

piše: Zorislav Šojat,
vanjski suradnik RC-a



Nanoračunarstvo i prirodno distribuirani paralelizam

Ne bi bilo pretjerano smjelo tvrditi da u kompjutoristici već poneko vrijeme više gledamo u postignuto, i samo na tome, ponekad i nekritično, gradimo svoje vizije, nego li što gledamo u ono što

dolazi, našom voljom i željom, ili po prirodi stvari. Gotovo zdravo za gotovo mnogi ljudi, pa i stručnjaci, uzimaju vrtoglavu brzinu porasta snage računanja, veličine raznih vrsta strojnoga pamćenja i opće brzine obrade osnovnih strojnih naredbi. Programe svih vrsta i za sve namjene to, poneki bolje, poneki lošije, obilno iskorištavaju. Kakvoća prikaza i brzina obrade veoma složenih problema postaje dostupna za prikaz mnogih kompleksnih procesa u stvarnome vremenu. I budućnost, sa sve bržim, boljim i sposobnijim strojevima, izgleda sve bliže i bliže, i mnogima podpunno izvjesno.

Ipak, često nas naše zadovoljstvo postignutim dovodi i do neugodnih prepreka na putu. Nama suvremeni, gotovo isključivi, pristup pisanju programa za strojeve jest uporaba jednostaznoga Turingova stroja, tj. uporaba strojnih naredbi koja slijede jedna za drugom, a obrađuju podatke isto tako, jedan za drugim. Takav ustroj stroja četveroslovnom se engleskom kraticom zove SISD, 'Single Instruction, Single Data', "Jedna naredba, jedan podatak". Takav pristup izradi procesnih jedinica dovodi do potrebe da se ukupnost svih radnji koje stroj mora obaviti da bi se primjerice neka obrada izvela, te prikazala na monitoru (uključujući, dakako, i oslikavanje svake pojedine točkice na ekranu), izvodi u jednome jedinome pažljivo isprepletenom nizu naredbi, a svaka naredba izvodi jednu i samo jednu (veoma elementarnu) unarnu ili binarnu (veoma rijetko plenarniju) operaciju na podatku. Uobičajeno se to svodi na pribrajanje, množenje s dva i ispitivanje jednakosti, te varijacije tih operacija.

Da bismo postigli dovoljne brzine obrade potrebite za takav pristup izvođenju svih, od najosnovnijih do najsloženijih, poslova, brzina se obradnih podsustava iz godine u godinu naglo povećava. Dok je još od sredine 70-tih pa sve do početka 80-tih godina prošloga stoljeća bilo potpuno prihvatljivo imati SISD procesor s brzinom izvedbe od 2 do 16 mikrosekundi po naredbi, s taktnom frekvencijom od 1 MHz, početkom ovoga tisućljeća taktne se frekvencije uobičajenih prihvatljivih strojeva kreću već i do 2,5 GHz i više. To znači da bi procesor iste arhitekture iz zadnje četvrtine prošloga stoljeća sada izvodio, s taktnom frekvencijom od 2 GHz, instrukcije u roku od 1 do 8 nanosekundi, tj. 2×10^3 brže (dvije tisuće puta brže).

Već gotovo cijelo jedno stoljeće svijet poznaje brzinu svjetlosti kao gornji limes brzine ijedne materijalne čestice, kako je to

lijepo Einstein uobličio u svojoj teoriji relativnosti. Ta brzina, koju rabimo kao kućnu riječ kada svjetlosnom brzinom nešto obavimo, ali i kao važnu mjernu jedinicu u proučavanju svemira, nevjerojatnih je 300.000 kilometara u samo jednoj sekundi. Ekvator svjetlost obiđe odprilike punih 7 i po puta u samo jednoj sekundi, do našega Mjeseca treba joj prosječno jedna sekunda, do dalekoga Sunca poprilično manje od desetak minuta. A koliko li ta ista "svjetlost" prijeđe za vrijeme izvođenje jednoga (punovalnoga) takta od 2GHz? Zastrašujuće malo - svega 15 centimetara!

Na naše veliko zaprepaštenje iz gornjega proizlazi da smo u manje od tridesetak godina kraja prošloga stoljeća ubrzali ritam rada naših uobičajenih strojeva za 2000 puta, a ubrzanje od još samo 15 (!) puta, dakle ubrzanje od samo 0.75% u odnosu na tridesetogodišnje postignuto ubrzanje, dovodi nas do situacije da svjetlost, tj. signal unutar procesora u idealnoj situaciji, prijeđe svega 1 cm. To se događa na 30 GHz taktne frekvencije. Ni to nije tako strašno, ali suvremeni su procesori uistinu veličine veće od 1 cm s kraja na kraj.

12. lipnja 2002. u časopisu Nature objavljen je niz članaka s rezultatima istraživanja koja su omogućila izvedbu jednoatomske i dvoatomske tranzistora. Iako u ovome trenutku, kako se napominje u jednom od članaka iz tog broja časopisa, jednoatomske i jednomolekularne tranzistori nisu rivali silicijevim tranzistorima, razvoj je njihove primjene na pragu ulaska kroz velika vrata.

Dakako i jednoatomske i jednomolekularne tranzistori moraju imati ulazno/izlazne mogućnosti povezivanja sa svojom sudjelujućom okolinom, te njihova uporaba zahtijeva njihovu specifičnu prostornu povezanost (za sada preko zlatnih sondi, a u budućnosti i atomskim provodnicima) s ostatkom pomoću njih projektiranoga uređaja. Gore navedeni jednoatomske tranzistori sastoji se, primjerice, od atoma kobalta okruženoga atomima ugljika i vodika, vezanih na okupu pyridinom.

Možemo reći da je red veličine jezgre atoma 10^{-15} metara, a cijeloga atoma oko 10^{-11} . Zaokruživši, možemo uzeti da bi trebalo negdje dvije stotine milijuna atoma jedan do drugoga za nanožicu od jednoga centimetra. Koliko ćemo se atomskim i molekularnim nanotranzistorima približiti prirodnim granicama brzine obrade teško je uistinu predvidjeti, jer mjesta za ubrzanje potpuno novim pristupima uistinu ima, posebice izradom više ne plošno, već prostorno raspoređenih komponenti obradnih i drugih mikro- (tj. nano-) jedinica. Dakako pri tome se javljaju svi mogući problemi, od zagrijavanja pa sve do problema potrebnoga prostora za organizaciju atomskih ili molekularnih tranzistora u uređaj koji nešto radi, a da pri tome nipošto ne zaboravimo da se logička vrata bilo koje vrsti u kompjutorskome procesoru ne mogu izvesti jednom komponentom. No također je važno sjetiti se da i idealan atomski kompjutor mora na neki način komunicirati sa svojom okolinom, prvenstveno sa svojom memorijom. 256 MB (tj. 268.435.456 Byte-a) memori-

je početkom ovoga tisućljeća nije mnogo niti za kućni stroj. Kada bi svaki atom gore navedene veličine mogao preuzeti ulogu jednoga tranzistora, s izravnim međuvezama, a za pamćenja samo jednoga bita potrebna su najmanje dva (uobičajeni flip/flop s križnim povezivanjem), za pamćenje tih 256MB bila bi potrebna količina atoma koja bi se poredala u niz dugačak čak 16 cm. Čitaoc će sam uvidjeti u kakvim se problemima kompjutoristika nalazi početkom 21. tisućljeća.

Potpuno drukčiji pristup pojmu obrade obavijesti postoji u tzv. "kvantnih kompjutora". Kvantni kompjutori, koji se početkom ovoga tisućljeća počinju pojavljivati u laboratorijima eksperimentalnih fizičara, no ne kao oruđe, već kao izum, uistinu preskaču velik dijapazon ideja klasične kompjutoristike, uistinu zasnivajući svoju moć na preciznoj kontroli pojedinih spinova. S toga razloga i naziv kvantni kompjutor. Već i u samome načinu zapisa postoji osnovna bitna razlika. Kvantni kompjutori ne rade s bitovima, dakle dvojičanim oznakama, 0 ili 1, + ili -, već s tzv. qubitima, tj. "quantum bit"-ovima, koji su posebni po tome što osim očitih položaja za 0 i 1, tj. + i -, imaju čitav beskonačan niz međustanja.

Još je 1972. Feynman rekao da je vjerojatno pravilan način obrade mnoštva podataka iz kvantne mehanike, obrada u stroju koji se i sam ponaša po tim istim načelima. Kako je područje kvantnoga računanja u potpunosti u začetku, ne samo postojanjem strojeva, već i samim svojim principima, jer radi se o procesiranju zasnovanome na međuodnosima beskonačnih brojeva mogućih stanja pojedinih memorijskih jedinki, čime se uistinu ti kompjutori svrstavaju u, mogli bismo reći, digitalizirane analogne kompjutore, broj je razvijenih algoritama koji daju upotrebljive rezultate izuzetno ograničen, a jedan od najvažnijih programa je program izračunavanja najmanjega zajedničkoga nazivnika. Interesantno je primijetiti da za već postojeće algoritme proračuni ne traju vremenski eksponencijalno, već polinomno.

I kamo dalje?

Prije nego li pokušamo odgovoriti na jedan od mogućih načina na ovo vječno pitanje, ovdje i sada vezano na mogućnosti obrade, te unosa i vizualizacije sve veće količine podataka, sa sve složenijim matematičkim proračunima, kako se znanje o finesama postojanja ovakovoga materijalnoga svijeta sve više produbljuje, sjetimo se mozga.

Ovaj začudan organ omogućuje takove mogućnosti obrade podataka svih vrsta, od abstrakcije, asocijacije, stvaranja i primjene prediktivnosti modela u obliku intencije, pa sve do savršene koordinacije vida, sluha i pokreta, kakove si mogućnosti u kompjutera još dugo ne možemo niti izdaleka zamisliti, uz sav naš najbolji trud. Pri tome ovdje govorimo uistinu samo o "čistim" obradnim mogućnostima mozga. Da se lakše shvati sva kompleksnost proračuna koji se u, primjerice ljudskome mozgu odvijaju, samo je potrebno zamisliti uobičajenu situaciju s prometnicom, koja se, uz statistički izuzetno malu količinu (nažalost često fatalnih) grešaka, odvija na mirijadama cesta u cijelome svijetu svakoga dana već stotinjak godina. To je običan čin pretjecanja. U trenutku donošenja odluke o pretjecanju (zamislimo uvjete ravne prometnice sa sporijim vozilom ispred i nadolazećim vozilom iz daljine), na moždanim je procesima da na temelju brzine povećanja veličine dolazećega vozila, na temelju odnosa brzine vlastitoga vozila i vozila ispred njega (koja se načelno procjenjuje brzinom promjene veličine vozila ispred), zvuka vlastitoga motora i drugih podataka o njegovoj trenutačnoj sposobnosti razvijanja ubrzanja, znanja o voznim karakteristikama svoga vozila, udaljenosti dolazećega

vozila, te mnoštva drugih važnih čimbenika, poput stanja kolnika, širine, vidljivosti za sve sudionike itd., odlučuje u veoma kratkome vremenu o mogućnosti da vlastito vozilo uđe u svoj trak prije nego se zatvori prostor prolaza. Uz to treba paziti i na druge sudionike u prometu, ispred i iza u istom, te u suprotnom smjeru, kao i o vjerojatnostima pojave nepredviđenih okolnosti. Pokušamo li taj izuzetno kompleksni proračun već i samo uobičajenim metodama sekvencijalizirati za programiranje kompjutora, naići ćemo na nevjerovatne poteškoće složenosti toga projekta. Brzina obrade istih podataka (oko, uho, ruka u odgovarajućoj strojnoj inačici) za takovu odluku u tako kompleksnome programu na 2 GHz kompjutoru nije vrijedna spomena, posebice zato što se radi o naučenim i samoučećim procesima.

I sve to mozak radi s živčanim stanicama koje nisu pretjerano sretne ako moraju raditi na taktnoj frekvenciji većoj od stotinjak herza (najveće vrijednosti uzastopnoga pobuđivanja pojedinoga neurona su oko 170 Hz, ali mnogi se procesi u mozgu sinkroniziraju na mnogo rjeđe, sve do svega desetak herza). 2 GHz je 2×10^7 puta brže od 100 Hz.

U čemu je tajna? Tajna je u paralelnoj i istovremenoj obradi, te pravilnoj raspodjeli podataka, podobradnih elemenata i sinkronizaciji prikupljanja polu-produkata sporih ali mnogih neovisnih pod-obrađa.

Učeći na tim iskustvima došlo se do ideje o uporabi mnoštva kompjutora međusobno komunikacijski povezanih, koji zajedničkim paralelnim radom rješavaju isti, distribuirani problem, pri čemu svaka ta obradna jedinica radi samo jednu n-tinu cjelokupnoga posla, te se raznim sinkronizacijskim metodama ishodi tih obrada skupljaju u jedan rezultat. Takva nakupina kompjutora za paralelno procesiranje uobičajeno se naziva grozdom, u engleskome "cluster".

Posebice se paralelizacija obrade lako primjenjuje na zadatke koji su ili matematički predstavljeni vektorima, matricama i poljima, ili čiji se algoritamski obradni niz može lako dekomponirati u neovisne sastavne komponente, ili koji po svojoj prirodi ne stavljaju ograničenje na veliku količinu međusobnih podobradnih međuveza. Programi za vizualizaciju veoma se često izuzetno lako, ili barem ne pretjerano teško, prilagođuju paralelnome procesiranju.

No, iako se uistinu i bez pretjerivanja, iz svih gore navedenih razloga, nalazimo na bitnoj prekretnici u ovoj novoj, ali izuzetno važnoj i brzoučećoj grani znanosti, još uvijek ne postoji pravilno znanje za čak niti zadovoljavajuće opće programirne jezike za paralelnu obradu, kao što su to primjerice Fortran, Lisp, Pascal, Ada, Smalltalk i drugi pogodni za razne serijske algoritme. Od programirnih jezika za paralelno procesiranje koji će svakako prije ili kasnije zauzeti časno mjesto pionira, izdvajamo jezike ORCA i OCCAM (veoma zanimljiv jezik vezan uz "transpjutore"). Od starih programirnih jezika treba svakako izdvojiti APL i J Kenetha Iversona, koji su, po svojoj prirodi, matematički, te se samim time posebice odlikuju mogućnošću paralelne implementacije algoritama matematičkih modela.

Drugim riječima rečeno, jedno od područja "spasa" jest svakako paralelna obrada podataka u grozdovima. Za zagovarati je svakako posebice razvoj znanja o mogućnostima paraleliziranja, posebice automatskoga, pojedinih algoritama i postupaka, no velik će se napor na početku ovoga tisućljeća u kompjutoristici morati svakako usmjeriti na istraživanje i pronalaženje osnovnih načela koja omogućuju raspasčanu obradu, na zamisao principa i izradu odgovarajućih programirnih jezika koji

omogućuju čovjeku-programeru izricanje njegovih zahtjeva na način dovoljno mu razumljiv, te na izradu radnih sustava dovoljno stabilnih i praktičnih da bi se mogla iskoristiti snaga svakoga pojedinoga grozda.

Dakako da kod povezivanja pojedinih kompjutora u grozd nema nikakvoga razloga ne povezati strojeve iz raznih generacija i raznih arhitektura. Takav heterogeni grozd omogućuje uporabu posebnih sposobnosti pojedinih strojeva, ali mu je mana da svaka skupina istovjetnih strojeva obrađuje zadatak različitom brzinom. Stoga se u posljednje vrijeme grozdovi projektiraju tako da im je relativna razlika brzina pojedinih strojeva mala.

Koliko god se mi trudili algoritme držati brzo izvedivima, potrebe suvremene znanosti, sa svojim sve složenijim i preciznijim modelima pojava koje istražuju, zahtijevaju sve jače mogućnosti obrade. Taj se problem rješava povezivanjem pojedinih, već samih po sebi moćnih grozdova, u široko raspačanu rešetku (koja se po engleskome naziva grid), u kojoj se kroz Internet, ili pak WAN (Wide Area Network), obrada pojedinoga problema upućuje na u tome trenutku najsposobniji grozd za tu obradu, ili se obrađuje istovremeno na više grozdova. Ta se rešetka, grid, poput grozda, treba vidjeti u istome smislu kao i sâm grozd, samo što su njoj obradne jedinice pojedini grozdovi, a grozdu pojedini kompjutori. Načelno su svi principi primijenjeni na stvaranje grozda izravno primijenljivi, na slijedećoj razini, i na grid.

Bitna je razlika između grozda podjednakih strojeva i grida samo u širokome spektru odnosa brzina međusobne komunikacije i čiste obradne snage pojedinih procesnih elemenata (kod grozda pojedinih kompjutora, kod grida pojedinih grozdova).

Kako je već spomenuto, kvantno je računanje, nažalost, u još ranoj fazi razvoja, jer još nije poznato niti koju je vrstu algoritama uopće moguće zamisliti, budući da je načelno istraženo i ostvareno svega nekoliko uistinu jednostavnih postupnika, tj. algoritama. Pa ipak, upravo mogućnost da se u stvarnome svijetu stalno nazočne analogne pojave, koje se u digitalnim kompjutorima moraju uzorkovati određenom grubošču, kvantnim računarom mogu ispravno predstaviti, te da je sama osnova dobivanja rezultata zasnovana na, uvjetno rečeno, bezvremenskoj komunikaciji kroz međusobne kvantno-mehaničke odnose pojedinih spinova, daje mnogo razloga da znakovito i s nadom gledamo i sudjelujemo u razvoju ovoga potpuno novoga polja načela obrade podataka.

Nažalost na svijetu, u suvremenosti početka ovoga tisućljeća

postoji svega na prste jedne do dvije ruke prebrojivih mjesta gdje je trenutačno moguće fizički ostvariti kvantne kompjutore, koji se kreću od jedno-qubitnih do nekoliko-qubitnih obradnika (tj. procesnih jedinica)

No ono što je uistinu utješno, te daje velike mogućnosti daljnje razvoja u tome smjeru, jest da su načela kvantne mehanike i funkcioniranja kvantnih kompjutora dovoljno dobro poznata, te je već do sada izrađen veći broj simulatora i emulatora kvantnih kompjutora, nego li ima samih fizičkih strojeva.¹ Upravo se u ovome otvara izuzetna mogućnost uporabe grozdova i gridova, jer je procesiranje svakoga pojedinoga qubita u emulaciji moguće izvoditi, uz pravilno i dobro programiranje samoga emulatora, na po jednome ili više strojeva u grozdu, ili na po jednome ili više grozdova u rešetki, tj. u gridu. Postoji nada da ćemo upravo ovim smjerom istraživanja riješiti neke od bitnih prepreka koje nam postavlja naše sadašnje znanje iz područja obrade informacija, a koje su, nažalost, često perpetuirane nezanimanjem i predrasudama.

Mnogi podatci govore u prilog tvrdnji da početkom trećega tisućljeća prošlostoljetni pristup kompjutoristici uskoro više neće moći pratiti potrebe novih korisnika, posebice znanstvenika. Očito je da strateško ulaganje u razvoj prvo grozdova, a onda još i više gridova, koji imaju tu prednost nad grozdovima da se u njih, osim procesnih clustera, mogu uvezivati i pojedinačni strojevi, kompjutori, mjerni instrumenti, eksperimentalna aparatura, izvedbeni i proizvodni alatni strojevi i dr., predstavlja izravno ulaganje u blisko predstojeću budućnost. Krajem 20. stoljeća premalo se ulagalo u razvoj znanja o paralelnoj obradi, jer se, naivno, činilo da je jednostavno von Neumanovsko računanje dovoljno snažna pokretačka snaga za sve izazove. Nažalost, ili na sreću, taj se pristup pokazao nedostatnim. Stoga je početkom 3. tisućljeća uistinu potrebno usmjeriti sve svoje snage u ostvarivanje međusobnoga uvezivanja što većega mogućega broja raznih grozdova i individualnih uređaja u jedinstveni grid, jer će budućnost cjelokupnoga daljnje znanstveno-tehničkoga razvoja čovječanstva ovisiti upravo o tim strateškim smjernicama, o nanoračunarstvu - kvantnome i klasičnome - i o uporabi prirodno distribuiranoga paralelizma obrade.

Stoga je za napredak znanosti i tehnike, te time cjelokupnoga čovječanstva, prijeko potrebno uvidjeti stratešku važnost usmjerenja i ulaganja u fundamentalni i aplicirani razvoj grozdova, a posebice i naročito gridova.

(Članak je objavljen u izvornom obliku na zahtjev autora)

¹ Samo kao moguća početna referenca je primjerice <http://www.dcs.ex.ac.uk/~jwallace/qcandqal.htm>, koja, za sada, daje pregled većine istraživanja kvantnoga računanja.

nastavak sa str. 17



jenosa podataka od 11 Mbit/s, uz donju graničnu brzinu prijenosa od 6 Mbit/s pri izlaznoj snazi od 50 mW. Osim mikrovalne veze u skoroj budućnosti predviđen je prelazak na lasersku vezu koja se razvija u Institutu Ruđer Bošković.

Ostvareni učinci

Korištenje slobodnih resursa za stvaranje farme klastera uz odgovarajući posrednik (middleware) predstavlja grid sustav (virtualno klaster superračunalo). On pre-

dstavlja višestruko koristan i zanimljiv razvoj primjene nove arhitekture i integracije klaster računala. Na taj način se domaća tehnologija izgradnje klaster računala, koja je razvijena u Institutu primjenjuje na neiskorištenim resursima i ostvaruje se veliko virtualno superračunalo. Tako se razvija mrežno dohvatljiv i djeljiv računalni resurs i nova usluga na visokoj tehnološkoj razini uz male materijalne troškove.