

Opponensi vélemény

Dr. Horváth Imre

*”Underpinning and advancing cognitive engineering of
intellectualized cyber-physical systems”*

című MTA doktori értekezéséről

1. Áttekintés

Az MTA Műszaki Tudományok Osztálya által befogadott doktori értekezés témája a kiber-fizikai, és különös tekintettel a valamilyen értelemben intelligens, vagy intellektuális képességekkel is rendelkező kiber-fizikai rendszerek tervezésének elméleti megalapozása. Ezt fejezi ki az angol nyelven írt értekezés magyar címe is: ”Intellectualized kiber-fizikai rendszerek kognitív tervezésének megalapozása és fejlesztése”.

A címoldalt, egy nyilatkozatot és a tartalomjegyzéket követően az értekezés érdemi része 104 oldalt tesz ki. Ezt a 9 fejezetre tagolt szöveget követi, immár függelékként, az irodalomjegyzék és a rövidítések jegyzéke. A vonatkozó irodalom fejezetenként adott, ami lévén a lista meglehetősen hosszú (összesen 335 + 21 elemű), nagyban könnyíti a referenciák követését. A magyar nyelvű tézisfüzet a célok és a kutatási, ill. módszertani előzmények rövid összegzése után 1-1 oldalban foglalja össze az értekezésben megfogalmazott kilenc tézis lényegét, reflektál a hasznosítási lehetőségekre, megadja a fő referenciákat (18 tétel), és – akárcsak az értekezésben – külön felsorolja a Pályázó disszertációhoz közvetlenül kapcsolódó publikációit (21 tétel). A doktori értekezés szerkezete világos, maga a szöveg is erősen strukturált – alig van oldal, ahol az olvasó ne találkozna akár többféle taxatív felsorolással¹. Az értekezésben és a tézisfüzetben kevés az elütés, az irodalomjegyzékek pontosak. Így lényegében az értekezés megfelel a doktori művel szemben támasztott követelményeknek.

2. Kutatási tematika, előzmények és módszertan

A Pályázónak jelentős életműve van kiber-fizikai rendszerek (KFR) főként a gyártás világához köthető tervezése és fejlesztése terén. Az értekezés azonban nem ezekről a műszaki alkotásokról szól. Az értekezés központi témái olyan kérdések, mint a rendszerszintű általános probléma-megoldó tudás megragadása, hasznosítása, bővítése, átadása és területek közti transzformálása. Mi jellemzi a kiber-fizikai rendszereket

¹A mintegy 100 oldalas értekezés szövegében legalább 213 felsorolás található, a tézisfüzet 12 oldalas szövegében pedig 29.

általánosságban, alkalmazási területtől függetlenül?² Mennyire és miként tehetők ezek a rendszerek "okossá" (*smart*), milyen jellegű kutatások szükségesek az ún. intellektualizált, vagy szűkebben értelmezett okos rendszerek megalapozásához és létrehozásához? Hogyan jellemezhetők és vajon milyen tudást testesítenek meg ezek a rendszerek?

A kutatás módszertanát a Tézisfüzet így összegzi: ".... sokféle módszer került alkalmazásra, például (i) többfókuszú szakirodalom áttekintés, (ii) kritikus rendszerszemléletű gondolkodás, (iii) számítógépi modellezés és szimuláció, valamint (iv) rendszermodulok és alrendszerek tesztelhető prototípusainak megvalósítása." Ez a módszertani meghatározás több kérdést is felvet:

- Milyen szempontok szerint került elemzésre a szakirodalom? A kiber-fizikai rendszerek hazai kutatóinak jó pár a területet meghatározó, a nemzetközi kutató közösség és az MTA által egyaránt elismert (pl. a vizsgált időszakban akár több ezer hivatkozással rendelkező,³ vagy Lendület pályázatot és nemzetközi karriert megalapozó⁴) munkája van, melyek egyike sem került említésre.

Hasonlóképpen teljesen hiányzik a hazai filozófiai, közgazdasági, tudományszervezési kutatások idevágó munkáinak a feldolgozása. A rendkívül széles irodalmi merítésbe a Pályázó és társszerzői munkáin kívül egyetlen magyar szerző, Lakatos Imre 1970-ben megjelent tanulmánya került bele.⁵ Ezáltal a doktori értekezés egyféle zárvány az idevágó hazai akadémiai stúdiumok körében.

- Az értekezés absztrakt fogalmakat definiál és ezekből építkezik. Fontos jellemzője, hogy még elvétve sincsenek benne példák⁶, modellek, szimulációs, számítási és/vagy fizikai kísérletekre alapuló elemzések és következtetések. Az értekezés nem mutat be prototípusokat vagy alkalmazási eseteket. Meglehet, a rendelkezésre álló hely szűkössége miatt, de ez a körülmény azzal jár, hogy az állítások tudományos értéke rendkívül nehezen ítéltető meg, legalábbis a műszaki tudományok hagyományos szempontrendszerét követve.
- Feltűnő, hogy a felhasznált információforrások típusainak felsorolásából kimaradtak az alkalmazói (pl. ipari, orvosi, stb.) követelmények.

Már a módszertani rész is hangsúlyozza, hogy "olyan együttműködésen alapuló és integratív szupradiszciplináris kutatási stratégiákra lenne szükség, amelyek ötvözní tudják a mono-, inter-, multi- és transzdiszciplináris megközelítéseket, módszereket és ismereteket." Az értekezés ezt az állítást később tézisként is kifejti. Ha ez így áll, akkor az értekezés kivezet a műszaki tudományok területéről. Ha követjük az

²Az értekezés példaként olyan területeket sorol fel, mint a gyártás, szállítás és közlekedés, mezőgazdaság és kertészet, városi, orvosi és otthon-ápolási alkalmazások, sport és tömegrendezvények.

³Monostori László és tsai. „Cyber-physical systems in manufacturing”. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 65.2 (2016), 621–641. old.

⁴Lásd Varró Dániel munkái:

<https://m2.mtmt.hu/gui2/?type=authors&mode=browse&sel=authors10001355>.

⁵Lakatos Imre. „History of science and its rational reconstructions”. *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association*. 1970. köt. Cambridge University Press. 1970, 91–136. old.

⁶Kivételnek számít a 8.5 fejezetben ismertetett pár mondatos példa, amiben a légszennyezés illusztrálja az ún. problematika itt definiált fogalmát (93. old.).

MTA VI. Műszaki Tudományok Osztályának önmeghatározását ⁷, akkor az értekezés témaköre leginkább az automatizálás-számítástechnika és az informatika területeihez tartozik, de jó pár – sőt, legtöbb – lényeges állítása nem értelmezhető, ill. ellenőrizhető ezen diszciplínák fogalmi apparátusával, azok bevett határain belül.

Az értekezés újabb jelzővel gazdagítja azon rendszerek jellemzését, amiknek valamiféle emberi intelligenciát is igénylő vagy akár azt meghaladó feladat megoldását köszönhetjük. Az "intelligens", "kognitív", "smart", "okos" és "racionális" mellett megjelenik az "intellektualizált" ("intellectualized"). Az intellektualizált rendszerek következtetés, tanulás és adaptáció terén mintha erősebbek, fejlettebbek lennének annál, mint amit 20-30 éve az ún. intelligens rendszerekről tartottunk, de ha most megnézzük, mit tart magáról és mit tud nyújtani a mesterséges intelligencia (tágabb, nem csak gépi tanulás értelemben), akkor úgy látom, nincs szükség újabb jelzőre. A fősodratú szakirodalom nem él ezzel a megkülönböztetéssel. Az intellektualizálás egy folyamat, aminek célja, eredménye lehet az "okosság" (*smartness*) (lásd 2.6 fejezet). Kérdés, hogy miért nem egy "intellektualizált" rendszer?

Jóllehet a mesterséges intelligencia (AI) és az azzal kapcsolatos általános kérdések a dolgozat vissza-visszatérő témái, a feldolgozott irodalom alig hivatkozik a fősodratú AI kutatás eredményeire és munkáira⁸.

Az értekezés címében megjelenik mind a "kognitív" mind az "intellektualizált" jelző. A tervezés azonban – akár objektum, rendszer vagy szervezet a tárgya (*design*), akár cselekvés, működés (*planning*), eleve kognitív képességeket igénylő tevékenység, így ott feleslegesnek tartom a jelzőt.

3. Tézisek

A téziszfüzet nem adja meg, hogy melyik saját publikációk támasztják alá az egyes téziseket. Az első, második és kilencedik tézis esetében az értekezés sem emeli ki ezen publikációkat.

3.1. Első tézis

Az első tézis 16 ún. paradigmatis rendszersajátossággal jellemzi a kiber-fizikai rendszereket általánosságban és megadja az ún. intellektualizált kiber-fizikai rendszerek 14 generikus funkcióját.

Véleményem szerint műszaki alkotások esetén első lépésként mindazon követelményeket és körülményeket kellene számba venni és rendszerezni, amik az adott tulajdonságokkal és funkciókkal (vagy azok egy részével) rendelkező megoldásokat igénylik. Hazai kutatók már igen korán tettek ilyen kísérletet, amikor generikus feladatokkal jellemezték a gyártástudomány- és technológia fő problémáit, és ezek

⁷Az osztály illetve a tudományos bizottságok által gondozott tudományterületek: akusztika, anyagtudományok-technológiák, automatizálás-számítástechnika, áramlás-hőtechnika, elektrotechnika, elektronikus eszközök-technológiák, energetika, építészettudomány, gépszerkezettan, informatika, közlekedéstudomány, metallurgia, szál-és kompozit-technológia, szilárd testek mechanikája, távközlési rendszerek, vízgazdálkodás-tudomány, lásd <https://mta.hu/vi-osztaly/bemutakozik-avi-osztaly-105420>.

⁸Például sok a konferencia cikk hivatkozás, de kevés kivétel utal az AI kutatás legfontosabb konferenciáinak cikkeire. Kivétel kettő, ill. egy-egy hivatkozás a *National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, *International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, és a *Conference on Neural Information Processing Systems* cikkeire.

révén határozták meg, hogy a mesterséges intelligencia akkori teljes eszköztára miként és mennyiben járulhat hozzá ezen műszaki problémák megoldásához.^{9 10}

Egyes rendszersajátosságok esetében – pl. F16, ami a molekuláris és bio-számítási alapokon működő kiber-fizikai rendszerek intelligenciát reprodukáló képességéről szól – a körültekintő tudományos megalapozottságot szintén hiányolom. Ebben a témakörben, amit a gyártástudomány területén biológiai transzformációnak is neveznek, széleskörű, egyebek közt a Fraunhofer Társaság által kezdeményezett nemzetközi kutatások folytak, hazai kutatók közreműködésével.¹¹

A követelményrendszer megadásának hiányában a tézist részben tudom elfogadni.

Már az első tézis kapcsán így fogalmaz a Pályázó: "Következésképpen az álláspontunk az lett, hogy a KFR-ek következő generációt leginkább az információtechnológiának, a nanotechnológiának, a biotechnológiának, a kognitív tudományoknak és a társadalomtudományoknak a rendszertudományokkal, rendszertervezéssel és gyártási technológiákkal való szoros összefonódása fogja meghatározni." Ezzel a megállapítással egyetértek. Ugyanakkor ez azzal is jár, hogy a doktori mű kivezet a műszaki tudományok területéről és megítélése interdiszciplináris megközelítést igényel.

3.2. Második tézis

A második tézis egy számítási folyamatmodellt javasol okos kiber-fizikai rendszerek megvalósításához. A javasolt modell lényegében megegyezik a mesterséges intelligencia kutatásban és alkalmazásokban jelentős fordulatot eredményező ún. racionális (vagy később, korlátozott racionális) ágens modellel és annak kiterjesztésével.¹² A 2022-ben negyedik, bővített kiadását is megélő alpművet, aminek mindmáig meghatározó szerepe van a mesterséges intelligencia kutatásában és oktatásában¹³, az értekezés nem említi.

Lényegi tudományos újdonság hiányában nem javaslom a tézis elfogadását.

3.3. Harmadik tézis

A harmadik tézis a kiber-fizikai rendszerek egymást követő generációit jellemzi, önszervezési képességük alapján. A megközelítés új, de az olyan fogalmak, mint az itt bevezetett önautonómia, önszemlélés, önadaptáció, önfelfogás, önfejlődés, önfejllesztés, önhangolás, önszervezés, öntudat és önreprodukció pontosabb megkülönböztetést követelnek meg. Műszaki tudományok területén elengedhetetlennek tartom a realizált példák megemléztetését, nem feltétlen mind a Pályázó életművéből.

⁹Márkus András és Hatvany József. „Matching AI Tools to Engineering Requirements”. *CIRP Annals* 36.1 (1987), 311–315. old.

¹⁰Érdeklőség, hogy a generikus feladatokról szóló cikket az értekezés idézi, lásd Chandrasekaran, B. (1986), "Generic tasks in knowledge-based reasoning: High-level building blocks for expert system design." *IEEE Intelligent Systems*, 1(03), 23-30.

¹¹Gerald Byrne és tsai. „Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing”. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 21 (2018), 1–32. old. ISSN: 1755-5817.

¹²Stuart Russell és Eric Wefald. *Do the Right Thing: Studies in Limited Rationality*. MIT press, 1991; Stuart Russell és Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1995.

¹³2022 évi adat: a könyv mintegy 1500 egyetemi kurzus alapja. <https://aima.cs.berkeley.edu/>

További kérdés, hogy az 1. tézisben megadott paradigmatis rendszersajátosságok miként jelentek meg az intellektualizált kiber-fizikai rendszerek egymást követő generációiban.

Ennek megfelelő magyarázattal és bővítéssel fogadható el a tézis.

3.4. Negyedik tétel

A negyedik tétel kiindulási alapul veszi Fritz Machlup és követői elméletét a rendelkezésünkre álló tudásfajták kategorizálásáról, és a négy bevett kategória kiegészítéseként egy ötödiket javasol a tudás-intenzív rendszerekben megtestesített ismeretek megragadására és jellemzésre. A felvetést relevánsnak és igen érdekesnek tartom, főként ha a vizsgálat kiterjed a mai nagy nyelvi vagy akár vizuális ismereteket is kódoló, jobbra fekete dobozként használatos mesterséges intelligencia modellekre is.

Az eredeti kategorizálás, ami az emberi tudás jellegét és alkalmazási módjait tükrözi, közgazdasági, tudásszociológiai, és ismeretelméleti megfontolásokon alapul. A különböző tudásformák megértése és definiálása már a görög filozófiai örökség része volt, onnan kezdve a tudományfilozófiában hosszú hagyománya van. A poszt-modern tudományfilozófia jeles képviselői szerint a tudás társadalmi konstrukció, így a tudományágak folyamatosan változnak, felosztásuk nem is állandó¹⁴.

Így a tétel tudományos értékének megítélését az érintett tudományterületek képviselőire bízom.

3.5. Ötödik tétel

Az előző tétel adott tudományágakat különböztetett meg a kutatás célja és módszertana tekintetében. Így elfogadható, hogy ha helyt adunk az ötödik (epszilon) kategóriának, akkor ez együtt jár új célok és kutatási módszertan megfogalmazásával is. Az értekezés erre átfogóan a "szimpérazmológia" koncepciót javasolja.

Akárcsak a 4. tétel esetében, nem tartom magam illetékesnek e tétel új tudományos értékének megítélésében.

3.6. Hatodik tétel

A hatodik tétel az ún. prognosztikus rendszerszemléletű gondolkodásra ad javaslatot, valamiképpen szembeállítva azt analitikus párjával. A műszaki alkotások létrehozása – ez régről tudott, sokat tárgyal téma – az analitikus és szintetizáló gondolkodásmód együttesén alapul. A folyamatot kibontakozó (*emergent*) szintézisnek is hívják.

A tétel kifejtése (6. fejezet) a hagyományos és az új rendszerszintű gondolkodás 9 ill. 11 (pillérnek nevezett) jellemzőjét adja meg, melyeket páronként egy szemantikus hálóban is összekapcsol. Az irányított gráf korántsem teljes, a párosítások és azok kétirányú értelmezése (pl. *distinctiveness* – *causality*, *consolidation* – *causality*,

¹⁴Bruno Latour munkássága, aki a tudományos ismeretek előállításának társadalmi és technikai aspektusait vizsgálta, nincs megemlítve az értékezésben. Latour olyan ún. *Actor-Network* elméletet dolgozott ki, ami a tudományos ismeretek létrejöttét különböző (emberi, gépi és intézményes) aktorok kölcsönhatásának tulajdonítja. Az ismeretek lényegi eleme nem azok igazságtartalma, hanem sikeres alkalmazhatósága. Ebben az értelemben igen közel áll a fent említett racionális ágens koncepcióhoz.

ineptitude – equilibrium, ...) számomra önkényesek és műszaki tartalommal nehezen alátámaszthatók.

Így nem tudok a műszaki tudományok szempontjából új értéket tulajdonítani a tézisnek.

3.7. Hetedik tézis

A hetedik tézis központi állítása, hogy az intellektualizált probléma-megoldó rendszerek tudása és feldolgozási mechanizmusai között szoros funkcionális kapcsolat áll fenn. Ez valóban így van, de ez igaz minden tudásreprezentációs és következtetési rendszerre. Minden reprezentációs nyelvnek van kifejező ereje (mit lehet egyáltalán állítani?), az azon dolgozó következtetési/keresési mechanizmusnak van következtetési képessége (milyen kérdésekre várható válasz?), és követhetősége (milyen számítási igénnyel jár, mennyi időn belül várható válasz?). Jól definiált reprezentáció (pl. első rendű logika, Horn klózok) és következtetési mechanizmus (pl. rezolúció) esetén megadható, hogy a következtetés teljes-e és mekkora a komplexitása.¹⁵ Adott számítási modellben – és ha működő rendszer akarunk, el kell kötelezünk magunkat valamely modell(ek) mellett – reprezentáció és következtetés/keresés elválaszthatatlanok.

Az értekezés bevezeti a repozitórium alapú tudás transzfer fogalmát (7.4 fejezet). Az itt megadott érvelés vezetett a korábbiakban a számítógépes ontológiák kifejlesztéséhez.

Az érvelés fontos kiindulópontja az, hogy az intellektualizált műszaki rendszerekben felhalmozott tudás jelentős ipari érték, erőforrás. Ezzel az állásponttal teljesen egyetértek, és biztos vagyok abban, hogy hasonlóképpen látják ezt az (ipari) digitalizációban élenjáró világcégek is (Siemens, Hitachi, Bosch-Rexroth, Dassaults Systemes, stb.). Az értekezésben nincs utalás arra, miként, milyen gyakorlati formában jelenik meg ezen műszaki ismeretek megragadásának, hasznosításának, továbbadásának és bővítésének igénye az ipari szereplők részéről. Hol látják a fő kihívásokat és lehetőségeket? Csak ezen igények ismeretében lehet megítélni, hogy az a technológiai hasznosítási folyamat, amit az értekezés bemutat, célravezető lehet-e.

3.8. Nyolcadik tézis

A nyolcadik tézis azt fogalmazza meg, hogy a kiber-fizikai rendszerek következő generációinak tervezése és megvalósítása tudományterületi határokon átnyúló kutatást-fejlesztést igényel, aminek sikerét csak egy közösségi munkára alapozott, társadalom-orientált és integratív szupradiszciplináris kutatási módszertan biztosíthatja. Ahogy a tézisfüzet fogalmaz, ezek "komplexifikált, intellektualizált, szocializált és perszonalizált" rendszerek lesznek, melyek létrehozása a csoport-tudomány elvei alapján lesz lehetsége.

A tézisben megfogalmazott követelmények lényegével egyetértek, de a tézis új tudományos értékének megítélésére nem vagyok hivatott.

¹⁵Russell és Norvig, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*.

3.9. Kilencedik tétel

A kilencedik tétel egy olyan kutatási módszertant ír le, amely alkalmazása elvezethet a fenti rendszerek létrehozásához. Ha a tudományossággal kapcsolatos módosító előtagoktól (uni-, pluri-, post-, mono-, inter-, multi-, trans-, supra-, meta-) egy pillanatra eltekintünk, akkor a módszertan fő szereplői, fázisai és kapcsolatai lényegében megegyeznek azzal, ahogy nagy, komplex, több területet átfogó kutatási programokat szokás szervezni és (jó esetben) végrehajtani. Ezt a 8.7 ábra tömören szemlélteti.

A tétel újdonságértékének megítélését tudományszervezésben jártas szakértőre bízom.

4. Javaslat

Dr. Horváth Imre az utóbbi 10-15 évben elért és a nemzetközi szakirodalomban közölt eredményeit foglalta össze doktori értekezésében. Javaslom az értekezés nyilvános vitára tűzését abban a reményben, hogy a téma multidiszciplináris jellege miatt az opponensek és a bizottság tagjai közt az MTA II. és IX. Osztálya is képviselve lesz.

Budapest, 2025. március 21.

Dr. Váncza József
a műszaki tudomány kandidátusa