่ได้มีโอกาสสัมผัสกับซูเปอร์คอมพิวเตอร์ พัฒนาการของซูเปอร์คอมพิวเตอร์เริ่มขึ้นตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1960 โดยมีจุดมุ่งหมายที่จะสร้างเครื่องคอมพิวเตอร์สำหรับแก้ปัญหา ซึ่งต้องอาศัยการคำนวณยิ่งยวด (supercomputing) ปัญหาซึ่งต้องอาศัยการคำนวณยิ่งยวดนี้ อาจเกิดจากความซับซ้อนของปัญหาเอง ที่ต้องอาศัยอัลกอริทึมซึ่งมีความซับซ้อนด้านเวลาสูง หรือเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่มาก เพื่อให้จำลองปรากฏการณ์จริงทางธรรมชาติได้

ในทศวรรษ 1980 นักวิทยาศาสตร์ซึ่งต้องการใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ จะต้องส่งข้อเสนอไปยังห้องปฏิบัติการซึ่งมีซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (ห้องปฏิบัติการเหล่านี้มักอยู่ในประเทศสหรัฐอเมริกาหรือประเทศในทวีปยุโรป) ซึ่งถ้าได้รับการเห็นชอบ ก็สามารถเดินทางไปประจำและทำงานตามห้องปฏิบัติการเหล่านั้นได้ ขั้นตอนดังกล่าวต้องเสียเวลาเป็นแรมปีกว่าจะได้เริ่มงานที่ต้องการ ในปัจจุบันระบบเครือข่ายมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น การเข้าถึงซูเปอร์คอมพิวเตอร์ก็สามารถทำได้สะดวกขึ้น โดยที่นักวิทยาศาสตร์สามารถส่งงานไปวิ่งบนซูเปอร์คอมพิวเตอร์โดยผ่านทางเครือข่าย อย่างไรก็ตามความเร็วของเครือข่ายก็ยังเป็นข้อจำกัดในการส่งข้อมูลจำนวนมาก งานประเภทจินตทัศน์วิทยาศาสตร์ (scientific visualization) จึงสามารถทำได้เฉพาะในห้องปฏิบัติการซึ่งมีซูเปอร์คอมพิวเตอร์และเครือข่ายท้องถิ่นความเร็วสูงเท่านั้น

*รองศาสตราจารย์ คณะสถิติประยุกต์ สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์

ในอนาคตหลายๆ ประเทศกำลังสร้างทางด่วนข้อมูล (information super-highway) ซึ่งจะเอื้ออำนวยการเข้าถึงซูเปอร์คอมพิวเตอร์ได้โดยสะดวก

บทความนี้อธิบายถึงความเป็นมาของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ และลักษณะของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งแตกต่างจากคอมพิวเตอร์ประเภทอื่นๆ โดยอธิบายถึงสถาปัตยกรรมของเครื่อง นอกจากนี้ยังได้อธิบายถึงการประยุกต์ใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในงานต่างๆ หัวใจของงานเหล่านี้ก็คืออัลกอริทึมซึ่งต้องใช้การคำนวณยิ่งยวด

2. ความเป็นมาของซูเปอร์คอมพิวเตอร์

ในหัวข้อนี้เรานำเสนอความเป็นมาของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ เมื่อได้พิจารณาถึงคำจำกัดความของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งหมายถึงคอมพิวเตอร์ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงสุด และราคาแพงที่สุดในยุคสมัยนั้น จะเห็นได้ว่า ณ เวลาใดเวลาหนึ่งย่อมต้องมีซูเปอร์คอมพิวเตอร์สำหรับยุคสมัยนั้น ดังนั้นซูเปอร์คอมพิวเตอร์จึงมีประวัติย้อนไปถึงเมื่อเราสร้างคอมพิวเตอร์เครื่องแรก ในยุคแรก (ทศวรรษ 1940 ถึงกลางทศวรรษ 1950) คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องถือเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์ เนื่องจากหน่วยงานของรัฐเท่านั้น ที่มีความสามารถเป็นเจ้าของเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ และคอมพิวเตอร์ซึ่งผลิตในเชิงพาณิชย์ในตอนต้นทศวรรษ 1950 ก็มีเพียงรุ่นเดียวสำหรับแต่ละผู้ผลิต เครื่องคอมพิวเตอร์เหล่านี้มีใช้เฉพาะในประเทศสหรัฐอเมริกาเท่านั้น

2.1 ยุคเริ่มต้น

เครื่องคอมพิวเตอร์เครื่องแรกแบบ electro-mechanical relay มีชื่อว่า Mark I เริ่มทำงานในปี 1943 เครื่อง Mark I นี้สามารถบวกหรือลบเลขได้ใน 0.3 วินาที และทำการคูณเลขได้ใน 3 วินาที งานหลักของเครื่อง Mark I ก็คือการคำนวณตารางเลขสำหรับงานขีปณาวุธ (ballistics tables) ในระหว่างสงครามโลกครั้งที่ 2 ในปี 1945 เครื่องคอมพิวเตอร์ ENIAC ซึ่งทำงานด้วยหลอดอิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดได้เริ่มทำงานเป็นครั้งแรก ENIAC ทำงานได้เร็วกว่า Mark I ถึง 1000 เท่า งานหลักของ ENIAC ก็คือการคำนวณแนวการวิ่งของขีปณาวุธ (ballistic trajectories) และการจำลองเพื่อออกแบบระเบิดไฮโดรเจน ก่อนหน้านี้ในปี 1943 รัฐบาลอังกฤษได้สร้างคอมพิวเตอร์ชื่อว่า Colossus เพื่อทำงานด้านถอดรหัสลับของฝ่ายเยอรมันในสงครามโลกครั้งที่ 2

ในปี 1949 เครื่องคอมพิวเตอร์ EDSAC ซึ่งเป็นเครื่องแบบเก็บชุดคำสั่ง (stored program architecture) เครื่องแรกได้ถูกสร้างขึ้นในประเทศอังกฤษ เครื่องแบบเดียวกันนี้ได้ถูกสร้างขึ้นในที่ต่างๆ ในประเทศสหรัฐอเมริกาในระยะเวลาเดียวกัน โดยที่แต่ละเครื่องมีชื่อแตกต่างกันคือ EDVAC, IAS, ILLIAC I และ ORDVAC เครื่องเหล่านี้ใช้ระบบเลขฐานสอง และทำการคำนวณแบบอนุกรม (serial arithmetic)

2.2 ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์

ความพยายามในการสร้างคอมพิวเตอร์ในเชิงพาณิชย์ เริ่มขึ้นในปลายทศวรรษ 1940 เครื่องคอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์เครื่องแรกคือ เครื่อง Mark I ซึ่งสร้างเสร็จในเดือนกุมภาพันธ์ 1951 โดยบริษัท Ferranti ในประเทศอังกฤษ เครื่อง Mark I นี้ มีราคาต่ำกว่า 500,000 เหรียญ และผลิตขายได้ประมาณ 9 เครื่อง หนึ่งเดือนต่อมาคือในราวเดือนมีนาคม 1951 บริษัท Remington-Rand ก็เริ่มขายเครื่องคอมพิวเตอร์ UNIVAC ในประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่อง UNIVAC นี้ ราคาประมาณ 750,000 เหรียญ และขายได้ถึง 48 เครื่อง บริษัท IBM ได้เริ่มโครงการสร้างคอมพิวเตอร์ในปี 1951 และเริ่มขายคอมพิวเตอร์เครื่องแรกราวปลายปี 1952 เครื่องรุ่นแรกนี้มีชื่อว่า IBM 701 IBM ติดตั้งรุ่น 701 นี้ ได้ถึง 19 เครื่อง

ตั้งแต่กลางทศวรรษ 1950 ตลาดคอมพิวเตอร์ได้ขยายตัวมากขึ้น ความต้องการคอมพิวเตอร์ในงานประเภทต่างๆ เริ่มแพร่หลายมากขึ้น อย่างไรก็ตามงานการคำนวณด้านวิทยาศาสตร์โดยเฉพาะในวงการทหาร ได้แยกตัวออกอย่างโดดเด่น งานประเภทเหล่านี้ต้องอาศัยการคำนวณยิ่งยวด (supercomputing) หน่วยงานซึ่งมีความต้องการงานการคำนวณยิ่งยวดมีความสามารถที่จะซื้อคอมพิวเตอร์ได้ในราคาที่เรียกได้ว่าไม่มีขีดจำกัด

IBM ได้เริ่มโครงการซูเปอร์คอมพิวเตอร์โครงการแรกในปี 1956 โดยตั้งเป้าหมายที่จะสร้างเครื่องซึ่งเร็วกว่าเครื่อง IBM 701 ถึง 100 เท่า ซูเปอร์คอมพิวเตอร์นี้มีชื่อว่า STRETCH (มีชื่อเชิงพาณิชย์ว่า IBM 7030) STRETCH ถูกสร้างเสร็จและใช้งานในปี 1961 IBM ขายเครื่อง STRETCH ได้ 8 เครื่อง งานที่วิ่งบน STRETCH นี้เป็นงานด้านพลังงานปรมาณูและงานทางทหาร อย่างไรก็ตามความสามารถของ STRETCH มิได้เป็นไปตามที่ตั้งเป้าไว้ การสร้างก็ต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงเกินกว่าที่ IBM จะรับได้ STRETCH จึงดูเหมือนจะเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์เครื่องแรกและเครื่องสุดท้ายของ IBM

Remington-Rand เริ่มโครงการซูเปอร์คอมพิวเตอร์โครงการแรกในปี 1956 เช่นเดียว กับ IBM ซูเปอร์คอมพิวเตอร์นี้มีชื่อว่า LARC ซึ่งผลิตเสร็จในปี 1961 และขายได้เพียง 2 เครื่องเท่านั้นก็ต้องหยุดผลิตเนื่องจากค่าใช้จ่ายสูงเกินกว่าที่ผู้ผลิตจะรับได้

ในปี 1956 อังกฤษได้เริ่มผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์เครื่องแรกชื่อว่า ATLAS และสามารถติดตั้งทำงานได้ในปี 1963 การสร้าง ATLAS ใช้เวลายาวนานเนื่องจากได้ผสานแนวคิดใหม่ๆ ลงในระบบ ซึ่งกลายเป็นมาตรฐานของระบบคอมพิวเตอร์ในยุคต่อมา แนวคิดเหล่านี้ได้แก่ multiprogramming, virtual memory และ time sharing ได้มีการติดตั้งใช้งานเครื่องดังกล่าวเพียง 3 เครื่องเท่านั้น และยุโรปก็ปิดฉากการเป็นผู้นำด้านคอมพิวเตอร์ ตั้งแต่กลางทรศวรรษ 1960

ในปี 1957 บริษัท Control Data Corporation (CDC) ได้ก่อตั้งขึ้นเพื่อสร้างคอมพิวเตอร์สำหรับงานการคำนวณยิ่งยวดเพียงอย่างเดียว เครื่องรุ่นแรกคือ CDC 1604 ในปี 1964 CDC ได้เปิดตัวซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์อย่างแท้จริงคือ CDC 6600

ซึ่งประสบผลสำเร็จอย่างสูง CDC กลายเป็นเจ้าตลาดซูเปอร์คอมพิวเตอร์แต่เพียงผู้เดียว ตั้งแต่กลางทศวรรษ 1960 จนถึงกลางทศวรรษ 1970 ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ของ CDC ซึ่งมีชื่อเสียงมากคือ CDC 7600 (1969) CDC STAR 100 (1973) และ CYBER 205 (1979)

ในปี 1972 Seymour Cray ซึ่งเป็นผู้หนึ่งซึ่งร่วมก่อตั้ง CDC ได้แยกตัวออกมาตั้งบริษัท Cray Research Inc. Cray ได้มีส่วนร่วมในการออกแบบซูเปอร์คอมพิวเตอร์ทุกรุ่นของ CDC ประสบการณ์เหล่านั้นได้ถูกผสมผสานให้กลายเป็นเครื่อง Cray 1 ซึ่งเริ่มทำงานครั้งแรกในปี 1976 ทั้ง CDC และ Cray เป็นผู้ผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์เพียง 2 บริษัทในโลก จนกระทั่งต้นทศวรรษ 1980 Cray ก็ค่อยๆ ขยับขึ้นเป็นผู้นำทางการตลาดจนถึงต้นทศวรรษ 1990 เครื่องทุกรุ่นของ Cray ประสบผลสำเร็จและเป็นที่ต้องการอย่างสูงทั่วโลก เครื่องเหล่านี้ได้แก่ Cray X-MP (1982), Cray 2 (1985), Cray Y-MP (1887), Cray C-90 (1992)

ตั้งแต่กลางทศวรรษ 1980 ตลาดซูเปอร์คอมพิวเตอร์ซึ่งขยายตัวอย่างรวดเร็วจน Cray ไม่สามารถจะตอบสนองความต้องการได้หมด เริ่มมีผู้ผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์เพิ่มมากขึ้น ทั้งในสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่น ผู้ผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในญี่ปุ่นนับเป็นคู่แข่งของ Cray ผู้ผลิตเหล่านี้ผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์ตามแบบของ Cray ในราคาซึ่งถูกกว่า แต่ก็เสียเปรียบในด้านซอฟท์แวร์เพราะพัฒนาได้ช้ากว่า บริษัทเหล่านี้ได้แก่ Fujitsu และ NEC ในสหรัฐอเมริกาเองได้เกิดบริษัทผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์จำนวนมาก เพื่อรองรับงานการคำนวณยิ่งยวดแบบต่างๆ บริษัทชั้นนำเหล่านี้ได้แก่ Intel, Convex, Thinking Machine, n CUBE และ Kendall Square Research

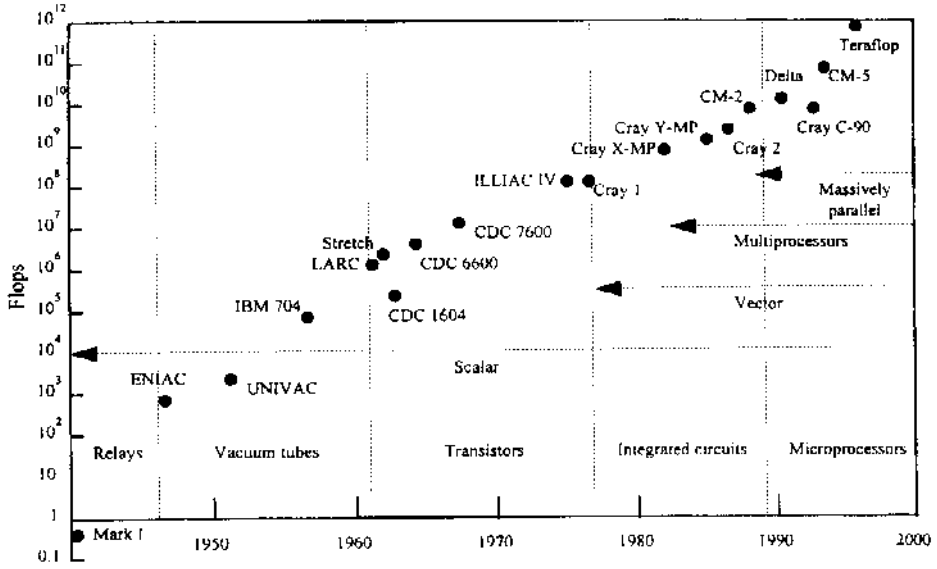
2.3 การวิจัยเพื่อสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์

ในเชิงพาณิชย์แล้ว ซูเปอร์คอมพิวเตอร์จะต้องทำงานได้ดี ใช้ง่าย และสมราคา ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เหล่านี้จึงมักจะถูกสร้างโดยใช้เทคโนโลยีซึ่งคงตัวแล้ว ในทางปฏิบัติคอมพิวเตอร์ซึ่งหาซื้อได้ในท้องตลาดจะอาศัยเทคโนโลยีซึ่งคิดค้นสำเร็จมาแล้วกว่า 3 ถึง 8 ปี ดังนั้นการสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์จึงต้องอาศัยการวิจัยค้นคว้าไปข้างหน้าอีกอย่างน้อยเท่ากับเวลาดังกล่าว ตั้งแต่กลางทศวรรษ 1960 เป็นต้นมา ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงพานิชย์ทั้งหมดล้วนเป็นผลพวงจากโครงการวิจัยซึ่งลงทุนสูง และท้ายที่สุดมักจะเรียกได้ว่าล้มเหลว โดยที่มิได้คำนึงถึงผลกระทบ ซึ่งเกิดตามมาหลายๆ ปีให้หลัง โครงการเหล่านี้มักเกิดขึ้นในรูปแบบของหน่วยงานรัฐให้เงินมหาวิทยาลัย หรือหน่วยงานเอกชนสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์เพื่อทำงานเฉพาะอย่าง การสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์เหล่านี้จึงต้องอาศัยเทคโนโลยีขั้นสูงสุด ซึ่งมักจะอยู่ในสถานะก่อตัว หรือมีแนวโน้มจะเป็นไปได้เท่านั้น ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เหล่านี้มักกลายเป็นตำนาน เพราะบางเครื่องไม่เคยถูกสร้างขึ้นเลย บางเครื่องก็สร้างไม่สำเร็จ บางเครื่องสร้างเสร็จแล้วก็ไม่สามารถใช้งานได้ อย่างไรก็ตามโครงการวิจัยซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ได้สร้างบุคลากรซึ่งมีค่าในการออกแบบซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์ในกาลต่อมา บางคนก็กลายเป็นผู้ใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในการแก้ปัญหา ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่เป็นตำนานเหล่านี้ได้แก่ SOLOMON

(1962), ILLIAC IV (1967), PEPE (1972), BSP (1978), Goodyear STARAN (1979), C.mmp (1978), NYU Ultracomputer (1983), และ Illinois Cedar (1983) เป็นต้น

วิวัฒนาการของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ดังกล่าวมาแล้ว พอจะสรุปได้ดังรูปที่ 1 ตลอดระยะเวลามากกว่า 50 ปีที่ผ่านมาความเร็วของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ได้เพิ่มขึ้นกว่า ล้านๆ เท่า ในยุคก่อนทศวรรษ 1980 ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างมหาศาลสืบเนื่องมาจากเทคโนโลยีเป็นสำคัญ เมื่อเทคโนโลยีใกล้จุดอิ่มตัว ความเร็วของเครื่องจะเพิ่มขึ้นในอัตราส่วนที่ลดลงอย่างเห็นได้ชัด ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่กลางทศวรรษ 1980 เป็นผลจากการปรับสถาปัตยกรรมของเครื่องเป็นแบบหลายหน่วยประมวลผล

ด้านตลาดซูเปอร์คอมพิวเตอร์พอสรุปได้ว่า ก่อนปี 1980 ผู้ใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ก็คือหน่วยงานวิจัยของรัฐ ดังนั้นสถานะการตลาดจึงขึ้นคู่กับงบประมาณของภาครัฐซึ่งมีความไม่แน่นอนสูง ความต้องการใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในภาคเอกชนเริ่มมีมากขึ้นตั้งแต่กลางทศวรรษ 1980 ประกอบกับการสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในเชิงพาณิชย์สามารถทำได้อย่างคุ้มทุน โดยการใช้เทคโนโลยีและสถาปัตยกรรมที่ปรับส่วนได้ (scalable) อย่างไรก็ตามมีผู้ผลิตซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานที่ประสบปัญหาทางด้านการเงินเป็นอย่างมากในปี 1994 เนื่องจากไม่สามารถมียอดขายที่คุ้มทุนได้ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานเหล่านี้มักมีราคาแพงเพราะการออกแบบเฉพาะตัวและขาดซอฟท์แวร์สนับสนุนการทำงาน การใช้งานให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดจึงกระทำได้ยาก



รูปที่ 1 วิวัฒนาการความเร็วของซูเปอร์คอมพิวเตอร์

3. สถาปัตยกรรมซูเปอร์คอมพิวเตอร์

ปัจจัยซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ พอจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ เกิดจากสถาปัตยกรรมของเครื่อง และจากเทคโนโลยีที่ใช้สร้างเครื่อง ความหมายของสถาปัตยกรรม

นั้นหมายถึง การจัดและใช้คงค์ประกอบของระบบคอมพิวเตอร์ เมื่อได้ใช้องค์ประกอบที่ดีที่สุด และจัดให้ทำงานร่วมกันอย่างมีประสิทธิภาพแล้ว เครื่องคอมพิวเตอร์ก็น่าจะทำงานได้เร็วที่สุด สำหรับเทคโนโลยีนั้นหมายถึง วิธีการสร้างและการเลือกวัสดุที่จะใช้สร้างองค์ประกอบของคอมพิวเตอร์ ถ้าได้เลือกเทคโนโลยีซึ่งทันสมัยที่สุด และสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมที่สุด ผลลัพธ์ก็คือ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์

สถาปัตยกรรมซูเปอร์คอมพิวเตอร์พอจะแบ่งได้เป็น 2 ประเภทคือ เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (vector supercomputer) และซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนาน (massively parallel supercomputer) เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์นั้นเป็นแบบที่ใช้กันมาแต่เริ่มแรก ถือเป็นแบบอนุรักษ์นิยม ส่วนซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานนั้น เริ่มผลิตเป็นเชิงพาณิชย์ และเป็นที่นิยมตั้งแต่ปลายทศวรรษ 1980

3.1 เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์

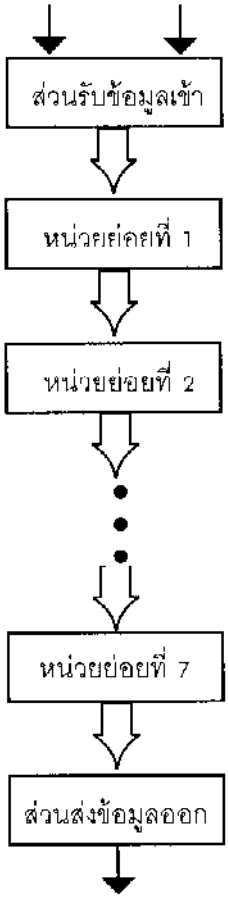
ในงานคำนวณทั่วๆ ไป มักปรากฏการทำงานซ้ำๆ กันในโปรแกรม ดังตัวอย่างโปรแกรมภาษา FORTRAN

```
      DO 10 I = 1,100
      C(I) = A(I)* B(I)
10 CONTINUE
```

โปรแกรมข้างต้นคำนวณผลคูณของแต่ละสมาชิกของแถวลำดับ A และ B แล้วเก็บไว้ที่แถวลำดับ C ในหน่วยประมวลผลกลางการคำนวณจะเกิดขึ้นที่หน่วยปฏิบัติงาน (functional unit) ในกรณีนี้ หน่วยปฏิบัติงานคูณจะทำงาน 3 ขั้นตอนดังรูปที่ 2 สมมุติว่าส่วนรับข้อมูลเข้าใช้เวลา 1 คาบ ส่วนทำการคูณใช้เวลาทำงาน 7 คาบ และส่วนส่งข้อมูลออกใช้เวลาอีก 1 คาบ ดังนั้นการคูณเลข 1 คู่ จึงใช้เวลาทั้งสิ้น 9 คาบ การคูณแถวลำดับขนาด 100 สมาชิกจึงใช้เวลา 900 คาบ การคูณในลักษณะนี้ข้อมูลใหม่จะไม่สามารถเข้าไปในหน่วยปฏิบัติงานได้ ถ้าข้อมูลเก่ายังมิได้ออกจากหน่วยปฏิบัติงาน เราเรียกการทำงานลักษณะนี้ว่า scalar operation

รูปที่ 2 หน่วยปฏิบัติงานคูณ

การเพิ่มประสิทธิภาพทางหนึ่งสำหรับคูณข้างต้นคือ การป้อนข้อมูลเข้าหน่วยปฏิบัติงานได้ก่อนที่ข้อมูลเก่าออกจากหน่วยปฏิบัติงาน การทำงานแบบนี้ทำได้โดยการแบ่งหน่วยปฏิบัติงานเป็นหลายๆ หน่วยย่อย ในตัวอย่างข้างต้นสมมุติว่าเราแบ่งหน่วยปฏิบัติงานคูณเป็น 7 หน่วยย่อย โดยที่แต่ละหน่วยย่อยใช้เวลาทำงาน 1 คาบ หน่วยปฏิบัติการคูณใหม่นี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 3 โครงสร้างใหม่นี้ทำงานคล้ายสายการผลิต (pipeline) ในโรงงานคือ หน่วยย่อยจะทำงานเฉพาะอย่าง ซึ่งเมื่อทำงานเสร็จแล้วก็ส่งให้หน่วยย่อยถัดไป และพร้อมจะรับข้อมูลใหม่ สำหรับตัวอย่างข้างต้น เราสามารถส่งข้อมูลคู่ใหม่เข้าที่หน่วยย่อยที่ 1 ทันทีที่มันทำงานเสร็จ เนื่องจากแต่ละหน่วยย่อยใช้เวลาทำงาน 1 คาบ เราจึงสามารถส่งข้อมูลคู่ใหม่เข้าไปในหน่วยปฏิบัติงานคูณทุกคาบ



รูปที่ 3 สายการผลิตของหน่วยปฏิบัติงานคูณ

เมื่อพิจารณาที่ส่วนส่งข้อมูลออกจะเห็นว่า ผลคูณแรกใช้เวลา 9 คาบ (ส่วนรับข้อมูลเข้า 1 คาบ+หน่วยย่อยเจ็ดหน่วย 7 คาบ+ส่วนส่งข้อมูลออก 1 คาบ) หลังจากนั้นจะมีผลคูณตามออกมาทุกๆ คาบอีก 99 ผลลัพธ์ ดังนั้นเวลาทั้งหมดในการคูณเลข 100 คู่ คือ 9+99 = 108 คาบ ซึ่งทำงานเร็วกว่าเดิมมาก (900/108 ≅ 9 เท่า) วิธีการดังกล่าวเรียกว่า pipelining และเมื่อใช้งานกับข้อมูลที่เป็นแถวลำดับแล้วมักเรียกว่า การประมวลผลแบบ เวคเตอร์ (vector processing)

เครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งทำงานโดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลแบบเวคเตอร์เรียกว่า เวคเตอร์คอมพิวเตอร์ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ในแบบอนุรักษ์นิยมทั่วๆ ไป มักเป็นเวคเตอร์คอมพิวเตอร์ โดยมีหน่วยปฏิบัติงานต่างๆ เช่น การคูณ หาร และการบวก/ลบ เป็นแบบ pipeline ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เหล่านี้ มีหน่วยปฏิบัติงาน pipeline จำนวนมากเช่น เครื่อง Cray 1 (1976) มีหน่วยปฏิบัติงาน 12 หน่วย เครื่อง Fujitger FACOM VP-200 (1986) มี หน่วยปฏิบัติงาน 6 หน่วย โดยปกติซูเปอร์คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะแยกหน่วยปฏิบัติงานสำหรับข้อมูลแบบเวคเตอร์และ scalar ออกจากกัน การทำ pipelining นี้มีใช้ทั่วไปในเครื่องประเภทต่างๆ ตั้งแต่ไมโครคอมพิวเตอร์จนถึงเมนเฟรม ต่างกันที่ว่าคอมพิวเตอร์ทั่วๆ ไปทำงานเฉพาะในแบบ scalar เท่านั้น

ในทางทฤษฎีประสิทธิภาพสูงสุดของ pipeline ขึ้นตรงต่อจำนวนหน่วยย่อยของมัน แต่ในทางปฏิบัติจำนวนหน่วยย่อยจะมีได้ไม่มากนักเนื่องจากเหตุ 2 ประการ ประการแรก ในสายการคำนวณซึ่งใช้ข้อมูลจำนวนมาก มักเกิดเหตุการณ์ข้อมูลขึ้นแก่กัน (data dependency) กล่าวคือการคำนวณบางอันต้องอาศัยผลลัพธ์จากการคำนวณก่อนหน้านี้ ถ้าทั้ง 2 การคำนวณนี้อยู่ใน pipeline การคำนวณหนึ่งจะดำเนินต่อไม่ได้ เพราะต้องรอผลลัพธ์จากการคำนวณอีกอันหนึ่ง ผลก็คือหน่วยควบคุม (control unit) ไม่สามารถป้อนข้อมูลใหม่ลงใน pipeline ได้ ประสิทธิภาพของ pipeline ก็จะลดลง

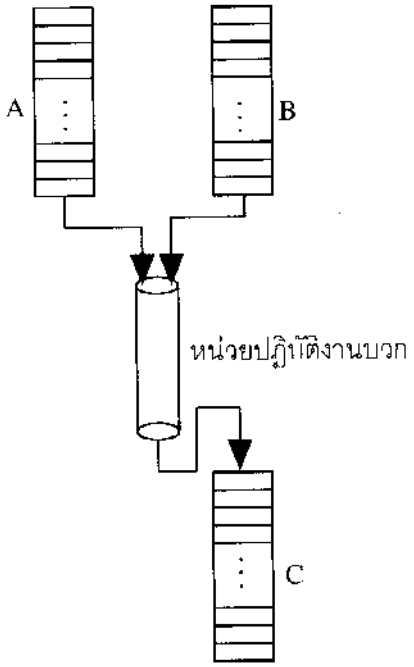
ประการที่สองหน่วยประมวลผลมักมีความสามารถจำกัดในการนำ (fetch) และถอดรหัสคำสั่ง (decode) ข้อจำกัดนี้มีสาเหตุเช่นเดียวกับที่กล่าวแล้วคือ การขึ้นอยู่แก่กันของข้อมูลและสายการควบคุม (data and control dependency)

เพื่อลดปัญหาการนำและถอดรหัสคำสั่งข้างต้น ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ต่างจากคอมพิวเตอร์อื่นๆ ตรงที่มีคำสั่งประเภทเวคเตอร์ สำหรับประมวลผลข้อมูลครั้งละเป็นจำนวนมาก คำสั่งเวคเตอร์แต่ละคำสั่งจะมีความสามารถเท่ากับชุดคำสั่งในวงวน (loop) ทั้งหมด ดังนั้นการดำเนินการหนึ่งคำสั่งจึงต้องการข้อมูลจำนวนมาก เพื่อป้อนเข้าใน pipeline อย่างไม่ขาดสาย แหล่งของข้อมูลเหล่านี้ ใช้ในการจำแนกเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เป็น 2 ประเภทคือ memory-memory เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ และ vector-register เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์

คำสั่งของ memory-memory เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์จะกระทำกับข้อมูลซึ่งอยู่ในหน่วยความจำหลักเท่านั้น ส่วนคำสั่งของ vector-register เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์จะกระทำกับข้อมูลซึ่งอยู่ในรีจีสเตอร์ ปัจจุบันเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เกือบทั้งหมดเป็นแบบ vector-register เนื่องจากเทคโนโลยีและการออกแบบรีจีสเตอร์มีความง่ายและประสิทธิภาพสูงกว่าของหน่วยความจำหลัก

รีจีสเตอร์ของ vector-register เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เรียกว่า เวคเตอร์รีจีสเตอร์ ซึ่งใช้เก็บข้อมูลแบบแถวลำดับได้ เวคเตอร์รีจีสเตอร์แต่ละตัวประกอบด้วยรีจีสเตอร์ย่อยหลายตัว การคำนวณด้วยเวคเตอร์รีจีสเตอร์ เป็นผลให้เกิดการส่งข้อมูลจากรีจีสเตอร์ย่อยเข้าสู่หน่วย

ปฏิบัติงานอย่างต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ถ้า A,B และ C เป็นเวคเตอร์รีจีสเตอร์แล้ว คำสั่ง A=B+C จะก่อให้เกิดผลดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 การทำงานของเวคเตอร์รีจีสเตอร์

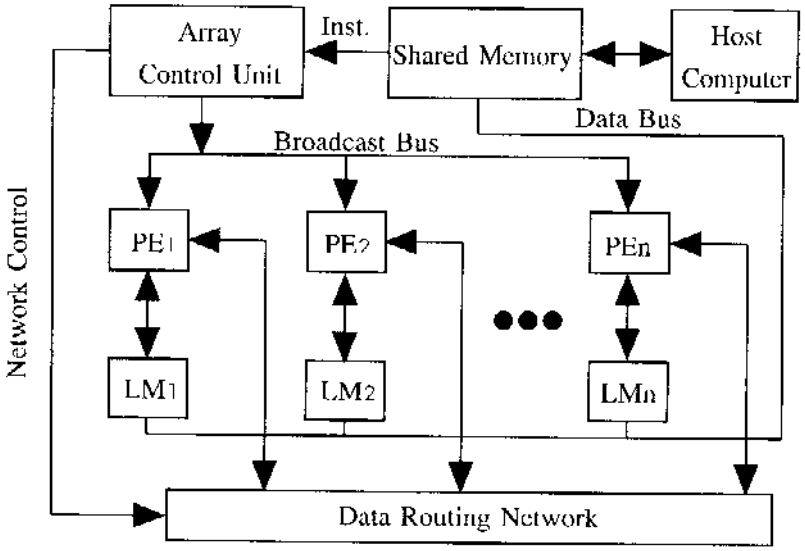
3.2 ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนาน

ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนาน ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลจำนวนมาก (ใกล้ๆ 100 ตัวถึงมากกว่าพันตัว) ซึ่งอาจทำงานร่วมกันเป็นจังหวะ หรือเป็นอิสระจากกันก็ได้ แนวคิดการสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานนี้ มีมาตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1960 ในบทความ "The SOLOMON Computer" ซึ่งนำเสนอโดย D.L. Slotnick ซึ่งอธิบายระบบคอมพิวเตอร์ที่ประกอบด้วยหน่วยประมวลผล 1024 ตัวต่อกันเป็นระนาบ 2 มิติ ขนาด 32x32 โดยที่แต่ละหน่วยประมวลผลมีหน่วยความจำหลักของตัวเอง งานวิจัยและสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานนี้ ดำเนินเรื่อยมาจนถึงต้นทศวรรษ 1980 เครื่องที่มีชื่อเสียงได้แก่ ILLIAC IV, Burroughs PEPE และ Goodyear Aerospace STARAN เครื่องเหล่านี้ล้วนมีจุดมุ่งหมายการทำงานเฉพาะอย่างและมีความซับซ้อนมากในการสร้าง จึงปรากฏเฉพาะต้นแบบและไม่คุ้มต่อการสร้างในเชิงพาณิชย์

ในราวกลางทศวรรษ 1980 เมื่อเทคโนโลยีด้านไมโครโปรเซสเซอร์ และ VLSI ก้าวหน้าในระดับคงตัวแล้ว จึงมีการสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานเชิงพาณิชย์ขึ้น หลักการก็คือการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์เป็นร้อยหรือเป็นพันตัวขึ้นไปมาต่อกันเป็นระบบ ความสามารถในการ

คำนวณเมื่อคิดรวมทุกไมโครโปรเซสเซอร์แล้วจะมีสูงมาก[1] ผลก็คือ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งมีกำลังการคำนวณสูงทัดเทียมหรือมากกว่าเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ แต่มีราคาถูกกว่าถึง 10 เท่าหรือกว่านั้น ตัวอย่างซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานเชิงพาณิชย์ได้แก่ ICL DAP (1979), NCUBE/10(1985) Connection Machine CM-2(1987), Intel iPSC/860 และ Kendall Square KSRI (1992)

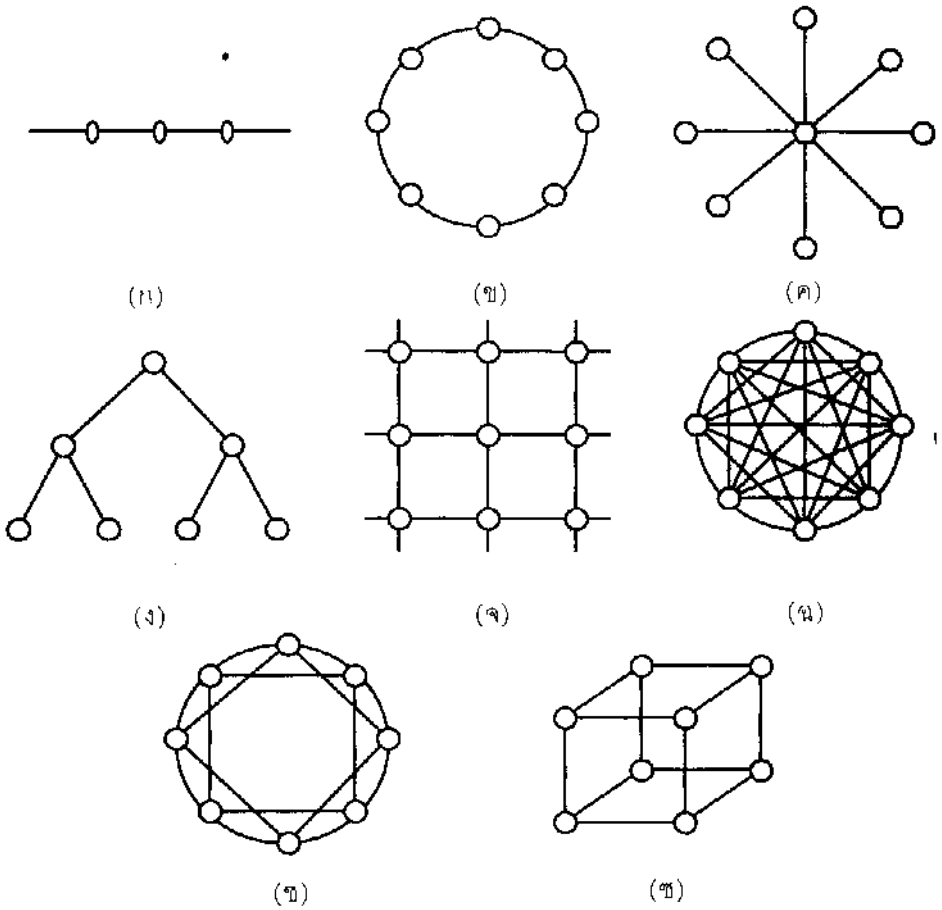
ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานนี้แบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะการทำงานคือ แบบที่มีหน่วยควบคุม (Control unit) เดียวสำหรับควบคุมหน่วยประมวลผลทุกตัว ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบนี้จะทำงานแบบ SIMD (Single Instruction Stream Multiple Data Stream) รูปที่ 5 แสดงโครงสร้างของซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานแบบหน่วยควบคุมเดียว ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบนี้มักจะมีคอมพิวเตอร์ส่วนหน้า (front end หรือ host computer) ซึ่งทำหน้าที่ติดต่อกับโลกภายนอกในการพัฒนาโปรแกรม เมื่อต้องการใช้งานทั้งโปรแกรมและข้อมูลจะถูกถ่ายไปยังหน่วยความจำรวม (shared memory) หน่วยควบคุมของซูเปอร์คอมพิวเตอร์จะเริ่มอ่านและปฏิบัติการคำสั่ง ซึ่งงานขั้นแรกก็คือการส่งข้อมูลที่หน่วยประมวลผล (Processing Element หรือ PE) แต่ละตัวต้องใช้ในการคำนวณ ไปยังหน่วยความจำ (Local Memory หรือ LM) ของหน่วยประมวลนั้นๆ ขั้นต่อมาหน่วยควบคุมจะปฏิบัติงานคำสั่งซึ่งยังผลให้หน่วยประมวลผลทุกตัวทำงานเหมือนกันไปพร้อมๆ กันกับข้อมูลส่วนตัวนั้น



รูปที่ 5 โครงสร้างทั่วไปของซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานแบบ SIMD

[1] ถ้าไมโครโปรเซสเซอร์ 1 ตัว มีความสามารถ 1 Mflops การใช้ไมโครโปรเซสเซอร์นี้ 1 พันตัวมาประกอบกันจะทำให้มีความสามารถทำงานได้ถึง 1 Gflops

ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ประเภทที่ 2 คือ แบบที่หน่วยประมวลผลทุกตัวมีหน่วยควบคุมของตัวเอง ซึ่งทำงานแบบ MIMD (Multiple Instruction Stream Multiple Data Stream) ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานประเภทนี้ จะมีหน่วยความจำของแต่ละหน่วยประมวลผล การอ้างอิงข้อมูลมักกระทำได้เฉพาะในหน่วยความจำส่วนตัวนี้เท่านั้น ถ้าต้องการเข้าถึงข้อมูลของหน่วยประมวลผลอื่น ต้องใช้วิธีส่งข้อความถึงกัน (message passing) การทำงานประสานกันของหน่วยประมวลผลต้องอาศัยกลไกการส่งข้อความนี้เช่นกัน



รูปที่ 6 ข่ายหน่วยประมวลผลพื้นฐาน

(ก) linear array (ข) ring (ค) star (ง) tree (จ) near-neighbor mesh

(ฉ) completely connected (ช) chordal ring (ซ) 3 cube

ความจริงแล้วเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ส่วนมาก ก็สามารถทำงานในแบบ MIMD ได้ แต่มักอ้างอิงข้อมูลในหน่วยความจำหลักร่วมกัน (shared memory) โดยที่แต่ละหน่วยประมวลผลอาจมีหน่วยความจำส่วนตัวอยู่แล้ว ดังนั้นถ้าได้พิจารณาอย่างละเอียดจะเห็นว่า

การแบ่งซูเปอร์คอมพิวเตอร์เป็น 2 ประเภท ก็มิใช่ว่าจะแบ่งแยกกันได้โดยเด็ดขาด ในทางปฏิบัติ เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แม้จะมีหลายหน่วยประมวลผลแต่ก็มีไม่มากคือ อยู่ระหว่าง 2 ถึง 16 หน่วยประมวลผล แต่ถ้าเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานแล้ว จะมีหน่วยประมวลผลเป็นร้อยตัวขึ้นไป

ในซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานซึ่งประกอบด้วยหน่วยประมวลผลจำนวนมาก ปัญหาหนึ่งซึ่งสำคัญคือ วิธีการต่อหน่วยประมวลผลเหล่านี้เข้าด้วยกันเป็นระบบเดียว รูปแบบของข่ายหน่วยประมวลผลนี้ ต้องมีคุณสมบัติที่ดีคือ เชื่อถือได้ (reliable) ประหยัด (cost effective) มีความอ่อนตัว (flexible) และปรับตัวได้ (scalable) รูปแบบข่ายหน่วยประมวลผลพื้นฐานแบบต่างๆ ได้ แสดงในรูปที่ 6

ข่ายหน่วยประมวลผลเหล่านี้ มีคุณสมบัติข้างต้นไม่เหมือนกัน และเหมาะสมกับงานชนิดต่างๆ กัน ดังนั้นจึงได้มีความพยายามสร้างข่ายหน่วยประมวลผล ซึ่งมีข่ายหน่วยประมวลผลพื้นฐานซ่อนตัวอยู่หลายชนิด เพื่อรวมคุณสมบัติที่ดี และเหมาะกับงานหลายประเภท

3.2.1 แนวความคิดการทำงานแบบมหาขนาน

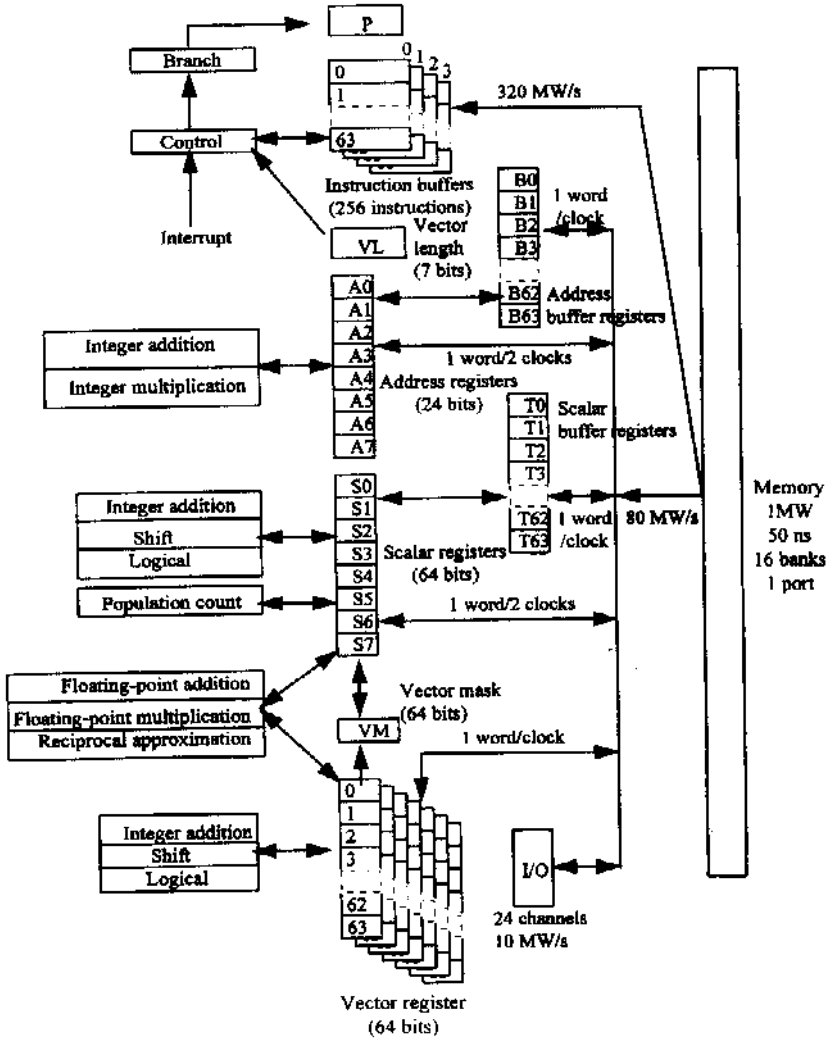
ผู้ออกแบบซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนาน ต้องหาจุดสมดุลย์ระหว่างการทำงานของหน่วยประมวลผล และการทำงานของข่ายที่ติดต่อหน่วยประมวลผลเหล่านี้ สำหรับงานๆ หนึ่ง ซึ่งต้องอาศัยการคำนวณยิ่งยวดแล้ว ถ้าได้ทำงานบนหน่วยประมวลผลเดียวที่เร็วอย่างไม่มีขีดจำกัดย่อมเป็นวิธีที่ดีที่สุด อย่างไรก็ตามหน่วยประมวลผลเดียวที่สร้างได้ย่อมมีความเร็วระดับหนึ่ง ซึ่งไม่เพียงพอต่อการคำนวณยิ่งยวด ดังนั้นการแบ่งงานการคำนวณไปดำเนินการในหลายหน่วยประมวลผล จึงเป็นวิธีเดียวที่จะรองรับงานการคำนวณยิ่งยวดได้ เนื่องจากการคำนวณนี้เกี่ยวเนื่องเป็นงานเดียว จึงต้องอาศัยข้อมูลร่วมกันอยู่บ้างไม่มากก็น้อย การแบ่งการคำนวณเป็นงานย่อย จึงต้องเสียเวลาเพิ่มขึ้นในแง่การติดต่อประสานงานของหน่วยประมวลผล เพื่อให้การทำงานโดยรวมดำเนินไปอย่างเป็นระบบและถูกต้อง

ดังนั้นความเหมาะสมที่จะใช้เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ (หน่วยประมวลผลเดียว) หรือซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนาน จึงสามารถมองได้จากแง่ที่ว่า เวลาซึ่งประหยัดได้จากการที่ให้หลายหน่วยประมวลผลช่วยกันทำงาน จะคุ้มกับเวลาที่หน่วยประมวลผลเหล่านั้นต้องเสียไปในการประสานงานกันหรือไม่ อย่างไรก็ตามยังมีมุมมองอื่นๆ อีกซึ่งต้องพิจารณาความเหมาะสมด้วยคือ ความยากในการเขียนโปรแกรม ความยากในการสร้างตัวแปลภาษา และความยากในการสร้างระบบคอมพิวเตอร์

3.3 ตัวอย่างซูเปอร์คอมพิวเตอร์

เมื่อกล่าวถึงเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ ทุกคนมักนึกถึง Cray เป็นลำดับแรก เพราะเครื่อง Cray ถือเป็นแม่แบบของเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์เชิงพาณิชย์เกือบทั้งหมด

ในปัจจุบัน เวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตคร์ของ Cray ทุกเครื่องมีโครงสร้างพื้นฐานมาจากเครื่อง Cray 1 ซึ่งเป็นเครื่องรุ่นแรกในปี 1976 ความสามารถที่เพิ่มขึ้นของเครื่องรุ่นใหม่มักเกิดจากการใช้เทคโนโลยีใหม่ล่าสุด การเพิ่มหน่วยประมวลผล และประสิทธิภาพของซอฟท์แวร์



รูปที่ 7 โครงสร้างของ Cray 1

รูปที่ 7 แสดงโครงสร้างของเครื่องเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ Cray 1 ขนาดหน่วยความจำหลักของ Cray 1 มีได้สูงถึง 1 Mword โดยที่ 1 word มีความยาว 64 บิท หน่วยความจำหลักนี้มี cycle time 50 ns และจัดเป็น 16 หน่วยย่อย (bank) ซึ่งทำงานพร้อมกันได้ ความเร็ว clock ของ Cray 1 คือ 12.5 ns (80 Mhz.) ดังนั้นการเข้าถึงหน่วยความจำหลักแต่ละหน่วยย่อยจึงต้องรอ 4 clocks การจัดหน่วยความจำหลักเป็น 16 หน่วยย่อย ทำให้

สามารถเข้าถึงหน่วยความจำได้ทุก ๆ clock ตราบใดที่มิใช่หน่วยย่อยเดียวกัน เทคนิคการแบ่งหน่วยความจำหลักเป็นหน่วยย่อยซึ่งทำงานเป็นอิสระจากกันนี้เรียกว่า interleaving หน่วยความจำหลักของ Cray 1 จึงมีความเร็ว 320 Mword ต่อวินาที (16 words ทุก ๆ 50 ns)

การส่งข้อมูลระหว่างหน่วยความจำหลักและรีจีสเตอร์ กระทำได้ 1 word ทุก ๆ clock ดังนั้นความเร็วที่ใช้ในการส่งข้อมูลนี้จึงมีค่า 80 Mword ต่อวินาที ความสามารถที่เหลือจาก 320 Mword ต่อวินาทีถูกใช้ในการส่งคำสั่งเข้าประมวลผล เมื่อคำนึงเฉพาะการทำงานแบบเวคเตอร์ Cray 1 มี 1 pipeline สำหรับทำการคูณ และ 1 pipeline สำหรับทำการบวก (หรือลบ) แต่ละ pipeline สามารถส่งผลลัพธ์ได้สูงถึง 1 ผลลัพธ์ทุก ๆ clock รวมเป็น 2 ผลลัพธ์ทุก ๆ clock หรือ 160 Mflops[2] การคำนวณแต่ละครั้งต้องการข้อมูล 3 ตัว (ตัวตั้ง ตัวคูณหรือตัวบวก และผลลัพธ์) ดังนั้น pipeline ทั้งสองจึงต้องการข้อมูล 3x160=480 Mword ต่อวินาที ซึ่งเกินกว่าที่หน่วยความจำหลักจะส่งให้ได้ ข้อผิดพลาดในการออกแบบนี้ได้ถูกแก้ไขใน Cray รุ่นต่อมา

ระบบรีจีสเตอร์ของ Cray 1 ประกอบด้วย 8 รีจีสเตอร์สำหรับประมวลผลที่อยู่หน่วยความจำ (A0-A7) 8 รีจีสเตอร์สำหรับประมวลผลข้อมูลทั่วไป (S0 S7) และ 8 เวคเตอร์รีจีสเตอร์ซึ่งแต่ละตัวเก็บข้อมูลได้ถึง 64 ตัว นอกจากนี้ยังมีรีจีสเตอร์ที่เป็นที่พักข้อมูล (B0-B64 และ T0-T63) และรีจีสเตอร์พิเศษซึ่งใช้ควบคุมการทำงานของหน่วยประมวลผล (VL และ VM)

หน่วยประมวลผลของ Cray 1 ประกอบด้วย 12 หน่วยปฏิบัติการซึ่งแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือกลุ่มประมวลผลที่อยู่หน่วยความจำ (2 หน่วยปฏิบัติการ) กลุ่มประมวลผลข้อมูลทั่วไป (4 หน่วยปฏิบัติการ) กลุ่มประมวลผลเลขอิงดัชนี (3 หน่วยปฏิบัติการ) และกลุ่มประมวลผลเวคเตอร์ (3 หน่วยปฏิบัติการ) แต่ละหน่วยปฏิบัติการถูกสร้างเป็น pipeline และทำงานด้วย clock ความเร็ว 80 Mhz.

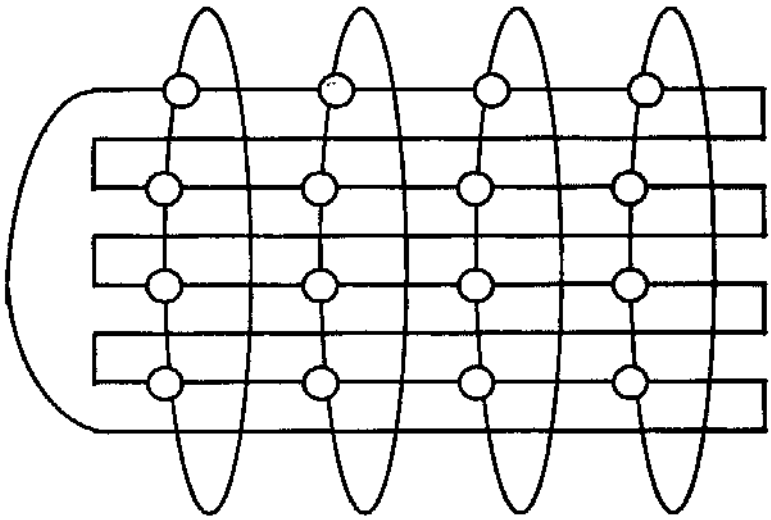
ซูเปอร์คอมพิวเตอร์แบบมหาขนานที่มีชื่อเสียงมากเครื่องหนึ่งคือ ILLIAC IV ซึ่งถูกสร้างในราวกลางทศวรรษ 1960 และเสร็จสิ้นในราวต้นทศวรรษ 1970 โครงการ ILLIAC IV ถือเป็นโครงการที่ล้มเหลวเมื่อพิจารณาในแง่เงินลงทุนและการใช้งาน แต่ผลพลอยได้ของโครงการได้นำไปสู่ความรู้ทั้งทางด้านเทคโนโลยีและโครงสร้างคอมพิวเตอร์ที่ประเมินค่ามิได้ ILLIAC IV ได้กลายเป็นแม่แบบของซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานแบบหน่วยควบคุมเดียวในกาลต่อมา

---

[2] 1Mflops หมายถึงการคำนวณแบบเลขอิงดัชนี (floating-point) 1 ล้านการคำนวณต่อวินาที การคำนวณนี้หมายถึงการบวก (ลบ) หรือคูณเลขอิงดัชนี 1 คู่

รูปที่ 8 แสดงโครงข่ายการต่อหน่วยประมวลผลของ ILLIAC IV แบบย่อส่วน (16 หน่วยประมวลผล) ILLIAC IV แบบเต็มรูปแบบประกอบด้วย 256 หน่วยประมวลผล และ 4 หน่วยควบคุม โดยแบ่งเป็น 4 quadrant เมื่อทำการสร้างจริงปัญหาด้านการเงินและเงื่อนเวลาทำให้สามารถสร้างได้เพียง 1 quadrant ความสามารถของ ILLIAC IV เมื่อสร้างเต็มรูปแบบจะทำงานได้เร็วถึง 1 Gflops

โครงข่ายของ ILLIAC IV เป็นแบบตาข่าย 2 มิติ (2-D mesh) แต่ละหน่วยประมวลผลมีหน่วยความจำส่วนตัว การทำงานของระบบจะเป็นจังหวะตามการควบคุมของหน่วยควบคุมเดียว หน่วยควบคุมสามารถสั่งให้หน่วยประมวลผลบางตัวหรือทุกตัวทำงานไปพร้อม ๆ กันได้ การทำงานนี้ได้แก่การคำนวณ หรือการส่งข้อมูลไปสู่หน่วยประมวลผลรอบข้าง

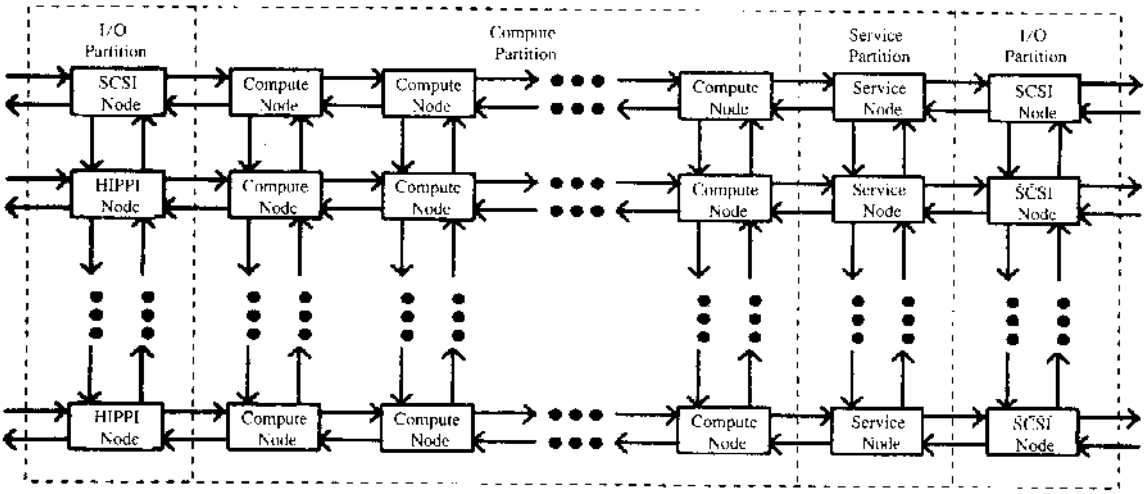


รูปที่ 8 โครงข่ายของ ILLIAC IV

รูปที่ 9 แสดงสถาปัตยกรรมของระบบ Intel Paragon (1991) ซึ่งเป็นซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานแบบ MIMD หน่วยประมวลผลมีการต่อกันแบบตาข่าย 2 มิติ ซึ่งเหมาะกับการคำนวณทางเมตริกส์ หน่วยประมวลผลเหล่านี้สามารถทำงานเป็นอิสระ การติดต่อประสานงานกันทำได้โดยการส่งข้อความ หน่วยประมวลผลแต่ละตัวใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ Intel i860XP ระบบ Intel Paragon มีประสิทธิภาพได้สูงถึง 300 Gflops และมีขนาดหน่วยความจำได้ถึง 8.8 Gbytes

ปัญหาของซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานทั่วไปคือ การนำข้อมูลเข้าสู่ระบบ และการกระจายข้อมูลเหล่านั้นไปยังหน่วยประมวลผลต่าง ๆ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์มหาขนานส่วนมากจึงจำเป็นต้องมีระบบคอมพิวเตอร์ส่วนหน้า (front-end หรือ host) เพื่อทำหน้าที่นี้ สำหรับระบบ Intel Paragon ไม่มีคอมพิวเตอร์ส่วนหน้า เพราะได้กำหนดให้หน่วยประมวลผลบางตัวทำหน้าที่

ดังกล่าว จากรูปที่ 9 จะเห็นว่าได้มีการแบ่งหน่วยประมวลผลเป็นส่วน (partition) คือ ส่วนนำข้อมูลเข้าออก (I/O partition) ส่วนทำการคำนวณ (compute partition) และส่วนบริการ (service partition) ส่วนนำข้อมูลเข้าออกจะอยู่ที่ขอบซ้ายและขวา เพื่อติดต่อกับโลกภายนอกด้วยวิธีการต่างๆ กัน เช่น SCSI HIPPI และ VME ส่วนนำข้อมูลเข้าออกนี้มีความเร็วรวมถึง 48 Mbytes ต่อวินาที สำหรับส่วนบริการนั้นทำหน้าที่วินิจฉัยการทำงานของระบบ และดูแลการลอดขวาง (diagnosis และ interrupt)



รูปที่ 9 สถาปัตยกรรมของระบบ Intel Paragon

4. การคำนวณยิ่งยวด

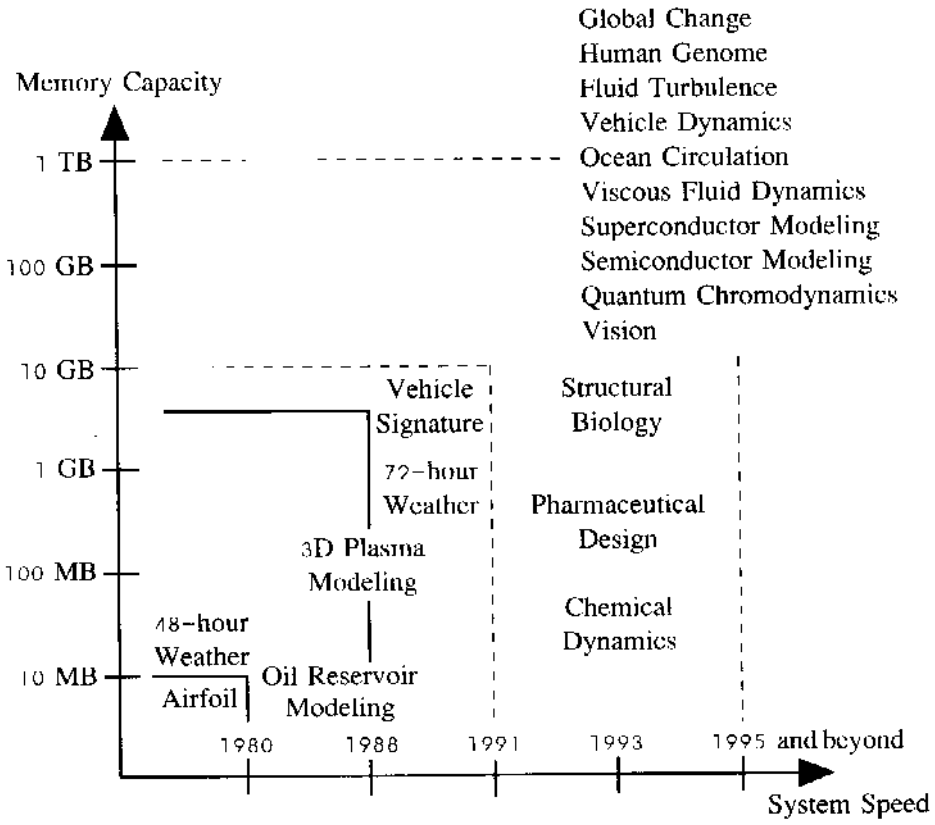
ในบรรดาโปรแกรมซึ่งทำงานบนระบบคอมพิวเตอร์ เราสามารถจำแนกลักษณะการทำงานได้เป็นประเภทที่เน้นการส่งข้อมูลเข้าและออกจากระบบ (I/O intensive) และประเภทที่เน้นการใช้หน่วยประมวลผล (computing intensive) สำหรับคำว่าการคำนวณยิ่งยวด (supercomputing) นั้น ใช้กับงานซึ่งต้องอาศัยหน่วยประมวลผลทำงานมาก และอาจต้องอาศัยข้อมูลมากด้วย เพราะการคำนวณนี้จะสูงเกินกว่าที่คอมพิวเตอร์ทั่วๆ ไปจะรองรับได้ ตัวอย่างเช่น การพยากรณ์อากาศในอีก 24 ชั่วโมงข้างหน้า ถ้าต้องใช้เวลาคำนวณนานถึง 30 ชั่วโมงบนเมนเฟรม ผลลัพธ์ที่ได้มาไม่ว่าจะแม่นยำเพียงใดก็คงนำมาใช้ประโยชน์ไม่ทันกาล งานการคำนวณยิ่งยวดส่วนมากมักต้องอาศัยข้อมูลปริมาณมากด้วย ข้อมูลเหล่านี้จึงต้องอยู่ในหน่วยความจำหลักเพื่อขจัดปัญหาการนำข้อมูลเข้าและออกจากอุปกรณ์รอบข้าง ระบบซึ่งใช้รองรับงานการคำนวณยิ่งยวดก็คือ ซูเปอร์คอมพิวเตอร์นั่นเอง

งานการคำนวณยิ่งยวดส่วนมากมักเป็นการจำลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมตามธรรมชาติของปรากฏการณ์ต่างๆ ทั้งในระดับใหญ่เช่น ปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ จนถึงระดับเล็กมาก เช่นปรากฏการณ์ทางอะตอมมิก ปรากฏการณ์เหล่านี้จะดำเนินการอย่างต่อเนื่องตามเวลาที่ผ่านไป

โดยปกติการทำงานของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับงานการจำลองจะเป็นแบบดิจิตอล ซึ่งมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นจึงมีการคิดค้นวิธีการจำลองแบบไม่ต่อเนื่อง (discrete simulation) เพื่อศึกษาปรากฏการณ์แบบต่อเนื่อง

ในการศึกษาความเป็นไปของธรรมชาติ มนุษย์ได้ค้นพบปรากฏการณ์ 2 แบบคือ ในระดับมหภาค และในระดับจุลภาค ในระดับมหภาคความเป็นไปของสสารและพลังงานสามารถอธิบายได้ด้วยกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน กฎการอนุรักษ์ของมวล พลังงาน และโมเมนตัม กฎแรงโน้มถ่วง และกฎแม่เหล็กไฟฟ้า กฎเหล่านี้สามารถใช้อธิบายตำแหน่งและความเร็วของอนุภาคเดี่ยว หรืออนุภาคซึ่งประกอบกันเป็นของเหลวหรือก๊าซ กฎในระดับมหภาคนี้ไม่สามารถใช้อธิบายปรากฏการณ์ในระดับจุลภาคหรือระดับอะตอมได้เลย ในหลายทศวรรษที่ผ่านมามนุษย์ได้พัฒนากฎเกณฑ์ขึ้นใหม่ เพื่อใช้ในระดับจุลภาค โดยเฉพาะศาสตร์ใหม่นี้ มีชื่อว่า กลศาสตร์ควอนตัม (Quantum Mechanics)

กฎเกณฑ์ทางกลศาสตร์ควอนตัม ได้ผนวกผลของความไม่แน่นอนลงในสมการด้วยค่าหรือคุณสมบัติต่างๆ ในระดับจุลภาค ปรากฏการณ์ในระดับนี้จึงต้องผูกกับความน่าจะเป็นไปได้ด้วย ธรรมชาติได้สอนให้เราทราบว่า ไม่มีทางที่จะทราบค่าหรือคุณสมบัติทั้งหมดได้อย่างเที่ยงตรงและแม่นยำ ณ เวลาใดเวลาหนึ่งได้



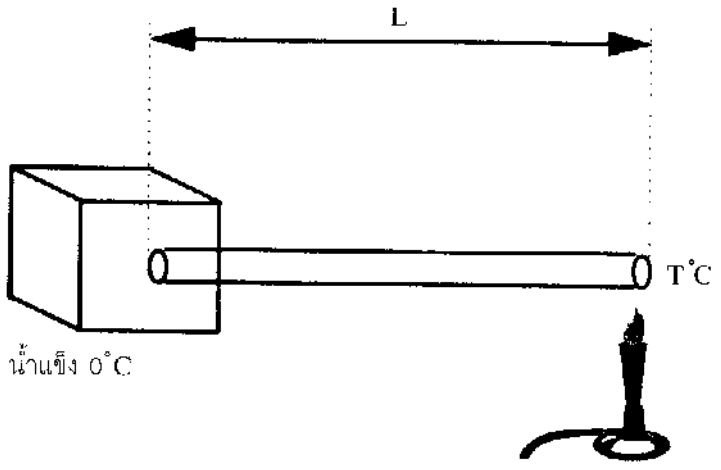
รูปที่ 10 งานที่ท้าทายต่อซูเปอร์คอมพิวเตอร์

การคำนวณยิ่งยวดข้างต้นนับเป็นงานที่ท้าทาย ซึ่งต้องอาศัยกำลังการคำนวณอย่างมหาศาล นักวิทยาศาสตร์และวิศวกรคอมพิวเตอร์มีเป้าหมายที่จะสร้างซูเปอร์คอมพิวเตอร์ซึ่งมีความเร็ว 1 Tflops หน่วยความจำหลักขนาด 1 Tbytes และการรับส่งข้อมูลได้ 1 Tbytes ต่อวินาทีให้ได้ ก่อนก้าวเข้าสู่ศตวรรษที่ 21 เป้าหมายดังกล่าวเรียกว่า *3T performance* รูปที่ 10 แสดงงานการคำนวณยิ่งยวด ซึ่งเห็นได้ชัดว่ายังมีงานอีกจำนวนมากซึ่งรอซูเปอร์คอมพิวเตอร์อยู่

4.1 วิธีสำหรับปรากฏการณ์มหภาค

เทคนิคซึ่งนักวิทยาศาสตร์พัฒนาขึ้นมาสำหรับงานการคำนวณยิ่งยวดมีอยู่ 3 วิธี คือ วิธี finite differencing วิธี finite element และวิธี particle หลักการใหญ่ก็คือการแปลงสมการซึ่งเกี่ยวพันกับตัวแปรต่อเนื่อง ให้เป็นสมการพีชคณิตซึ่งใช้ตัวแปรไม่ต่อเนื่อง สมการพีชคณิตเหล่านี้มักเป็นสมการที่ไม่ซับซ้อนคือ มีเฉพาะการบวก ลบ คูณ และหาร เท่านั้น แต่มีจำนวนสมการมาก (อาจจะเป็นชุดสมการหลายๆ แสน ถึงหลายๆ ล้านสมการ) หน้าที่หลักของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ก็คือ การแก้ชุดสมการนี้ในแต่ละช่วงเวลาที่ผ่านไป แต่ละช่วงเวลานี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของปรากฏการณ์ ขนาดของชุดสมการและความละเอียดของช่วงเวลาจะเป็นตัวบ่งชี้คุณภาพของแบบจำลองว่าใกล้เคียงปรากฏการณ์จริงเพียงไร

สมมุติว่าเราต้องการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของแท่งวัตถุ ซึ่งปลายข้างหนึ่งฝังอยู่ในน้ำแข็ง และปลายอีกข้างหนึ่งถูกเผาไฟจนร้อนดังรูปที่ 11

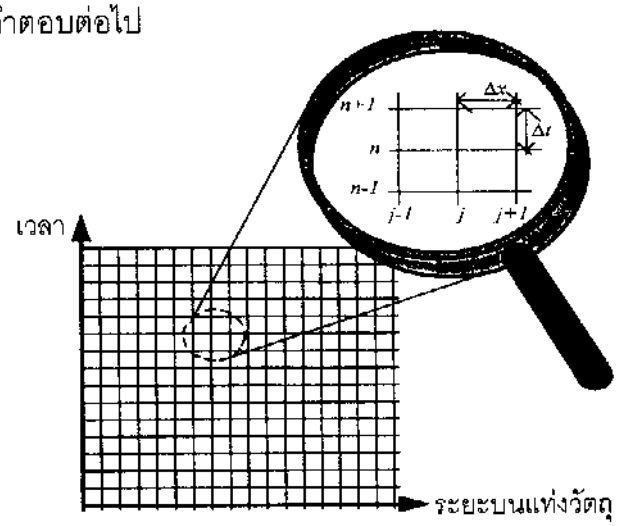


รูปที่ 11 การกระจายความร้อนในแท่งวัตถุ

ถ้าใช้วิธี finite differencing เราจะแบ่งแท่งวัตถุตามแกนนอนเป็นกริดระยะห่างเท่าๆ กัน สมมาตรเริ่มต้นที่ทราบก็คือ อุณหภูมิ ณ ปลายทั้ง 2 ข้าง และอุณหภูมิ ณ จุดต่างๆ ของกริด (อาจสมมุติว่าอุณหภูมิแปรเป็นเชิงเส้นระหว่างปลายที่มีอุณหภูมิต่ำไปสู่ปลายที่มีอุณหภูมิสูง)

การจำลองการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิก็คือ การสร้างสมการพีชคณิต ณ จุดกริดต่างๆ ซึ่งอธิบายอุณหภูมิใหม่ ในรูปของอุณหภูมิเก่า และคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนจากจุดกริดรอบข้าง คอมพิวเตอร์สามารถคำนวณค่าอุณหภูมิ ณ เวลาต่อๆ ไปได้โดยอาศัยแบบดังรูปที่ 12

วิธี finite elements มีหลักการคล้ายคลึงกับวิธี finite differencing เพียงแต่ทำการแบ่งกริดอย่างไม่สม่ำเสมอเท่านั้น วัตถุตามธรรมชาติมักมีรูปร่างต่างจากทรงเรขาคณิตทั่วไป ดังนั้นการแบ่งกริดบนผิววัตถุเหล่านี้ จึงทำได้เพียงแค่ให้เป็นวัตถุรูปทรงง่ายขึ้น แต่ทุกชิ้นย่อยไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน (เช่น เป็นสามเหลี่ยมบ้าง สี่เหลี่ยมบ้าง) วิธี finite elements จะหาสมการพีชคณิตซึ่งใช้สำหรับชิ้นย่อย เมื่อแก้สมการสำหรับชิ้นย่อยแล้ว จึงนำคำตอบมาประกอบในสมการระบบเพื่อหาคำตอบต่อไป



รูปที่ 12 การดำเนินไปของแบบจำลอง

สำหรับวิธี particle นั้น ใช้สำหรับศึกษาปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับเทหวัตถุจำนวนมาก แม้ว่ากฎเรื่องแรงโน้มถ่วงจะมีความชัดเจนในการคำนวณอยู่แล้ว แต่ก็ไม่สามารถใช้คำนวณเพื่อจำลองระบบกาแล็กซี่ ซึ่งประกอบด้วยดวงดาวเป็นล้านๆ ดวงได้ เพราะจำนวนสมการที่ต้องแก้ในหนึ่งช่วงเวลามีประมาณ N^2 สมการ เมื่อ N เป็นจำนวนดวงดาว ในราวกลางทศวรรษ 1980 นักวิทยาศาสตร์ได้พัฒนาวิธี particle ซึ่งสามารถใช้จำลองปรากฏการณ์ทางดาราศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4.2 วิธีสำหรับปรากฏการณ์จุลภาค

ความเข้าใจปรากฏการณ์ระดับจุลภาค (ระดับอะตอม) เริ่มก่อตัวอย่างมีหลักการในราวต้นศตวรรษที่ 20 นักวิทยาศาสตร์ได้ค้นพบว่า กฎเกณฑ์ซึ่งใช้ในระดับมหภาคไม่สามารถใช้ได้ในระดับอะตอม เพราะสสารมีพฤติกรรมทั้งแบบอนุภาคและคลื่น สาขาวิชากลศาสตร์ควอนตัมได้เกิดขึ้นเพื่อศึกษาปรากฏการณ์จุลภาคเหล่านี้ หัวใจของทฤษฎีควอนตัมคือ สมการ

Schrödinger คำตอบของสมการดังกล่าวเรียกว่า wave function ข้อมูลที่บรรจุอยู่ใน wave function สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของสสารในระดับอะตอมได้ การแก้สมการ Schrödinger จึงเป็นกุญแจสำคัญในการเข้าใจโครงสร้าง คุณสมบัติ และปฏิกิริยาเคมีของสารต่างๆ

ความซับซ้อนอีกประการหนึ่งของปรากฏการณ์ระดับจุลภาคคือ อนุภาคที่ประกอบกันเป็นอะตอม มิได้มีลักษณะเป็นชิ้นวัตถุซึ่งสามารถระบุตำแหน่งใน 3 มิติได้ wave function จะอธิบายความน่าจะเป็นที่จะพบอนุภาคเหล่านั้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ดังนั้นค่าที่คำนวณได้จึงมีมากมายมหาศาลตามตำแหน่งใน 3 มิติ ซึ่งทำให้ต้องใช้หน่วยความจำมากกว่าการจำลองในระดับมหภาคมาก ประมาณกันว่า wave function สำหรับศึกษาอะตอมของธาตุนีออน 1 อะตอม ต้องใช้เนื้อที่สำหรับกริด 10^{60} จุด ดังนั้นการจำลองในระดับจุลภาคจึงเป็นงานที่ต้องศึกษาอีกมากโดยใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์

5. สรุป

พัฒนาการของซูเปอร์คอมพิวเตอร์และการคำนวณยิ่งยวด เป็นไปอย่างรวดเร็ว เพื่อสนองความต้องการของมนุษย์ในการศึกษาปรากฏการณ์ธรรมชาติ และนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ปัจจุบันการประยุกต์ใช้ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ มีอยู่ในทุกสาขาวิชาตั้งแต่ ฟิสิกส์ เคมี ชีววิทยา ดาราศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ เศรษฐศาสตร์ จุฬกศาสตร์ และอื่นๆ อีกมาก ซูเปอร์คอมพิวเตอร์มีบทบาทสำคัญในการคิดค้นยารักษาโรค ออกแบบยานพาหนะ พยากรณ์อากาศ แม้กระทั่งการสร้างภาพยนตร์

บทความที่นำเสนอนี้เป็นเพียงจุดเริ่มต้น ซึ่งอธิบายพัฒนาการของซูเปอร์คอมพิวเตอร์และการคำนวณยิ่งยวด ในช่วง 3 ทศวรรษที่ผ่านมาซูเปอร์คอมพิวเตอร์ก้าวจากความเร็ว Mflops ไปสู่ Gflops และ Tflops ซึ่งก็ยังไม่เพียงพอต่องานการคำนวณยิ่งยวด ผู้สนใจสามารถศึกษาพื้นฐานเพิ่มเติมได้จากเอกสารอ้างอิงดังนี้ สำหรับประวัติของซูเปอร์คอมพิวเตอร์ [5] [8] [9] และ [13] มีรายละเอียดซึ่งไม่ซ้ำกันอยู่ ผู้อ่านสามารถศึกษาและประติดประต่อเรื่องได้เอง ในเรื่องสถาปัตยกรรมคอมพิวเตอร์ [6] และ [7] เป็นจุดเริ่มต้นที่ดีและใช้เป็นตำราทั่วไปในระดับมหาวิทยาลัย ส่วน [5] นั้นมีรายละเอียดของซูเปอร์คอมพิวเตอร์เฉพาะเครื่องในยุคต้นทศวรรษ 1980 และ [11] แสดงรายละเอียดของซูเปอร์คอมพิวเตอร์เฉพาะเครื่องในยุคต่อมา พัฒนาการด้านงานวิจัย และเทคโนโลยีสามารถค้นคว้าได้จาก [1] และ [10] ในเรื่องตัวแปลภาษาสำหรับเวคเตอร์ซูเปอร์คอมพิวเตอร์ [14] อธิบายทฤษฎีที่อยู่เบื้องหลัง แง่มุมอื่นๆ ของซูเปอร์คอมพิวเตอร์สามารถศึกษาได้จาก [8] [4] และ [12] ส่วนทิศทางของซูเปอร์คอมพิวเตอร์นั้น [2] ในแง่คิดที่ดี และคงใช้เป็นแนวได้จนถึงศตวรรษหน้า สำหรับผู้อ่านซึ่งสนใจการประยุกต์ใช้งานซูเปอร์คอมพิวเตอร์ [8] เป็นหนังสือที่ดีมาก เพราะอธิบายเทคนิคที่ซับซ้อนในเรื่องการคำนวณยิ่งยวดอย่างง่ายๆ และมีรูปประกอบสวยงาม

เอกสารอ้างอิง

[1] D.P. Agrawal, "Tutorial Advanced Computer Architecture," IEEE Computer Society Press, ISBN 0-8186-0667-3

[2] G. Bell, J. Cownie, S. Wallach, และ I. Wladawsky-Berger, "Visions," IEEE Parallel & Distributed Technology, Vol. 2, No. 3, 1994

[3] L.A. Crowl, "How to Measure, Present, and Compare Parallel Performance, "IEEE Parallel & Distributed Technology, Vol. 2, No. 1, 1994

[4] M. Furtney, และ G. Taylor, "Of Workstations & Supercomputer," IEEE Spectrum, May 1993

[5] R.W. Hockney, และ C.R.Jesshope, "Parallel Computers, Architecture, Programming and Algorithms," Adam Hilger Ltd., Bristol, 1981

[6] K. Hwang และ F.A. Briggs, "Computer Architecture and Parallel Processing," McGraw-Hill, Inc., 1984

[7] K. Hwang, "Advanced Computer Architecture: Parallelism, Scalability, Programmability," McGraw-Hill, Inc., 1993

[8] W.J. Kaufmann III, และ L.L. Smarr, "Supercomputing and the Transformation of Science," Scientific American Library, 1993

[9] D.J.Kuck, "The Structure of Computers and Computations, Volume One," John Wiley & Sons, 1978

[10] R.H. Kuhn, และ D.A. Padua, "Tutorial on Parallel Processing," IEEE Computer Society Press, ISBN 0-9196-0367-4

[11] C. Lazou, "Supercomputers and their Use," Revised Edition, Clarendon Press, Oxford, 1988

[12] J. Miguel del Rosario, และ A.N. Choudhary, "High-Performance I/O for Massively Parallel Computers: Problems and Prospects," IEEE Computer, March 1994

[13] M.R. Williams, "A History of Computing Technology," Prentice-Hall, Inc., 1985

[14] M. Wolfe, "Automatic Vectorization, Data Dependence, and Optimizations for Parallel Computers," บทความใน "Parallel Processing for Supercomputers and Artificial Intelligence," รวบรวมโดย K.Hwang, และ D.Degroot, McGraw-Hill, Inc., 1989