

Az idő szerepe a természet- és a számítástudományban

The role of time in science and in computer science

VÉGH János
MTA doktora, egyetemi tanár

Kalimános BT, Debrecen, 4032 Vegh.Janos@gmail.com

ABSTRACT

Till the beginning of the past century, classic science considered only instant interactions, i.e., laws of nature did not depend on time. Introducing time to science led to the birth of series of “modern sciences”, including special theory of relativity. In modern processors the speed of signal processing approached the speed of light: its logical states depend on the place and time of their evaluation, even within a processing step. Time receives a similar role in computing: transforms the “classic computing” to “modern computing”.

Keywords: temporal logic; temporal behavior in computing; modern computing; modern science; role of time in science

KIVONAT

Az előző évszázad elejéig, a klasszikus természettudomány úgy tekintette, hogy a kölcsönhatások pillanatszerűek, azaz az idő nem játszik bennük szerepet. Az idő bevezetése a fizikába a “modern fizika”, egyebek között: a speciális relativitáselmélet megszületéséhez vezetett. Modern számítógépeinkben a jelek feldolgozásának sebessége már közel került a fény sebességéhez: a logikai állapotok helytől és időtől függenek egy feldolgozási lépés során. Az idő a számítástudományban is hasonló szerephez jut: az időfüggő logika bevezetése átalakítja modernné a klasszikus számítástudományt.

Kulcsszavak: idő-függő logika; idő-függő viselkedés a számítástudományban; modern számítástudomány; modern fizika; az idő szerepe a fizikában

BEVEZETÉS

A tudomány lényegéhez tartozik, hogy tapasztalatainkat mind pontosabb közelítés formájában fogalmazzuk meg, és megtaláljuk a megfelelő matematikai leírási módot. A klasszikus természettudomány nagyon messzire jutott azzal a feltételezéssel, hogy a kölcsönhatások végtelenül nagy sebességgel terjednek. Bár már Galilei feltételezte (és elég pontosan meg is mérte), hogy a fény sebessége nem végtelenül nagy, egészen száz év ellőttig nem feltételeztük, hogy ennek gyakorlati következményei is lesznek. Tapasztalataink bővítésével olyan jelenségekre is bukkantunk, amelyeket csak azzal a feltételezéssel lehetett megérteni, hogy a fénysebesség egyúttal olyan határsebesség, amely a “modern fizika” diszciplínák megszületéséhez vezetett.

Amikor a tudomány elemeivel ismerkedünk, tudomásul vesszük, hogy a megdörzsölt szigetelő golyócska *azonnal* hatást gyakorol a hozzá közel álló elektrométer szalagocskáira. Később megtanuljuk, hogy az elektromágneses hullámok, töltések mozgásakor keletkeznek, és véges terjedési sebességgel rendelkeznek. Még akár azt is kiszámítjuk, hogy mekkora frekvenciával kell mozgatni a golyócskát, hogy adott hullámhosszú elektromágneses hullámot állítsunk elő; az viszont fel sem merül, hogy megmérjük, hogy az így előállított hullámnak mekkora a terjedési sebessége. Emiatt azt a kérdést sem tesszük fel, hogy akkor a golyócska mozgása hullámmozgás kezdeményezését jelenti-e, tehát vélhetően *nem azonnal* gyakorol hatást az elektrométer

szalagocskáira. Pedig van sebessége, csak az az idő, amennyi idő alatt a hatás eljut a másik objektumig, annyira kicsi emberi érzékszerveink felbontási idejéhez képest, hogy évszázadokig jól megvöltünk azzal a feltételezéssel, hogy a kölcsönhatás azonnali.

Éppen napjainkban zajlik a következő pontosítás: a gravitációs kölcsönhatás olyan gyenge, hogy közvetlenül kísérletezni (szerencsére) nem tudunk vele. Napjainkra sikerült olyan észlelési módszereket fejleszteni, hogy legalább távoli (nagyon nagy) tömegmozgatásokat észre tudjunk venni. Ha a távoli tömeg elég nagy, ÉS a mozgatás eléggé gyors, ÉS a kölcsönhatás nem azonnali, ÉS nagyon jó érzékenységgel tudunk mérni, akkor annak hatását ki tudjuk mutatni. Mind az elektromos, mint a gravitációs hullámok terjedése rámutatott arra, hogy a kölcsönhatások terjedési sebessége véges, aminek “forradalmi” kihatása van tudományos ismereteinkre.

Gyalogos tempónkhoz képest ugyan sokkal gyorsabb a személygépkocsi, sokáig mégsem gondoltunk arra, hogy a relativitáselméletet mindennapjainkban használni fogjuk, amikor ezzel közlekedünk. Pedig ma ezt tesszük: a GPS-alapú helymeghatározás nem működne, ha műholdjaink nem végeznék el azt az apró korrekciót, ami a fénysebesség határjellege, és a folyamatosan nagy sebességgel haladó műholdak miatt szükséges. Pedig még a műholdakat is pontosan pályára lehet állítani a klasszikus fizika alapján. Mégis, az említett különleges alkalmazási körülmények között nagyon is szükség van a relativitáselméleti korrekcióra, bár gépkocsink sebessége nagyon-nagyon messze van a fény sebességétől.

A műszaki számítógép tudomány nagyon hosszú utat tett meg az első elektroncsöves szerkezetektől a mai mikroelektronikai eszközökig; azaz jelentősen megváltoztak a használati körülmények. Ráadásul, mint a tudományban száz évvel ezelőtt, kezdenek szaporodni olyan jelenségek, amelyekre a klasszikus számítástudomány nem tud megfelelő választ adni: nem növekszik a magányos számítógép processzor teljesítőképessége, nincs újabb sok-processzoros nagy szuperszámítógép, korlátokba ütközött a mesterséges neurális hálózatok fejlesztése is.

A matematika álláspontja szerint a $C=A+B$ kifejezés azonnal kiszámítható, ha A és B rendelkezésre áll, és C is *azonnal* rendelkezésre áll, persze csak *miután* elvégeztük a számítást. A műszaki megvalósításoknál tudjuk, hogy még ha azonnal rendelkezésre is áll A és B, a C előállításához kell a műveleti idő (ezért van a programoknak futási ideje); de ez „csak mérnöki tökéletlenség”. Olyan, mint az örökmozgó: működne az, csak a súrlódást kellene lecsökkenteni. Sajátos módon, örökmozgókkal rég nem foglalkoznak magukat kicsit is tudósnak tekintő emberek, viszont a mai napig sokan komolyan hiszik, hogy az adatátvitel ideje nem veendő számításba, hiszen egyre növekszik az átviteli sebesség, bár a hálózat mind jobban fulladozik. Növekszenek a rejtélyek: nem állt üzembe a beharangozott Aurora’18 szupergép; az új világrekorder-jelölt Gyoukou csak negyedik lett és ezért visszavonták; „a kínai vezetés nem engedi bemutatni az amerikaiénál legalább másfélszer nagyobb szuperszámítógépét, hogy ne élezzék a versenyt”; az egymilliárd neuron szimulálására tervezett agy-szimuláló neuronrendszer még a százezret sem tudja teljesíteni.

A klasszikus tudományban is „megmagyarázhatatlan” jelenségekkel kezdődött a „forradalom”, és – fizikai megvalósításán keresztül – a modern számítógép is kötődik a tudományhoz. Lehet, hogy itt is érdemes lenne megnézni, hogy a 70 év előtt tett feltételezések helytállóak-e még? A határsebesség feltételezése a fizikában, egyrészt a köznapi életben nem tapasztalható következtetései miatt, félig sem értett idő-paradoxonjain keresztül, társalgási témává is vált; másrészt számos addig érthetetlen jelenséget magyarázott. Lehet, hogy az idő ismét főszerepet kap és magyarázza az extrém területekre is kimerészkedő számítógépek viselkedésének néhány misztikus tapasztalatát?

MIÉRT NINCS IDŐ A KLASSZIKUS SZÁMÍTÁSTUDOMÁNYBAN?

A számítógép-tudomány két tudomány terület, a matematika (számítástudomány) – és fizikai megvalósításán keresztül – a műszaki tudomány határán fekszik. A számítógépes korszak kezdete óta létezik az a hallgatóságos megállapodás a két terület között, amit lényegében a Neumann János által lefektetett absztrakció alapozott meg: a számítógép architektúra oldalán csak azokat a javításokat/fejlesztéseket szabad létrehozni, amelyeket a működés során a matematika oldaláról nem lehet észrevenni. A matematika viszont csak operandusainak logikai függését veszi figyelembe; feltételezi, hogy azok azonnal elérhetők, amint szükség van rá. Más szavakkal, az alapvető hasonlóság a két terület között, hogy *mind a klasszikus fizika, mint a klasszikus számítástudomány azonnali kölcsönhatást (végtelenül nagy kölcsönhatási sebességet) tételez fel*. Ennek megfelelően, a mérnöki megvalósításban is úgy kell tekinteni, hogy a dolgok egyszerre történnek, még akkor is, ha az

operandust szállítani kell a tárolási hely és a művelet végzés helye között és a művelet mérnöki megvalósítása időt vesz igénybe. Amikor Neumann János nevezetes működési modelljét javasolta, a számítógép műveleti és adat elérési ideje egyaránt néhány ezred másodperc volt, az adat szállítás ideje pedig milliomod másodpercnyi. Teljesen jogosan, elhanyagolta a szállítási időt; de hozzátette, hogy ha a technológia változik, a modellt felül kell vizsgálni. Hét évtized után, ideje megvizsgálni a feltételek fennállását: a fizika története utat mutat.

A technológiai fejlődés gyökeresen megváltoztatta az említett idő értékeket. Mai számítógépeink több időt (és energiát!) használnak az adatok szállítására, mint a számítások elvégzésére. Megfordultak az idők közötti arányok is. Először is, a végrehajtó egységeket mikron alatti méretre kicsinyítettük, de néhány alkatrész (például az összekötő busz elemei) több centiméter méretűek maradtak. A processzorok elérték a természeti törvények által megengedett működési sebességet, és azt csak nagyon energia-pazarló módon tudják biztosítani. Valóban párhuzamosan működő számítógép rendszerek helyett szekvenciálisan működő párhuzamosított rendszereket használunk, tovább növelve a teljesítményvesztést. Különböző okokból, operációs rendszert használunk, ami csak nagyon idő-pazarló módon tudja biztosítani a szükséges kényelmet és biztonságot. Végül, a „mindent valós időben összekötni” elve geográfiailag is nagy távolságokat vezetett be (igaz, itt már rákényszerültünk az emberi mértékkel is észrevehető nagyságú idők figyelembe vételére; de azt csak a működtetés során tesszük meg, a tervezés során nem). Mindezek ellenére azonban, ma is a „gyenge skálázás”-t használják tervezési elvként, aminek alapját az a feltevés képezi, hogy a számítógépek összekötése (az átviteli idők, a párhuzamosított munka és általában a HW/SW együttműködés megszervezése) azonnali jellegű, nulla idő alatt megtörténik. A számítógép tudomány megtartotta a pillanat-szerű kölcsönhatás eszméjét, bár egyre nagyobb nehézségek árán. A matematikával kötött megállapodás szerint, modern processzorainkban egy gépi utasítás végrehajtása során az idő a processzor minden egyes alkatrésze számára ugyanaz kell hogy legyen, bár a jel keltése és felhasználása közötti idő lényegesen eltér az egyes helyeken, már a processzoron belül is. A mérések szerint az elfogyasztott energiának csak kb. 20%-a fordítódik számolásra. Csupán annak biztosítására, hogy egy nagyobb rendszerben mindenütt „pontosan ugyanannyi legyen” az idő (ugyanakkor jusson oda a szinkronjel), a felhasznált összes energia 30%-a kell. Azaz, a mérnökök észlelték, hogy az idő nem ugyanaz, de a matematikával kötött alku miatt olyan megoldásra kényszerülnek, hogy ezt ne lehessen észrevenni.

ÚT A MODERN SZÁMÍTÁSTUDOMÁNYHOZ

A számítógépek világában, a távolságokat az alkatrészek gyártása és elhelyezése megadja; hasonlóan a számításokat végző biológiai rendszerekben, a természet definiálja. A természetes mérhető egység az *idő*; nem az axon hossza és nem a jel által végig járt vezeték hossza. Az elindulás és a megérkezés közötti időt megbízhatóan tudjuk mérni. A klasszikus természettudományban mindenütt távolságok szerepelnek (történetileg és technikailag, azok változtatására és mérésére találtunk egyszerű módszert). Az idő csak a modern természettudományban jelent meg, segéd-mennyiségként: a Minkowski-transzformáció az időt egy negyedik dimenzió-beli távolsággá alakította.

Ilyen módon bevezethető a “modern számítógép tudomány”: ami változatlanul hagyja a számítás-tudomány matematika alapjait, de – a szintén szikla-szilárd Minkowski-transzformáció felhasználásával – a mai technológiának megfelelő, időben változó logika alapján írja le a számítógép működését. A temporális logika szerint a logikai kifejezés értéke attól függ, HOL és MIKOR számítjuk ki annak értékét. Bevezetéséhez annak fordítottjára van szükség, amit a speciális relativitás elmélete a Minkowski-tér formájában használ: egy olyan *idő-tér rendszerre*, ahol valamennyi koordináta érték idő. Hagyomány tiszteletből, az első három a térbeli koordinátáknak felel meg, a negyedik az idő. Az első három koordinátát speciális módon számoljuk: *a pont helyéhez azt az időt rendeljük, amennyi alatt az origóból az adott helyre eljut a jel, azon az útvonalon, amit használ. Viszont, a pont mellett annak térbeli hely jelölését tüntetjük fel.* A Minkowski-féle *tér-idő*höz való hasonlóság nyilvánvaló, az *idő-tér* megjelölés pedig a megközelítés módjára utal. Az 1. ábrán a könnyebb érthetőség kedvéért elhagyjuk a harmadik térbeli dimenziót. Az ábra lényegében egy idő-dimenzióval bővített két-dimenziós térben egy fénykúpot mutat (idézzük fel, hogy minden tengelyen idő szerepel).

Az általunk bevezetett idő-tér rendszer ekvivalens a tér-idő rendszerrel; ezt a relativitás elméletéhez vezető gondolat kísérletet bemutatásával szemléltetjük, egyúttal alkalmazva azt a számítógép működésére. Az esemény az *idő-tér* rendszer (0,0,0) pontjában történik: kigyújtunk egy lámpát, ami fényt bocsát ki.

Speciális koordináta rendszerünkben a fény a függőleges tengely mentén, bármely t értéknél egy kört képez, ahol a kör sugara idő skálán t , távolságként a fény által t idő alatt megtett út. Ezt az eseményt három dimenziós rendszerünkben egy, a *jövőbe irányuló fénykúp* írja le. Megfigyelőnk az x tengely mentén van, a körrel jelölt pontban. Feladata, hogy amikor észreveszi az origóból kibocsátott fényt, akkor bekapcsolja saját lámpáját.

Esetünkben mindkét fényforrásnak van „feldolgozási ideje” ami az utasítás megérkezésétől (a fény megpillantásától) az utasítás végrehajtásáig (a fény kigyújtásáig) eltelik. Az utasítás a zöld nyíl talpánál érkezik, a fény a nyíl hegyénél kapcsolódik be (azaz, ugyanazon a helyen, de később). Egy T_p feldolgozási idő után, a fény terjedni kezd. Ha a feldolgozási idő nulla lenne, akkor a fény a sötét kúp felület mentén terjedne, de így a kékes kúp felület mentén fog terjedni.

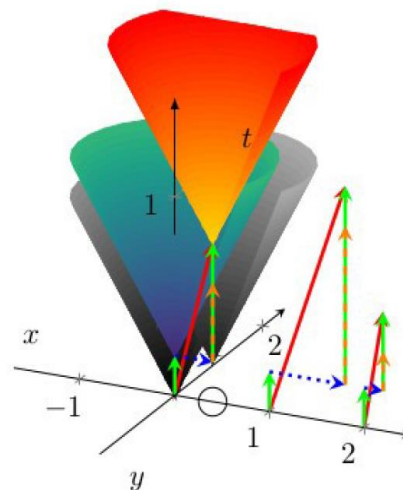
Ha a T_t átviteli idő nulla lenne, a megfigyelő ebben a pillanatban kigyújtaná saját lámpáját, ami a másik sötét kúp felület mentén terjedne. Meg kell azonban várnia, amíg az első fény megérkezik a megfigyelő helyére: amikor a vegyes színű szaggatott nyíl a kékes kúp felületbe ütközik. Ekkor kezdődik meg a második feldolgozási idő; a fény a sárgás színű felület mentén fog terjedni. A vízszintes (pontozott kék) nyíl hossza adja meg, mennyi idő alatt ér el a fény a megfigyelőhöz. A nyíl végénél a megfigyelő cselekszik (függőleges nyíl: egyrészt megvárja, amíg odaér a fény (kevert színű szaggatott nyíl, majd saját „feldolgozási ideje” után elindul a megfigyelő fénye is). Mivel a függőleges és a vízszintes nyíl is az (x, t) síkban van, vektoriális összegük (a piros nyíl) megadja a látszólagos végrehajtási időt. Ami két T_p és egy T_t időt tartalmaz, de vektor összegzés szerint. A vektor (térbeli) hossza az idővel arányos (azaz, az ábrán annál lassúbb a végrehajtás, minél hosszabb a nyíl), a használt speciális transzformáció pedig azt teszi lehetővé, hogy egyszerű derékszögű háromszögekből számítsuk ki a számítógép időbeli működésének jellemző paramétereit.

Azaz, a látszólagos idő a végrehajtási időnek és az átviteli időnek is nem-lineáris függvénye, és azok arányától is függ. Az arányok választása önkényes, az ábra két további arányt is mutat, amikor az eredetihez képest fele akkora és kétszer akkora a sebesség. A klasszikus számítástudomány szerint a számítás elvégzésének ideje a két zöld nyíl együttes hossza, a modern számítástudomány szerint pedig a piros nyíl hossza. A kettő csak akkor egyezik meg, ha a kölcsönhatás azonnali, azaz ha a terjedési sebesség végtelen nagy. A kevert színű szaggatott nyíl veszteség idő: elektromos teljesítményt vesz fel a rendszer, de hasznos munkát nem végez. Különböző technikai megvalósításain keresztül ez a veszteség idő az oka az egyedi processzorok kb. húsz év előtt, a szuperszámítógépek kb. 4 évvel ezelőtt és a mesterséges-intelligencia megoldások mostanában tapasztalt elakadásának.

AZ IDŐBEN VÁLTOZÓ LOGIKA GYAKORLATI HASZNA

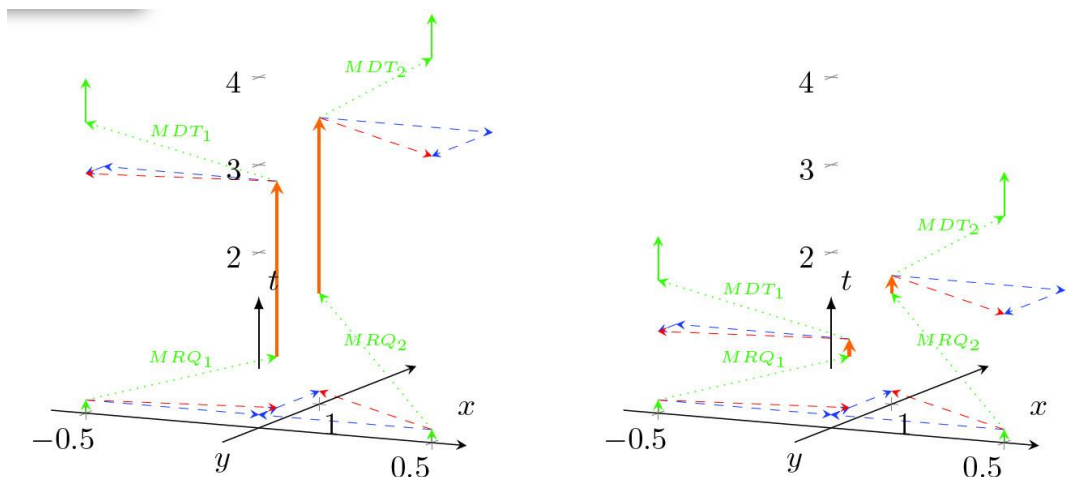
Az így bevezetett *modern számítástudomány* minden szempontból hasonlóan viselkedik, mint a mintául használt *modern fizika*. A „*modern számítástudomány*”, hasonlóképpen a *modern fizikához*, nem érvényteleníti a klasszikus változatot, csak egyrészt megvonja annak érvényességi körét, másrészt megadja az ezen határokon túl érvényes törvényeket, megmagyarázva a klasszikus elmélet keretében érthetetlen jelenségeket.

Ezzel a megoldással a mai számítógépes rendszerek tökéletesen leírhatók, a szilárd matematikai alap megtartásával. Első lépésként meg tudjuk magyarázni a számítógépes világban tapasztalt, klasszikus módon nem érthető jelenségeket. Második lépésként optimalizálni tudjuk a már létező komponensekből összeállított rendszerek működését. Harmadik lépésként pedig a tervező rendszereket és tervezési elveket az idő-függő logika használatára átalakítva, új komponenseket és rendszereket tudunk létrehozni. Ezekben már nem kell elnyomni a technikai alkatrészek természetes viselkedését az idő-független viselkedés látszatának mesterséges fenntartásával, így azok többszörösen jobb energia hasznosítással, és magasabb számítási teljesítőképességgel tudnak működni.



1. ábra

Egy számítás elvégzésének logikai és idő diagramja a „modern számítástudomány” időfüggő logikai modellje szerint



2. ábra

A processzortól való távolság és a memória működési idejének szerepe a látszólagos memória elérési sebesség kialakításában. A jobb oldali ábra egy jövőbeli, lehetséges új technológia vagy anyag használatát feltételezi.

A második ábra azt mutatja, hogyan használható időben változó logika a tervezői gyakorlatban. Számítógépeink belsejében a műveletek végzésével lényegesen kevesebb idő telik el, mint az operandusok szállításával, így a látszólagos működési sebesség erősen függ a tároló működési sebességétől (valamint, amint azt éppen az itt bemutatott ábrával lehet demonstrálni: annak helyétől). Egyrészt a legkisebb és leggyorsabb memóriákat a processzorhoz közel helyezik el, másrészt komoly és költséges kutatások folynak új anyagok, effektusok, technológiák után, amelyek gyorsabb működést tesznek lehetővé. Mivel azonban a működés időbeli, ezen jövő idejű fejlesztések és felfedezések használhatóságát a fizika (pontosabban a fény sebessége) korlátozza. Az ábra azt mutatja be, hogy a processzoron belül elhelyezett átmeneti tároló memória elhelyezése és működési sebessége hogyan befolyásolja számítógépünk sebességét. Bár a jobb oldali ábrán (valamilyen új anyag vagy tároló effektus felfedezése után) 10-szer gyorsabb a memória fizikai működése, a számítás elvégzése mégis csak kb. kétszeresen gyorsul fel, mivel az adatok szállítási sebessége nem lépheti túl a (fénysebességgel arányos) terjedési sebességet. A számítógép komponensek fizikai működési és egymás közötti átviteli idejét össze kell hangolni. Nincs értelme nagyon nagy sebességű komponenseket fejleszteni, ha a méretet nem tudjuk arányosan csökkenteni: a fizikai méreten keresztül a terjedési sebesség határt szab az elérhető sebességnek. Még a 0 idő alatt működő memória sem gyorsít sokat a látszólagos végrehajtási időn; tökéletes ellentétben a „klasszikus számítástudomány” által elvárt értékkel. Hasonlóképpen, az esetleges piko- vagy femtosecundum működési idejű processzorokhoz is az eszközök fizikai távolsága alapján számítható idő alatt lehet adatokat szállítani. A költséges technológiai kutatások eredményének gyakorlati használhatóságát a természeti törvények korlátozzák.

ÖSSZEFOGLALÓ

Annak felismerése, hogy a folyamatok időben változnak, forradalmat idézett elő a klasszikus fizikában; a megállásra kényszerített idő órási elektromos teljesítmény pazarlást idéz elő jelenlegi elektronikai rendszereinkben. Az időben változó logika bevezetése a klasszikus számítástudományba forradalmat idéz elő, és jelentős fejlődéshez vezet számítógépes rendszereinkben is. Érdeemes száz évet visszamenni az időben, és, a klasszikus fizika mintájára, bevezetni a klasszikus számítástudományba az időt. Részletes és szakszerű leírása az elektronikus preprintben.

KÖNYVÉSZET

János VÉGH: Introducing temporal behavior to computing science,
<https://arxiv.org/abs/2006.01128>