

## Tanulmány

# AZ INFORMÁCIÓ HORDOZÓIRÓL – AZ INFORMÁCIÓ ÚJ NÉZŐPONTBÓL II. Információ, kiszámítás és informatika

## ON THE CARRIERS OF INFORMATION: INFORMATION FROM A NEW PERSPECTIVE Part 2. On the Relationship of Information, Computation and Informatics

Benczúr András

az MTA doktora, professor emeritus, Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatikai Kar Információs Rendszerek Tanszék, Budapest  
abenczur@inf.elte.hu

### ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban az információ fogalmát közvetett úton közelítem meg. Nem magával az információval foglalkozom, hanem az információ hordozóival, amit a dolgozatban *formációnak* nevezek. Az információ hordozói adják a gondolkodás és kiszámítás közös „anyagát”, a formációt. Két alapvető emberi képességünk, az anyag átrendezése és a gondolkodás, kibontakozásának történeti áttekintésével kezdtek a formációk világának bemutatását. Az anyag tudatos átrendezése tette lehetővé tudaton kívüli formációk használatát, ami tovább erősítette az anyag átrendezésére megismert lehetőségek készletének továbbadását és fejlesztését. A formációk világát két fő részből állónak tekintem: az emberi tudatokon belüli világból és a tudatokon kívül megjelenő, mesterségesen készült formációkból. Az utóbbiak (exformációk) három fő rendszere a nyelv, az írás-nyomtatás és végül a digitális formációk. A formációkhoz a jelentés hozzárendelése információs lépések, folyamatok során történik. A formációból így lesz információ. Az információ hasznosulása, felhasználása, átalakítása, feldolgozása sokáig emberi tudatokon keresztül történt. Ezen a téren hozott forradalmi változást a digitális világ és a kiszámítás gépesítése. A kiszámítás és az információ összefonódásával foglalkozik a II. rész. A dolgozat újszerűségét a formációkra és az információs eseményre épített elemzés adja.

### ABSTRACT

Bypassing the definition of information, I do not deal with the information itself but with the carriers of information, which I call *formation* in the paper. The carriers of information provide the common ‘material’ of thinking and computation, the formation. I begin my presentation of the world of formations with a historical overview of the evolution of our two basic human

abilities, the rearrangement of matter and thinking. The conscious rearrangement of the material allowed the use of artificial formations outside our brains, which further strengthened the transmission and development of the set of known possibilities for the rearrangement of the material. I consider the world of formations to consist of two main parts: the world within the human consciousness and the artificial formations that appear outside of it. The three main systems of the latter (exformations) are language, writing-printing, and finally digital formations. The meaning is assigned to the formations during information events. *The formation thus carries information for its user.* The utilization, use, transformation, and processing of information has long been only through human consciousness. This field has been revolutionary changed by the computing machines and the digital world. In Part 2 the strong interrelationship of computation and information is dealt with. The novelty of the paper is given by the analysis based on the formations and the information events.

**Kulcsszavak:** információ, kiszámítás, kommunikáció, információelmélet, mesterséges intelligencia, informatika

**Keywords:** information, computing, communication, information theory, artificial intelligence, informatics

## BEVEZETÉS A 2. RÉSZHEZ

A dolgozat első részében az információs esemény bevezetésével kötöttem össze az információ hordozóit az észleléssel és a jelentés hozzárendelésével. Az információ hordozóját neveztem el formációnak. A szóválasztás utal a fogalmilag felette álló információ szóra, egyben lehetővé teszi, hogy az információ hordozóinak a tudaton belüli természetes és a tudaton kívüli mesterséges megtestesüléseivel egyaránt foglalkozni lehessen. A formációk használatát emberi lehetőségeink két nagy adománya, az anyag átrendezésének és a gondolkodásnak a képessége teszi lehetővé, és egymásra hatva alakították az emberiség információhordozóinak, a formációknak világát, alkotják az emberi közösségek egyre globalizálódó infoszféráját. A gondolkodás a tudaton belüli formációkkal gazdálkodik, belső információs események is zajlanak benne, érzékszervi észlelésekhez, érzületekhez belső formáció keletkezik, ami korábbi észlelések megőrződött formációihoz kapcsolódva egészül ki jelentéssel. A külső formációk mind tudatos, szándékos anyagátrendezéssel jönnek létre, mint a beszéd, az írás. Ezek visszahatottak a tudati információs folyamatokra, és kifejlődött a nyelvi szimbólumokra épülő gondolkodás, benne a kiszámítás matematikai és algoritmusos alapjaival. Az anyag átrendezéseinek sorában magával az átrendezett anyaggal végrehajtható anyagátrendezések sora elvezetett a géppel végeztetett kiszámításhoz. Itt tartunk ma. A fejlődés történetét jól követhetjük Csányi Vilmos és Tóth Balázs (2017), valamint Yuval Noah Harrari (2015, 2017) könyveiben. Harrari a „*Homo Deus*”

könyv (2017) végén a kiszámítás és adatvilág mindenhatóságát hirdető illuzórikus dataizmus bemutatásáig jut el.

Az első részben is hangsúlyosan szerepelt, hogy a külső formációk használata, alakítása a gépi kiszámítás előtt kizárólag emberi tudati tevékenységgel történt. Korábbi írásomban (Benczúr, 2000) a kommunikáció és a matematikai modellek szemszögéből mutattam be a fejlődés történetét. A Shannon-modell kiinduló feladata az üzenet eljuttatása a forrástól a rendeltetési helyre. Ezt fejlesztettem tovább az információs rendszerek modelljévé (Benczúr, 2003), ahol az üzenetek a felhalmozódó tudáskészlethez adódó relatív üzenetek, és kérdésüzenetekkel lehet hozzáférni a készlethez. A megközelítés akkor az információs rendszerek automatizálásának feladatából kiindulva volt szűkítő, egyúttal a kommunikáció matematikai kérdéseire is irányult. A szemantika ebben nem játszott szerepet, eltérően ettől a dolgozattól. A szemantikát az információs esemény és az információtriád bevezetésével hoztam be az első részben. A korábbi modellben központi szerepet játszó üzenet mint információhordozó helyére a bővebb megjelenési és felhasználású formákat, a formációkat vezettem be.

A 2. részbe került harmadik szakaszban jellemzem a kiszámítás és az információ viszonyát, bemutatom a kiszámítás és az információs események összefonódását. A 4., záró szakasz a matematikai modellek jellemzése mellett a kiszámítás és a digitális formációk néhány újdonságát tartalmazza. A *Konklúzió*ban a formációkra épülő szemlélet összefoglalását adom meg, és az informatika új tudományterületként való kibontakozását hangsúlyozom.

A közvetlen megértés kedvéért az 1. részből megismétlem az információtriád és az információs esemény definícióját, valamint a két alaptörvényt.

Az információtriád a *formáció*, *tulajdonos* és a *jelentés* hármasa (háromsága). Az információ szerepe a triádban háromféle lehet: keletkező, észlelt vagy kibocsátott. Ez a hármasság egy időben lejátszódó folyamathoz tartozik, amelyet *információs eseménynek* nevezek. Az információ ebben a meghatározásban a formáció mozgása, amit a tulajdonos kapcsolatba tud hozni jelentéssel. A tulajdonos vagy új formációt társít a referálthoz, vagy formációt észlel a referáltjával társítva, vagy formációt bocsát ki a referált helyettesítéseként.

*Az 1. alaptörvény:* Különböző jelentésekhez különböző (a megfigyelő/létrehozó által megkülönböztethető) formációra van szükség. Ebben van mindjárt egy relatív héttér: a megfigyelő felbontóképessége. A formációnak felismerhetőnek, megkülönböztethetőnek kell lennie.

*A 2. alaptörvény:* Formáció észlelése/létrehozása akkor jelent információt, ha egy időben olyan korábban keletkezett formáció észlelése is lehetséges, amelyhez a jelentés kötődik.

### 3. A KISZÁMÍTÁS ÉS A FORMÁCIÓK VISZONYA

A kiszámítás egész fejlődési története során mesterséges formációkkal történt. Nem bármilyen információ kezelése volt az eredeti funkciója, hanem elsősorban a számokhoz, mennyiségekhez tartozó formációk használata. A feldolgozáshoz a külső, tárgyiasult formációk is szükségesek, a feldolgozások menetét szabályozott agyi tevékenység hajtja végre. A szabályozott tevékenységek fejlődtek tovább a geometria, matematika, logika és a természettudományok sajátos gondolkodási formáiba. A kiszámítást nem természeti jelenségnek tekintem, hanem az emberiség által kialakított eszköznek. Akkor is eszköz, amikor emberi elme végzi a műveleteket. Ebből nem következik, hogy az idegrendszer működését is kiszámításnak lehet tekinteni, viszont lehet keresni a kiszámításos működési modelljét.

A kiszámítás fogalmának meghatározásában – legalábbis a szakma keretén belül (amerikai terminológiával a *computing profession* közösségben) – sokkal nagyobb az egyetértés, mint az információéban. Az általános felfogás információátalakításnak tekinti. Azonban nem minden információátalakítás kiszámítás. Többek között Peter J. Denning (2011) is adott egy szigorúbb értelmezésű definíciót: „Egy reprezentáció szimbólumokból álló alakzat, ami valami helyett áll. Egy olyan reprezentációt, amely egy függvényt kiértékelő metódus helyett áll, algoritmusnak nevezünk. Egy reprezentációt, amely adat helyett áll, értéknek nevezünk. Egy információeljárás reprezentációk szekvenciája. Egy kiszámítás olyan információeljárás, amelyben az átmeneteket egyik reprezentációból a másikba egy reprezentáció kontrollálja.”

A Denning által használt reprezentáció közeli szinonimája az általam használt formációnak. A formáció annyiban általánosabb, hogy nem csak szimbólumokból építkezhet. Lényeges a definícióban a metódus és az algoritmus fogalmának használata. Ezért nem tekinthető minden információátalakítás kiszámításnak.

Dolgozatomban az anyagátrendezés középpontba helyezésével a kiszámítást a speciális célú anyagátrendezéshez kötöm. Denning meghatározásában tulajdonképpen három formáció szerepel: a kiszámítási feladat konkrét példányának formációja, az átalakítást kontrolláló formáció (például program) és a megoldás formációja. A kiszámítást végző anyag, a számítógép, az első két formációt kapja anyagként, és ezt felhasználva hozza létre az eredmény formációját. Ami ebben az esetben összekapcsolja a három formációt, az a kiszámításos modellezés, vagy még újabb kifejezéssel az informatikai modellezés. A kiszámításos gondolkodásra (*computational thinking*) nevelés a kiszámításos modellezésre, a számítógép segítségével való feladatmegoldásra készít fel, fontos eleme az algoritmusok elszámoltatása, a programozási alapvetés. A legújabb, az informatikai gondolkodás felvetése a rendelkezésre álló információval, informatikai eszközökkel és a kiszámítással való összetett feladatok, rendszerek modellezésére irányul.

Úgy tekintem, hogy a *kiszámítás* legáltalánosabban formációk átalakítása formációkká. Vagyis reprezentánsokkal való modellezése a reprezentáltak viszonyainak. *Egy valaminek reprezentálására használt formáció átalakítása valamit reprezentáló formációvá.*

A kiszámítás matematikai meghatározása egy 1930-as években megfogalmazott sejtésre, a Church–Turing-tézisre alapul (URL1), amely szerint minden formalizálható probléma, amelyik megoldható algoritmussal, megoldható Turing-géppel is.

Az, hogy épülhet-e a kiszámítás axiómája Turing-gépre, többek által vitatott, amit az interaktív algoritmusok, folyamatosan működő online algoritmusok, osztott rendszerek példáival támasztanak alá. Az új kiszámítási lehetőségek, mint a párhuzamos, interaktív, folyamatos kiszámítások valóban nem felelnek meg a Turing-gép megszakítás nélküli működésének, azonban a Turing-automaták nem kizárólagos szalaghasználatra való alkalmazásával már megvalósíthatók.

*A Turing-kiszámítás ismertetése:* Egy Turing-gép véges sok állapotot vehet fel, egy szalag celláiból olvashat, a celláira írhat jeleket, előre adott véges jelkészletből. Az olvasás és írás után léphet az előző vagy következő cellára a szalagon. A gép központi része a mozgástáblája, amely megadja, hogy adott állapotban adott jelet olvasva milyen állapotba menjen át, mit írjon vissza a szalagra, és előre vagy hátra lépjen-e. Két kitüntetett állapota van, a kezdő és a befejező állapot. A Turing-kiszámítás végrehajtása során a gép kezdő állapotban a szalagra helyezett feldolgozandó adat elején áll. A feldolgozás akkor fejeződik be, ha a gép befejező állapotba kerül. Az eredmény a szalag új tartalma lesz. Annyi Turing-gép (T-gép) létezik, ahány mozgástábla adható meg. Az alapváltozat csak 0 és 1 jeleket használ (bináris T-gép), és a szalagon lehet még a csak olvasható „üres” jel. A Turing-gép a szalagot a gép részének tekinti, a feldolgozandó adat szalagra helyezése után a szalag tartalmát csak a gép változtatja. A Church–Turing-tézis azt jelenti, hogy egy kiszámítási nyelven megadott (véges megadás) kiszámítás-leíráshoz létezik vele ekvivalens T-gép úgy, hogy minden  $x$  (egész) helyen vagy ugyanazt az értéket adják vissza véges lépésben, vagy egyik sem ad vissza értéket véges lépésben.

Nézzük meg, mit jelent a kiszámításra nézve, ha elváltaszjuk a Turing-gép állapotváltozási, más néven mozgási tábláját a munkaszalag használatától. Nem kellene a szalag kizárólagos használatára korlátozni a T-gépek működtetését. Ezzel kiterjeszthetjük a Church–Turing-tézist.

*Tézis.* Minden kiszámítás megadásához elegendő a Turing-automaták használata. Egy Turing-automata egy mozgástáblából és egy író-olvasó fejből áll. Ha szalagot helyezünk a fej alá, az állapotának megfelelő lépést hajtja végre. Véges sok T-automatával minden kiszámítási feladat megvalósítható, pontosabban minden kiszámítási feladat visszavezethető véges sok automata rendszerével való kiszámításra. Az építkezés típusait a bemeneti és kimeneti folyamat, a munkasza-

lag használata és az automaták közötti kommunikáció választásának lehetőségei adják meg. Egy Turing-automata megszakítás nélküli futását tekinthetjük elemi kiszámításnak. Kommunikációs hálózattal egybekötve humán és internetre csatlakozó műtárgy (IoT: Internet of Things) résztvevőkkel komplex feladatok megoldását, működtetését tudjuk kiépíteni.

A Turing-kiszámítás a szalag kizárólagos használatát tételezi fel, és a kiszámíthatóság kérdése a végesen leírható, de végtelen sok példányból álló feladatrendszerekre vonatkozik. Véges sok példányból álló és végesen megoldható feladatok esetén, mint például a sakk, a kiszámíthatóság nem kérdés. Itt a kérdés a mérettől függő igen nagy számítási kapacitás biztosítása és természetesen a minél hatékonyabb kiszámítási megoldások megtalálása. Az interaktív algoritmusok, folyamatfeldolgozások mind visszavezethetők megfelelő munkaszalag-használattal, Turing-gépes mozgástáblával megadható kiszámításokra. Fordítva is igaz, hogy az így definiált, nem kizárólagos szalaghasználatú Turing-rendszerek fizikailag megvalósíthatók, vagyis minden lefutásukhoz rendelhető fizikailag végbemenő kiszámítás. Ezzel a kiszámítások – mint végső soron mozgástáblákkal és adatokkal megadható formációk – axiomatikusan felépülő struktúrát adnak. Ebben a struktúrában, önmagában is van egy sajátos jelentés, vagyis szemantika: a kiszámításhoz tartozó leképezés. A kiszámítással kezelt formációk jelentését ez önmagában nem határozza meg. Csak formációk átalakításának tekinthető a kiszámítás, ami az információs triád és az információs események nélkül nincs értelmezve. A kiszámítással kapott formációk használatának az a különlegessége, hogy a kiszámításnak mint formációnak a helyes jelentést kell hordoznia. Fontos észrevétel, hogy a T-gépek mozgástáblája maga is potenciális formáció.

A bevezetőben az anyagátrendezések és a gondolkodás együttes fejlődésére építettem a kiszámítást végző mesterségesen átrendezett anyagig tartó fejlődést. Ezzel az információ és kiszámítás együttműködését is egyértelmű keretbe lehet foglalni. Ez szűkebb értelmezést ad, mint a kiszámítás, az információ és együttesük filozófiájáról kialakuló irányvonalak felfogása, viszont lefedi, és nem lép ki az infoszféra világából. A filozófia érdeklődését a kiszámítás világa iránt először a mesterséges intelligencia (MI) váltotta ki, majd a személyi számítógépek, az internet és a mobil kommunikáció világa a kiszámítás és információs technológiák filozófiájának kibontakozásához vezetett.

A szigorú értelemben vett kiszámítás mellett megjelentek a mesterséges világon kívül eső természetes jelenségek kiszámításként való felfogásának irányvonalai. Ezek nem illeszkednek az emberi anyagátrendezés eddigi sorába, de új átrendezések kiindulásai lehetnek. Olyan filozófiai irányzatok, mint a computacionalizmus, neocomputacionalizmus és infokomputacionalizmus tartoznak ehhez az eltérő szemléletű kiszámítási felfogáshoz.

Conrad Zuse indította el a computacionalizmus filozófiai irányvonalat 1967-ben (Zuse, 1969) azzal, hogy úgy tekintette, mintha az egész univerzum saját

viselkedését egy alapszinten kiszámítaná, az egész egy kiszámítást végző tér lenne. Újabb erőre kapott ez az irányzat azzal, hogy az informatika eszköztára messze túllépett a kezdeti numerikus és alfanumerikus alapvető alkalmazások világán. Az izolált kiszámításokhoz képest jelenleg kiszámítások sokasága folyik, rendszerekké, kommunikációs csatornákat és adattárolási eszközök közbeiktatásával összehangolva. A kiszámítás lényegét ez nem változtatja meg. Az interaktív használat, a párhuzamos és osztott rendszerek, szimbolikus számítások, a kiszámításos modellezés életjelenségeikig terjedő kibontakozása odáig vezetett, hogy kialakult egy olyan felfogás, amely az élő rendszereket is informatikai rendszerként tekinti, amelyek dinamikáját az információfeldolgozás, vagyis kiszámítás adja. Ennek részletes kifejtése található például Mark Burgin és Gordana Dodig-Crnkovic (2013) dolgozatában, amelynek konklúziója: „Sokkal jobban meg kell értenünk a kiszámítást mint információfeldolgozást annál, ahogy most tudjuk. Minthogy nincs információ (fizikai) reprezentáció nélkül, az információ dinamikáját különböző szemcsézettséggel valósítják meg különféle fizikai folyamatok, belefoglalva a kiszámítás szintjeit, amelyeket számítógépek (tervezett kiszámítás) és élő szervezetek (természetese kiszámítás) hajtanak végre.”

Dodig-Crnkovic (2009) könyvében *az infokomputációs természetfelfogást fejti ki*. E könyv rövid ismertetője alapján mutatom be a felfogás lényegét. Úgy tekint a valóságot, hogy az információ adja a struktúráját, a kiszámítási folyamatok pedig a változását. Információ és kiszámítás kibogozhatatlanul összefonódik. Nincs kiszámítás információs struktúra nélkül, és nincs információ kiszámítási folyamat nélkül. Ezzel olyan fogalmi háló építhető, amely a valóság felfogásának egy elméleti útja. A valóságot a naturális komputacionalizmus keretében fogja fel, amelynek szemlélete szerint az egész univerzum úgy tekinthető, mint egy különböző szintekből álló kiszámítási rendszer, a kvantummechanika világtól kezdve a biológiai organizmusokig, beleértve az intelligens elmét és társadalmát. A könyv tárgyalja az információ és kiszámítás kérdéseit, nézetük egyesítését, a tudásgenerálás infokomputációs megközelítéséhez való alkalmazásait.

Az infokomputációs felfogást hibásnak tartom, ha a természetet magát tekinti infokomputációs jelenségnek. Abban az esetben, ha a természet modellezésével, megértésével van kapcsolatban, helyes, hiszen a természetet infokomputációs modellel tudjuk leírni és befolyásolni. A kérdés az, hogy hol húzzuk meg a kiszámítás határát a természet és az infoszféra között. Számomra a fő kritérium az, hogy kimutathatóan formációk manipulálása történik-e, vagy sem. A formáció valami helyett áll, ezért nézőpontom szerint nem közvetlen a kiszámítás hatása.

Ezen a ponton kapcsolódik az információ és a formációk világába a digitalizáció és a mesterséges intelligencia is. Azt az érzést keltik, hogy a kiszámítási képesség révén az értelmezési képesség is lehetővé válik a gépek számára. Sőt meg is haladják majd az emberi értelmezési képességet (az intelligencia egyik fontos összetevőjét).

A mesterséges intelligencia kibontakozásához vagy még általánosabban a számítástudományhoz Alan Turing a róla elnevezett Turing-teszt mellett elsősorban azzal a meglátásával járult hozzá, hogy minden, ami kiszámítható (számokból vagy egyéb szimbólumokból kalkulálható), az automatizálható.

Érdeemes figyelembe venni az MI meghatározó alakjának, John McCarthynek a megfogalmazását a mesterséges intelligencia feladatáról: „Olyan kutatás annak a sejtésnek alapján, amely szerint a tanuláshoz vagy az intelligenciának bármely lehetősége elvileg leírható olyan precizitással, hogy építhető rá gép, ami szimulálja. Más szavakkal, az intelligencia bármely eleme lebontható kis lépésekre úgy, hogy minden egyes lépés olyan egyszerű és »mechanikus«, hogy leírható számítógépes programként.”

Ez sejtés volt, és ma is az, vagyis helyességét nem tudjuk bizonyítani. Mégis alapvető fontosságú az MI értelmezéséhez, az MI-ről kialakuló nézetek megítéléséhez. McCarthy úgy tekintette, hogy az intelligencia akkor is intelligencia, ha az a rendszer, amely megvalósítja, éppen egy számítógép, ami mechanikusan követi programját. Fontos felfigyelni McCarthy megfogalmazásában arra a finomságra, hogy nem az egész intelligencia, hanem csak bármely lehetősége bontható le egyszerű lépésekre. Amit lebontottunk, azzal már boldogul a mesterséges intelligencia, és várhatóan nálunk sokkal hatékonyabban.

A kiszámításhoz fűzött eszmefuttatás lezárásaként azt a következtetést vonhatjuk le, hogy elfogadva a kiterjesztett Church–Turing-tézist, csupán a kiszámításra építve nem lehet tudatos gépet létrehozni. Egy Turing-gépekből álló rendszert bárki, aki ismeri a gépek mozgástábláit, gondolkodás nélkül tudna futtatni. Elképzelhető, hogy a tudat egyes résztevékenységeit lehet kiszámításos modellel jellemezni, de valószínűleg csak rövid időintervallumra. Lehet, hogy konkrét kiszámításos tevékenységek folynak a tudatban, de ha ezekhez Turing-gépek lennének rendelkezéskor, akkor azok valószínűleg nem kiszámításos módon változnának meg.

#### 4. FORMÁLIS MODELLEK, A KISZÁMÍTÁS ÉS A DIGITÁLIS FORMÁCIÓK NÉHÁNY ÚJDONSÁGA

A formációkkal való hatékony gazdálkodás a távközlés és a kiszámítás fejlődése során új lehetőségekhez jutott. A nagy mennyiségű, nagy méretű formációk kezelése, továbbítása, tárolása, átalakítása az erőforrásokkal való gazdálkodás hatékony megoldásait igényli, jellemzően kódolási feladat. Az eredeti formációkat kódoljuk, és a kódokkal dolgozunk tovább. A szemantika akkor jelenik meg ezekben a folyamatokban, amikor a formáció információeseménybe lép ki, vagy abból lép be a kódok világába.

Az első érdemi formális modell, Claude E. Shannon modellje az 1940-es években a jeltovábbítás kérdésére irányult, még nem látszott a háttérben a számítási és tárolási kapacitások robbanása (Shannon–Weaver, 1986). Shannon modelljét a



hírközlés technológiai fejlődése motiválta, és az üzenetek továbbításának hatékonysága volt az alapvető kérdés. Rényi Alfréd (2004) megfogalmazása szerint a modell mérhetővé tette az információt, matematikai elméletet alapozott meg. Azonban a mérés az információ reprezentánsára, vagyis formációjára vonatkozik. A feladat lényege – bár közvetlenül ez nem látszik – mindössze annyi, hogy különböző információkat (Shannon modelljében üzeneteket) különböző reprezentánsokkal kell kódolni (lásd az 1. alaptörvényt).

A kommunikációs folyamat működésének sémáját az információs eseményekre építve írrom le. A forrás információs eseménye során formációt rendel a referálthoz, a formációt az üzenettovábbító rendszer kódolja, a kód jut el a rendeltetési helyre, ahol a kódból vissza kell állítani a forrás által használt formációt, amelynek észlelése lesz a kiváltott információs esemény. Fontos, hogy a rendeltetési hely ugyanazt a jelentést társítsa a kapott formációhoz, mint a forrás. A forrás ismétlődően választja az üzeneteket. A továbbítás szempontjából csak az fontos, hogy hányféle formációt használhat, és melyiket milyen eséllyel fogja választani. A forrás egy véletlen eseménysorozat, amelyből egy véletlen formációsorozat lesz, ezt a sorozatot kell a lehető legtömörebben kódolni. Ez a tömöríthetőségi mérőszám, amely a véletlen eloszlású szituáció leghatékonyabb kódolásának jellemzője, a Shannon-entrópia, ami más megfogalmazásban az ismétlődő szituációnak (a forrás üzenetválasztásának) bizonytalanságát méri. Ezért az információt a modell alapján gyakran a bizonytalanság csökkentéseként szokták jellemezni. A

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = \sum_{i=1}^{i=n} p_i \log_2 p_i^{-1}$$

nevezetes entrópiaformula a  $p$  valószínűségű választáshoz  $p$  reciprokának logaritmusával megegyező hosszú kódot rendel. Nem precíz matematikai okfejtéssel ez úgy is indokolható, hogy ha csupa ilyen valószínűségű lehetőségből kellene választani, akkor  $p$  reciprokával lényegében megegyező számú esetünk lenne. Ezek mindegyikét különböző bináris kódokkal azonosítva a szükséges kódhossz  $-\log_2 p$  lenne. A bizonytalanság csökkentésének lehetőségét a feltételes entrópia teszi mérhetővé Shannon modelljében. A feltételes entrópia mint a megfigyelés után megmaradó átlagos bizonytalanság kisebb lesz, mint a megfigyelés nélküli esetben, kizárólag független megfigyelés esetén nem változik a bizonytalanság mérőszáma.

Az információ mérése feladatfüggő, és a választható formációk terének jellemzőire épül. A jó formációkészlet jellemzése az információforrás szemantikus készletének mérőszámaként is használható. A használható struktúrák leszámllása gyakran kombinatorikus modellekhez vezet. Ez igaz a Shannon-entrópia és a Kolmogorov-entrópia modelljeiben is.

Andrej Nyikolajevics Kolmogorov (1965) nevezetes dolgozata az információ mennyiségének mérésére három lehetőséget ad meg:

1. A valószínűség-eloszlás szerint választott üzenetek, események várható értékben legrövidebb kódolására a Shannon-entrópia alkalmas.
2. Nagy méretű adatok, nagy méretű jelenségek legtömörebb, számítógéppel visszaállítható kódolásához a Kolmogorov-entrópia (leírási bonyolultság, teljes nevén Chaitin–Kolmogorov–Solomonoff-entrópia).
3. Véges sok elem azonos hosszú kóddal való leírásához a kombinatorikus entrópia, ami az egyenletes eloszlás Shanon-entrópiájával egyezik meg.

Mindhárom lehetőség sajátos információs eseményrendszerhez kötődik. A Shannon-entrópia esetét már bemutattam. A kombinatorikus entrópia esetén minden leírandó eset, tárgy vagy szituáció azonos esélyű, nem kell eltérő hosszú kódokkal törődni.

A róla (is) elnevezett entrópia bevezetésénél Kolmogorov így tette fel a kérdést: milyen rövid kód lenne elegendő ahhoz, hogy egy számítógép abból kinyomtassa Tolsztoj *Háború és béke* című regényét? Másik és fő célja a véletlenszám-generátorok jóságának ellenőrzése volt. Akkor jó egy generált véletlen szám, ha nem tömöríthető a generáló algoritmus ismerete nélkül. Látható, hogy a feladat a kiszámítással függ össze. Szokás még algoritmosos entrópiaként vagy leírási bonyolultságként is nevezni a Kolmogorov-entrópiát. A feladatot a formációk nyelvén úgy fogalmazhatjuk meg, hogy a jelentéssel bíró igen hosszú  $x$  formációt milyen rövid  $p$  formációval tudnánk helyettesíteni, hogy  $p$ -ből számítógéppel, vagyis egy  $P$  algoritmussal  $x$  visszaállítható legyen. Függvényjelölést használva azt várjuk el, hogy  $P(p) = x$  legyen, és  $p$  a lehető legrövidebb kód legyen, amiből  $P$   $x$ -et számítja ki. A kódok, formációk most legyenek binárisok, és a hosszt az  $l(x)$  függvény adja. Látható, hogy  $P$  megválasztásától függ, milyen rövid  $p$  kódot találhatunk  $x$ -hez. Az elmélet arra épül, hogy az univerzális Turing-gép programja optimális választás  $P$ -re. A három felfedező majdnem egy időben találta meg az elmélet invarianciatételét, ami az optimális függvények szerinti mérőszámok konstans erejéig való egyértelműségét mondja ki.

Önmagáért is érdemes röviden bemutatni az univerzális Turing-gépet, mit is jelent az univerzalitása. Kezdjük azzal, hogy a Turing-gépek mozgástábláit egyszerű szabályok használatával bináris kóddal le tudjuk írni. Készíthetünk olyan T-gépet, az utánzó gépet, amelynek először adatként megadjuk egy T Turing-gép mozgástáblájának kódját, majd a gép által feldolgozandó  $p$  adatot. Az utánzó gép a mozgástábla alapján T lépéseit hajtja végre  $p$  feldolgozása során, és a végeredmény  $T(p)$  lesz.

Használjuk ki, hogy a T-gépek mozgástábláinak kódjait egyértelműen fel lehet sorolni, így minden T-géphez sorszámot rendelhetünk. Az  $i$ -edik T-gépet jelöljük  $T_i$ -vel. Az U univerzális T-gépet úgy konstruáljuk, hogy az  $(i, p)$  rendezett pár kódjából határozza meg  $T_i$  mozgástábláját, majd ezzel és  $p$ -vel hívja meg az utánzó gépet, és futtassa le. Az eredmény:  $U(i, p) = T_i(p)$  lesz. U konstrukciója

alapján lesz érthető, mit jelent az univerzalitása. Nem azt jelenti, hogy elegendő  $U$  ismerete és használata bármilyen kiszámításhoz. Azt jelenti, hogy ha valamit ki tudunk számítani egy  $T$ -géppel, akkor azt a  $T$ -gép ismeretében az  $U$ -géppel is ki tudjuk számítani. Tehát ami kiszámítható, az visszavezethető az  $U$ -géppel való kiszámításra.

Visszatérve a Kolmogorov-bonyolultsághoz, elegendő az  $U$ -gépről a fenti ismertetés az invarianciatétel megfogalmazásához.

*Invarianciatétel.* Legyen  $x$  tetszőleges véges bináris kód,  $T$  tetszőleges Turing-gép. Létezik olyan, csak  $T$ -től függő  $k_T$  konstans, hogy

$$\min(l(y)|U(y)=x) \leq \min(l(p)|T(p)=x) + k_T.$$

A bizonyításnál azt használjuk ki, hogy elegendő  $p$  mellett  $T$  sorszámának kódját megadni  $U$ -nak, hogy ennyivel több adatból számolja ki  $x$ -et. Az invarianciatétel elnevezést az magyarázza, hogy két optimális gépre nézve az egyenlőtlenség kölcsönösen fennáll. Ezért rögzíthetjük a fenti  $U$ -gépet mint referenciagépet, és az  $x$  bináris szó Kolmogorov-bonyolultságán a

$$K(x) = \min(l(p)|U(p)=x) \text{ számot értjük.}$$

Bármennyire objektív is  $K(x)$  értéke, sajnos nem számítható ki a definícióban szereplő minimalizációs függvényképzés miatt. Meglepő módon, mégis sok fontos tulajdonságát ki lehet mutatni, és fel lehet használni.

Figyelmes konstrukcióval (Benczúr–Molnár, 2018) az univerzális Turing-gép olyan változatát kapjuk, amely bármely konkrét  $T$ -géphez képest mindent ki tud számítani legfeljebb konstanssal hosszabb adatból, konstanssal több szalagtár felhasználásával és konstans szorzóval több időráfordítással, ahol a konstansok csak  $T$ -től függenek. Ezt az univerzális gépet választva referenciagépnek, nem tudunk nála semmilyen más  $T$ -géppel érdemben hatékonyabban kódolni igen nagy adatsorokat. A hatékonyság alatt itt azt kell érteni, hogy mekkora adatból mennyi erőforrás (tár, idő) felhasználásával tudunk valamit előállítani algoritmussal.

Alkalmazások számára a feltételes Kolmogorov-entrópia ad elvi lehetőségeket és korlátokat. A megismerés szemszögéből nézve, a természet struktúráit tudjuk megfigyelni, azért mert elkülönülnek környezetüktől, míg a teljesen rendezetlen jelenségről nem sokat lehet megállapítani. A sok alkotórészből álló komplex jelenségeknél a szerkezet adja a jelenség fő jellemzőit, és marad mellette egy véletlenszerű egyedi rész. Az algoritmosus információelmélet, a Kolmogorov-entrópia apparátusa (lásd Gács et al., 2001) is ad erre matematikai modellt: egy hosszú adatsor leírását szétbonthatjuk két részre úgy, hogy az egyik megad egy röviden leírható és minél kisebb elemszámú halmazt, amelybe az adatsor is beletartozik,

a másik rész pedig a halmazon belüli egyenletes hosszú kód, amely a véletlen összetevő. A szerkezetet a halmaz leírása jelenti, ez az érdeemben kinyerhető információ.

Nagyon nagy elemszámú halmazok, például egy igen hosszú üzenetsorozat jellemzésénél Kolmogorov mindhárom mennyiségi lehetősége szerint az egyenletes hosszú kód az optimális a halmaz tipikus elemeinek leírására.

A formációk digitális kódjaival való gazdálkodás információelméleti alapjainak felvázolása után még röviden nézzük meg a digitális világ és a nyelvi, képi formációk együttműködését, együttélését. Kezdjük a nyelvtechnológiákkal. Szövegszerkesztők, helyesírás-ellenőrök nélkül lassan el sem képzelhető napi kommunikációs tevékenységünk. A megegyezéssel használt alapvető formációk, a nyelv ábécéje, kimondott és leírt alakjai, a szavak, mondatok jelentése előzetes megegyezések nyomán áll össze, egyéni és csoportos előzetes ismeretek alapján színezve. Ezt a jelentési sokszínűséget csak korlátozottan képesek például a számítógépes fordítók követni. Úgy tűnik, hogy a nyelvi intelligencia nem bontható le teljesen elemi részekre, amit az MI igényelne. Jó irodalmi példa erre Esterházy Péter (2003) előadása a *Mindentudás Egyetemén*. A vizuális élmény csatolása az íráshoz szubjektív, az elképzelésre alapul, korábbi látványokhoz, történésekhez társul. A beszéd, írás a maga generatív lehetőségeivel érthető meséket, regényeket tud megalkothatóvá tenni, és ezzel mesterséges világokat hoz létre. Tényeket is lehet hamisítani. Ez nem újdonság, csak most gyorsabban terjeszthetők.

A tárgyiasult formációk korábban kizárólag emberi alkotások voltak, írások, rajzok, jelek. Ezen a nyomtatás se változtatott, csak a sokszorosíthatóságukat oldotta meg. A valóság észleléséről így csak szegényes reprodukciót lehetővé tevő formációk készülhettek. Szemantikájukhoz az észlelő tudati hozzájárulása erősen szükséges volt. A fényképezéssel jelentek meg az első „instrumentálisan” készült formációk. Jelentésükhöz nem sok háttértudás, csak a vizuális értelmezési szemantika kellett. Manuális technikákkal ezeket is lehetett korlátozottan módosítani. A digitális instrumentális formációk világa először a nagy felbontás és tárolhatóság szempontjából hozott áttörést és tömeges elterjedést. A tömeges felvételek új lehetőséget hoztak a *big data* és a *deep learning* technológiák kibontakozásával. Megtanulhatóvá válik például egy személy teljes valóságghű animálása bármilyen másik személy helyén. Ez valóságot meghamisító formációt állít elő, aminek lejátszását vizuális észlelésünk természetes felvételnéppé értelmezi. A digitális formációk eredetazonosítása nélkül inkorrekt szemantikához vezethetnek. Ez is azt támasztja alá, hogy a formációk világában zajlik új forradalom. Az új formációkhoz társuló információ a valóságészlelésünk természetes szemantikájára épül.

Különleges szerepük van azoknak a formációknak, amelyek cselekvésre, mozgásra, változtatásra hatnak. Ebben is új lehetőséget hozott a kiszámítás és a

digitalizáció. A digitalizáció előtt az információ (formációk) cselekvést kiváltó hatása emberi tudat működését igényelte. A kibernetika, annak legújabb megvalósulásai mesterséges, kommunikáló rendszereket tudnak a formációk segítségével működtetni.

Ez az alapja a most zajló negyedik ipari forradalomnak, ami az Ipar 4.0 (Industry 4.0) elnevezés háttérében áll (Nagy, 2019).

Az emberi és a gépi tanulás nagy eltérése: az embernek saját tanulás kell, nem lehet tölcserrel beletölteni a tudást. A gépeknek, robotoknak, intelligens tárgyaknak be lehet tölteni a kész tudást. A nyomtatás passzív formációk sokszorosítását oldotta meg, a szoftver pedig aktív formációk sokszorosítását. Az oktatás és a programbetöltés lényegében tér el egymástól. Az infoszféra új, domináló része a digitális világ lett. Közvetlenül sem a digitális formációk, sem a futó programok nem észlelhetők emberileg, ezért a digitális világban lévő formációk használatának egyetlen alapja van: a bizalom.

## KONKLÚZIÓ

Dolgozatomban az anyagátrendezés és a gondolkodás emberi lehetőségeiből kiindulva az információ anyagi megjelenési formáira, a formációkra irányítottam a figyelmet. A formációk bevezetésével láthatóvá lehet tenni a határt az emberiség információs építkezése és a természet összetett folyamatai között.

A mindenkori fizikailag létező formációkészlet és a használatát biztosító rendszerek együttese alkotja az emberiség infoszféráját. Az infoszféra a bioszféra terméke, nem létezne nélküle, hiszen ember sem lenne a bioszférán kívül. Jelen korunk pedig az infoszféra új, digitális lehetőségeivel új lépcsőt jelent a kiszámítás gépesítésére építve. Mindez új tudomány kibontakozásához vezet.

Ahogy a számítástechnika kilépett a számítógéptermekek világából, egyre erőteljesebben épült be az infoszféra mindennapi világába. A számítástudomány (computer science) mellett az amerikai szóhasználatban megjelent az *information technology*, míg Európában a szélesebb területet átfogó változatban az informatikai tudomány (informatics) bontakozik ki. A fejlődés a kezdeti alapvető algoritmusok, a kiszámítás matematikai elmélete és a programozáselméletek, nyelvek, módszerek kidolgozása után az internet, a személyi számítógépek, a mobil eszközök, az adatrobbanás, a felhők, a tárgyak internete és az MI szétterülő megoldásai az új lehetőség legfontosabb komponensére helyezték át a hangsúlyt: az információ munkába fogására. Az információ hasznosulása a számítógépek világa előtt kizárólag emberi elméken keresztül történhetett. Az ember által használható formációk világa mellett kialakult és tovább fejlődik a gépek által használható formációk világa. Az anyaggal végezhető anyagátrendezés új lehetősége az információt hordozó formációk világában játszódik

le. A számítógépek képessé tehetők az információ hasznosítására további emberi közreműködés nélkül.

Az internet, a számítógépes világháló robbanásszerű kiépülése az emberiség információkészletének, az infoszférának kiépülésében új korszakot jelent. Az infoszféra új fejlődése saját tudományterületet igényel már, ez lehet az informatika, tudományágként az informatikai tudományok.

### KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom kollégáimnak, Szabó Gyula Istvánnak, Molnár Bálintnak és Kiss Attila Elemérnek, akik végig figyelemmel kísérték a témában készült tanulmányaimat, kérdéseikkel, javaslataikkal segítették a letisztulás folyamatát.

### IRODALOM

- Benczúr A. (2000): Informatika – oktatás – informatikaoktatás 2000. *Természet Világa II. Különszám*, <http://www.termeszvilaga.hu/kulonsz/k002/informatika.html>
- Benczúr A. (2003): Számítógépek és híradástechnika: az emberiség új kommunikációs korszaka I. rész. *Híradástechnika*, LVIII, 9, 18–24.
- Benczúr A. – Molnár B. (2018): On the Notion of Information – Info-Sphere, The World of Formations. In: *9<sup>th</sup> IEEE International Conference on Cognitive Infocommunications: CogInfoCom 2018: Proceedings*. Piscataway (NJ), USA: IEEE Computational Intelligence Society, 33–38. DOI: 10.1109/CogInfoCom.2018.8639904, [https://www.researchgate.net/publication/327656394\\_On\\_the\\_Notion\\_of\\_Information-Info-sphere\\_the\\_World\\_of\\_Formations](https://www.researchgate.net/publication/327656394_On_the_Notion_of_Information-Info-sphere_the_World_of_Formations)
- Burgin M. – Dodig-Crnkovic G. (2013): The Nature of Computation and the Development of Computational Models. *Computability in Europe 2013 (CiE 2013), The Nature Of Computation, Univ. of Milano-Bicocca*, 1–5 July 2013. <https://bit.ly/3tQtd2a>
- Csányi V. – Tóth B. (2017): *Hiedelmeink*. Budapest: Libri Kiadó
- Denning, P. J. (2011): What Have We Said about Computation? *Ubiquity Symposium, Closing Statement*, in *Ubiquity, an ACM Publication*, April, 2011. <http://ubiquity.acm.org>, DOI: 10.1145/1967045.1967046, <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1967045.1967046>
- Dodig-Crnkovic, G. (2009): *Information and Computation Nets: Investigations into Info-computational World*. VDM Verlag Dr. Müller
- Esterházy P. (2003): *A szavak csodálatos életéből. (Mindentudás Egyeteme)*, <https://www.youtube.com/watch?v=JBQtwCR6a9s>
- Gács P. – Tromp J. – Vitányi P. M. B. (2001): Algorithmic Statistics. *IEEE Transactions on Information Theory*, 47, 6, 2443–2463. <https://homepages.cwi.nl/~paulv/papers/algorithmicstatistics.pdf>
- Harrari, Y. N. (2015): *„Sapiens” – Az emberiség rövid története*. Budapest: Animus Kiadó
- Harrari, Y. N. (2017): *„Homo Deus” – A holnap rövid története*. Budapest: Animus Kiadó
- Kolmogorov, A. N. (1965): Three Approaches to the Quantitative Definition of Information. *Problems of Information Transmission*, 1, 1, 1 DOI: 10.1080/00207166808803030, <https://www.semanticscholar.org/paper/Three-approaches-to-the-quantitative-definition-of-Vit%C3%A1nyi/c6540955a0ee16c39dda256134456d60987fa1c1>

- Nagy J. (2019): Az ipar 4.0 fogalma és kritikus kérdései – vállalati interjúk alapján. *Vezetéstudomány/Budapest Management Review*, L, 1, DOI: 10.14267/veztud.2019.01.02, <http://unipub.lib.uni-corvinus.hu/3869/>
- Rényi A. (2004): Napló az információelméletről. In: Rényi A.: *Ars Mathematica*. Budapest: Typotex Kiadó
- Shannon, C. E. – Weaver, W. (1986): *A kommunikáció matematikai elmélete (az információelmélet születése és távlatai)*. (ford. Tompa F.) Budapest: OMIKK
- Zuse, K. (1969): *Rechnender Raum (Calculating Space)*. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn  
1<sup>st</sup> re-edition written in LATEX, <https://philpapers.org/archive/ZUSRR.pdf>

URL1: [https://en.wikipedia.org/wiki/Church%E2%80%93Turing\\_thesis](https://en.wikipedia.org/wiki/Church%E2%80%93Turing_thesis)