

Vélemény Honti Márk

Bayesi módszerek a vízi környezet modellezésében című MTA doktora értekezéséről

Készítette: Abonyi János

A modell alapú szimulációs, tervezési, optimalási, irányítási és hibadiagnosztikai eljárások alkalmazásában rejlő lehetőségek kiaknázása a vízgazdálkodás területén is olyan jelentős kutatási kérdéseket vet fel, melyek nem csak tudományos szempontból érdekesek, hanem ökológiai, gazdasági és társadalmi szempontból is jelentősek. Bár a modell alapú megoldások előnyei egyértelműek és megkérdőjelezhetetlenek, elterjedésük és széles körű alkalmazásuk elsődlegesen a modellparaméterek identifikációjának nehézségei miatt korlátozottak. Honti Márk doktori dolgozatában kiváló érzéssel mutat rá arra, hogy elsődlegesen a paraméterek és a modellszerkezet felismerhetetlensége az, amely a modellek alkalmazását hátráltatja. Kutatásainak célkitűzése, miszerint ezeket a felismerhetetlenségi problémákat mérsékelje, időszerű, az alkalmazási területtől függetlenül helytálló és rendkívüli jelenőséggel bír.

A doktori mű nem csak a témaválasztást tekintve kiemelkedő, hanem stílusa, nyelvezete, felépítése kapcsán is példaértékű.

Honti Márk felvállalta, hogy magyar nyelvű dolgozatával a szakmai nyelvet is ápolja, gyarapítja, mely feladat különösen nehéz akkor, amikor úttörő munkát végez és a szűkebben értelmezett tématerületén elvétve található magyar nyelvű irodalom. Sajnos a szerzőt elkerülték a hazai irányításelmélet területén született kapcsolódó irodalmak, így a dolgozat szóhasználata nem cseng össze az ebben a körben alkalmazott terminológiával. Mindez természetesen nem von le a mű értékéből, ugyanakkor javaslom, hogy a jövőben inkább a rendszeridentifikáció fogalomköre kapcsán a *paraméter identifikáció* és az *identifikálhatóság* fogalmakat alkalmazza. Ennek tükrében, opponensi véleményemben „szerkezeti felismerhetetlenség” helyett a „strukturális identifikálhatóság” szókapcsolatot használom.

A közel 90 oldalas dolgozat felépítése példaértékű, rendkívül hasznosak a fejezetek elején olvasható vázlatos összefoglalások.

A dolgozat bevezetése jól definiálja és érzékelteti a paraméter identifikáció és az strukturális identifikálhatóság problémakörét. A fejezetet élmény olvasni, a szerző nagyon didaktikusan vezeti fel log-likelihood fogalmát. Ez a fejezet elsődlegesen a második tézist ismertető második vezeti fel, így számomra enyhe hiányérzetet kelt, ugyanis elmaradt az egyes fejezetekhez/tézisekhez kapcsolódó általánosabb és célirányosabb problémafelvezetés.

A második fejezet az első tézishez kapcsolódóan egy Bayes technikán alapuló módszert javasol az identifikálhatósági problémák megoldására. A fejezethez kapcsolódó legnagyobb értékének azt tartom, hogy rendkívüli alaposággal és igényességgel igazolja az OECD 308 kísérlet kapcsán hogy az identifikált paraméterek bizonytalansága jelentős mértékben csökkenthető külső információ bevonásával.

Az eredmények jelentőségét nem megkérdőjelezve, hanem elsődlegesen a további kutatásokat inspirálva szeretném felhívni arra a figyelmet, hogy a példa kapcsán is

- hasznos lenne figyelmet fordítani az identifikálhatóság „klasszikus” módon történő elemzésére, azaz a Fisher információs mátrix felírására és elemzésére,
- a mátrix sajátértékén és determinánsán alapuló identifikálhatóság minősítésére (A, D optimális kísérletek),
- esetleg a ma nagyon divatos Markov chain Monte Carlo (MCMC) módszert alkalmazni (példaként érdemes beletekinteni a Ensemble Kalman filter for dynamic state estimation of power grids stochastically driven by time-correlated mechanical input power címet viselő cikkbe),
- kiemelni, hogy a klasszikus paraméteridentifikációban a regularizáció eszköztárát is hasonló célok érdekében alkalmazzuk (ahol a Bayes módszerek szintén szerepet kapnak) és külső információt mint paraméter korlátokat is bevihetjük (melyre számomra a legszebb példa: Grey-box modelling and identification using physical knowledge and Bayesian techniques)

A harmadik fejezet egy szintén égető problémának megoldására, az adatok szisztematikus (mérési) hibáinak kezelésére fókuszál. A fejezet első része egy kiváló, elemző szemléletű értékelést ad a hidrológiai modellezésben alkalmazott hibakezelési eljárásokról, majd ismerteti a második és a harmadik tézis alapján adó, a szerző által kidolgozott zavart Ornstein-Uhlenbeck folyamatmodellre épülő eljárást, mely alkalmas a gyors és a lassú hibafolyamatok szimultán kezelésére. A módszer kiemelendő értéke, hogy a bizonytalanságokat figyelembe véve alkalmas előrejelzésekre.

Az eredmények jelentőségét nem megkérdőjelezve, hanem elsődlegesen a további kutatásokat ösztönözve szeretném felhívni arra a figyelmet, hogy

- érdemes lenne kiemelni, hogy az OU modelleket széles körben alkalmazzák állapotbecslési feladatokban,
- az OU modelleket szokás Particle Filter (PF) algoritmusokkal is alkalmazni (érdekes, ide vágó példa: Dynamic rating curve assessment in unstable rivers using Ornstein-Uhlenbeck processes),
- a PF algoritmusok alkalmazását azért is érdemes megfontolni, mert alkalmasak a nem normál eloszlású nulla várható értékű hibák kezelésére.
- a szerző által kifejlesztett algoritmus alapján hatékony hibadetektáló és idősor szegmentáló algoritmus fejleszthető.

A negyedik fejezet az ötödik tézis eredményeihez kapcsolódóan arra a rendkívül hasznos alapelvre épít, hogy a modell strukturális hiányosságainak kezelésére kiváló eszköz, ha a modell paramétereit időben változóknak tekintjük. A paraméterek folyamatos frissítésére egy bayesi tanulási technika kerül kidolgozásra. A kidolgozott szekvenciális bayesi tanulási technika alkalmazásával elkerülhető az identifikált paraméterek túlzott ingadozása.

A szerző felismeri, hogy új állapotváltozók bevonásával bár a modell komplexitása nő, több visszacsatolásra, azaz több információ bevonására nyílik lehetőség. A kérdést rendkívül alaposan járja körbe egy nyíltvízi ökoszisztéma egyszerűsített anyagforgalmát leíró modell kapcsán.

Az eredmények jelentőségét nem megkérdőjelezve, hanem elsődlegesen a további kutatásokat sugalmazva szeretném felhívni arra a figyelmet, hogy

- Időben változó modelleket széles körben alkalmaznak dinamikus rendszerek leírásában akkor, ha a rendszer időben változó és/vagy a modell összetettsége elmarad a rendszer komplexitásától. A megoldás „szélsőséges” megvalósítási módja az úgynevezett LTV rendszermodell (Linear Time-Varying Model)
- A folyamatos paraméter identifikációja hatalmas, a szerző által kidolgozott megoldás rekurzív paraméteridentifikációs algoritmusok osztályába esik.
- A rekurzív Bayes becslők már a 90-es évektől fejlődnek. Bár elsődlegesen a navigációs és nyomkövetési problémák kapcsán alkalmazottak, állapotbecslő eljárásokban is elterjedek.
- Az időben változó paraméterek becslésére állapotbecslő algoritmusok is alkalmazhatók (nem véletlen tehát, hogy OU modellekkel is történik a feladat megoldása (pl. Adaptive Sequential MCMC for Combined State and Parameter Estimation))

Az összefoglalás modellidentifikációval (tudatosan kerülöm a modell kalibráció szót, amely használatának okát érteni vélem, ugyanakkor nem sem az hazai irodalommal nem konform) kapcsolatos megállapításai a szóhasználatától függetlenül teljes mértékben helyesek és rendkívül fontosak.

A tézisekről:

Az első tézis megállapítása bár más területen ismert, hidrológiai rendszerek modellezése kapcsán rendkívül jelentős, a kidolgozott demonstrációs példával pedig olyan tudományos eredménynek tekinthető, amely ezen a területen MTA doktor a fokozat megszerzésének alapjául szolgálhat.

A második tézis fontos megállapítást tesz a modell paraméterek értelmezhetőségével kapcsolatban. A tézist elfogadom, ugyanakkor az eredmények jelentőségét nem megkérdőjelezve, hanem elsődlegesen a további kutatásokat inspirálva szeretném felhívni arra a figyelmet, hogy

- Fehér- és a szürke doboz modellekre épülő modellezési technikák kapcsán bevett gyakorlat, hogy nem csak a modellezés pontosságára, hanem a paraméterek értelmezhetőségére is figyelmet fordítunk és a paraméterekre vonatkozó korlátokkal, regularizációval, vagy netán bayesi eszköztárral keresünk kompromisszumot az értelmezhetőség és az előrejelzési képesség között.

A harmadik tézis az adatokban rejlő hibák és a modell szerkezeti hibáinak megkülönböztethetőségének vonatkozásában teljes mértékben helytálló megállapításokat tesz, így annak elfogadását javaslom.

Az eredmények jelentőségét nem megkérdőjelezve, hanem elsődlegesen a további kutatásokat inspirálva szeretném felhívni arra a figyelmet, hogy

- Már lineáris fekete doboz rendszerek kapcsán értelmezhető hibamodellek is lehetőséget adnak a hibák részleges elkülönítésére (lásd ARX (kimeneti hiba), Box-Jenkins modell)
- Állapottér alapú modellezésben a kimeneti egyenlet hibamodelljével szoktuk kezelni a mérési / adatokban rejlő hibát és az állapotátmeneti modell hibamodellkével szoktuk reprezentálni a modell struktúrában rejlő hibákat.

A negyedik tézist a dolgozat legfontosabb eredményének tartom.

Az ötödik, rekurzív identifikációra (szekvenciális tanulásra) vonatkozó tézist szintén olyan tudományos eredménynek tartom, amely az MTA doktora fokozat megszerzésének alapjául szolgálhat.

Az eredmények jelentőségét nem megkérdőjelezve, hanem elsődlegesen a további kutatásokat inspirálva szeretném felhívni arra a figyelmet, hogy

- érdemes folyamatosan minősíteni az új mérésekben rejlő információ tartalmát és ez alapján szabályozni a paraméterfrissítési folyamatot (pl. Fortescue módszere szerint, lásd: Adaptation and tracking in system identification—A survey, An adaptive forgetting strategy for on-line identification of multivariable processes)

A hatodik tézis véleményem szerint rendkívül fontos üzenetet hordoz a hidrológiai modellek fejlesztésével foglalkozók számára azzal, hogy felhívja a figyelmet a modellbizonytalanság kezelésének fontosságára.

A dolgozat és a szerző jelentős eredményeket ért el ezen a téren, a tématerület nemzetközi szinten is elismert kutatója, így a doktori munka tudományos eredményeit elegendőnek tartom az MTA doktori cím megszerzéséhez és a nyilvános védés kitűzését javaslom.

Kérdések: Opponensi véleményemben számos lehetőséget felvettem. Ezek számossága és összetettsége messze meghaladja azt a keretet, amely elvárható lenne, hogy a doktori eljárás kapcsán diszkutálásra kerüljenek. Mindezek alapján kérem, válasszon ki három olyan javaslatot, amelyet a fentiek közül hasznosnak tart és vizsgálja meg ezek alkalmazhatóságát, relevanciáját.

Veszprém, 2022. 11. 15.



Abonyi János
az MTA doktora