

Fuzzy operátoros módszerek alkalmazása az intelligens járműinformatikai rendszerekben

Előzmények, célkitűzések

Az intelligens járműinformatikai rendszerek folyamatos információt (diagnózist) biztosítanak a jármű műszaki és ezzel szoros összefüggésben a jármű menetbiztonsági állapotáról is. Ezzel kapcsolatban különleges jelentőséggel bír még az intelligens járműinformatikai rendszerek alkalmazása a baleset megelőzésben és a már bekövetkezett balesetek okainak feltárásában és részletes műszaki forgalmi vizsgálatával is.

Mindkét feladatban a közúti járműbiztonság növelésében, a baleset megelőzésben, ill. ezzel szoros összefüggésben a bekövetkezett közúti balesetek feltárásában és vizsgálatában különösen nagy szerepet játszanak a fuzzy logikán alapuló intelligens informatikai módszerek alkalmazása.

A járműinformatika területén éppúgy, mint más mérnöki területeken is a bizonytalanság és határozatlanság változékony formáival állunk szemben, amelyek a gyakorlat szempontjából megbízható és hatékony kezelést igényelnek. Mindez aktív szabályozástechnikai problémákat vet fel, amelyekben belül a fuzzy szabályozók használata ma már természetes lehetőség. Nemlineáris rendszerek modelljeinek komplexitás-redukálása általában, komplexitás-redukálás és a redundanciák kiirtása a szinguláris érték felbontás módszerével ennek éppúgy kézenfekvő lehetőségeit adja, mint az interpolatív megközelítések alkalmazása.

A jelen kutatás egyik fő célja volt a fentebb említett elsősorban a baleset megelőzéssel, menetbiztonsággal és a közúti balesetek feltárásával kapcsolatos új fuzzy operátoros módszereken alapuló intelligens járműinformatikai megközelítési módok és modellezési eljárások kidolgozása.

A fenti kutatásainkban ezért különösen nagy hangsúlyt fektettünk a sajátos fuzzy operátorok bevezetésére és alkalmazására az adott és a fentiekben jellemzett műszaki célkitűzéseknek megfelelően, ahol az így megkonstruálendő speciális fuzzy operátorok részben a fuzzy entrópia függvény újszerű értelmezésén alapulnak.

A járműiparban és az intelligens közlekedési rendszerek kialakításában közismert, hogy a képfeldolgozás és a gépi látás alkalmazása központi jelentőséggel bír, és kiemelkedő mértékben terjed. Ugyancsak jól ismert, hogy napjaink járműveinek aktív biztonsági rendszerei között számos képfeldolgozáson és gépi látáson alapuló alrendszer szerepel. Ezen alrendszerek vizuális információt hasznosítva avatkoznak be a jármű irányításába, ezzel redukálva a balesetek kialakulásának valószínűségét. Mivel a járműbiztonság területén a képfeldolgozással kapcsolatban elsősorban objektumok felismerése, azok azonosítása, követése elsődleges feladatnak tekinthető, nagy jelentősége van az objektumrészletek hatékony kiemelésének, a képi felbontás növelésének, ill. a képi információ minél hatékonyabb reprezentációjának. Fentebb említett előzetes kutatásaink mind a képi információ reprezentációjával mind pedig, a képi felbontás növelésével kapcsolatosan eredményesnek bizonyultak, melyeknél a kanonikus reprezentációk központi szerepet kaptak.

Előzetes kutatásaink is egyértelműen azt támasztották alá, hogy a nemlineáris rendszereket közelítő kanonikus reprezentációkat alkalmazva tetszőleges n változós függvény nagyságrendekkel kevesebb számú egyváltozós függvény segítségével írható le hasonló pontossággal, mint ortogonális polinomok vagy trigonometrikus függvények alkalmazása esetén.

Közismert, hogy az Európai Unió elvárások egyik legkiemeltebb célkitűzése a közúti utas biztonság színvonalának jelentős javítása különös tekintettel a halálos és súlyos balesetek számának radikális csökkentésére. Ezen a feladaton belül jelentős szerepet játszik a súlyos

közúti járműbalesetek elemzése, melynek alapja egyrészt a deformált járműtestek eredményes képfeldolgozása, másrészt a nemlineáris nagy alakváltozású deformációk a bonyolult energia eloszlások modellezése erre alkalmas nemlineáris rendszerleírási eljárások segítségével. Az új kifejlesztendő kanonikus rendszer reprezentációk és a hozzájuk kapcsolódó intelligens eljárások itt is újszerű és hatékony megközelítésnek, módszernek tekinthetők.

Az eredmények összefoglaló megadása

Fuzzy operátoros módszer a baleseti modellezésben

Olyan abszorváló normákat mutattunk be, amelyek sem nem nullnormák, sem nem uninormák. A mérnöki alkalmazásokban használható „approximate reasoning” által kielégítendő régi axiómarendszer oldását vezettük be. Míg az irodalomban már nagyjából tisztázott, hogy Mamdani következtetési mechanizmusa milyen feltételek mellett elégíti ki a régi axiómarendszert, kérdéses maradt, hogy a hasonlósági mértékeken alapuló „approximate reasoning” milyen feltételek mellett elégíti ki az új axiómákat [1-7].

Kutatásaink során az általánosabb, nemcsak járművekkel kapcsolatos modellezésre és mérésekre való alkalmazásokat céloztuk meg. Ezzel kapcsolatos egyik eredményünk az ún. „kettes típusú fuzzy halmazokon” végezhető uninorma- és távolságalapú fuzzy műveletek bevezetése volt [24-28]. Ezzel a témakörrel az általunk eddig fellelhető irodalomban napjainkig érdemben nem igen foglalkoztak. E speciális fuzzy halmazok egy újabb paraméter vagy egy újabb dimenzió bevezetésével képesek reprezentálni a fuzzy tagsági függvényértékek bizonytalanságát is. Ezzel mintegy feloldják a „hagyományos” „egyes típusú fuzzy halmazok” alkalmazásakor felmerülő paradox helyzetet, nevezetesen azt a körülményt, hogy maguk a tagsági értékek precíz valós számok. A vizsgálatok eredményei szerint e műveletek jól alkalmazhatók a jelfeldolgozásban, ahol a hosszabb ideig tartó kísérletek tapasztalatai beépíthetők a jel erősségét jellemző fuzzy tagsági függvényekbe, így az érzékelők, szenzorok biztonsági mértékét is jól érzékeltethetik. Egy kimondottan praktikus lehetőség a sztochasztikus hibamérések második szintű bizonytalanságainak kezelése „Stochastic Adding A/D Conversion” segítségével [27]. Külön vizsgáltuk a távolság alapú operátorokkal történő, fuzzy mértéken alapuló „közelítő gondolkodás” („Approximate Reasoning”) módszerének kifejlesztettségét. A kettes típusú fuzzy halmazokon távolságalapú fuzzy műveletek segítségével végzett közelítő gondolkodási folyamat speciális 3D reprezentációját dolgoztuk ki, amelyben a Mamdani-típusú „fuzzy approximate reasoning” felhasználja a fuzzy halmazok „fuzzy voltának mértékét” a megfigyelt szabályok súlyozásában [43] [44]. Mivel a távolság alapú operátorok kielégítik a legtöbb megkövetést, amit általában a paraméteres operátorokra is szokás kiróni, fuzzy mértékeken alapuló integrálokat vezettünk be, és bemutattuk, hogy az ezeken alapuló gondolkodás („reasoning”) hasonlít a fuzzy szabályozókon alapuló gondolkodással.

A korszerű, alacsonyabb szintű járműirányítási feladat komplexitásának redukálását tenzorszorzat transzformációs bázison alapuló irányítási modellek kutatásával folytattuk. A tenzorszorzat transzformációs nemlineáris modellezésben sikerült kimutatnunk, hogy a „magasabb rendű szinguláris érték felbontással” (HOSVD) reprezentált lineáris paraméterváltozós (LPV ~ Linear Parameter Varying) rendszerek gyakorlati szempontból igen szélesnek tekinthető függvényosztályokra nézve kanonikus reprezentációnak tekinthetők, mivel aszimptotikusan ortonormált rendszerkomponensekből állíthatók elő. Az így kapott kanonikus alakok numerikus rekonstrukciójára kidolgozott tételeket és bizonyításokat már rangos IEEE konferenciákon és nemzetközi folyóiratokban publikáltuk [22] [29] [47] [48] [53]. Módszerünk a korábbi analitikus típusú LPV irányítási, modellezési megközelítésekhez képest azzal az előnnyel jár, hogy uniform, automatikusan jól kivitelezhető és a robusztus

irányítást (a jobb irányíthatóságot és megfigyelhetőséget) meghatározó konvex burkok manipulálására megítélésünk szerint kreatív eszköztárat jelent. A hagyományos LPV modellek ugyanis szinte mindig egyedi és általában bonyolult matematikai erőfeszítések árán kapnak „egzakt megoldásokat”, melyek numerikus realizálásuk miatt a gyakorlatban mégiscsak közelítő jellegűek maradnak. Megközelítésünk másik jelentős előnye lehet a jövőben, hogy az, hivatkozva a korábbi egzakt jellegű analitikus modellezési megoldások és a heurisztikus módszerek között (fuzzy logika, neurális háló, evolúciós algoritmusok, bakteriális módszerek, stb.) illetve identifikált rendszerek irányítási rendszermodelljei között (numerikusan orientált módszerek). A HOSVD tenzorszorzat transzformációs kanonikus formák hatékony előkészítést biztosítanak a lineáris mátrixegyenlőtlenségekkel megalapozott irányítástervezés számára [3] [4] [29] [52].

A komplexitás csökkentés alternatív lehetőségeként a szabályozó rendszerről csak nagyon hozzávetőleges a priori információt igénylő, teljes és általános modell helyett csupán tentatív és részleges modellel operáló fixpont transzformáción alapuló adaptív irányítást dolgoztunk ki. Működését Single Input, Single Output (SISO) rendszer esetén a dinamikus súrlódási hatásainak kompenzálásával mutattuk be a Variable Structure / Sliding Mode (VS/SM) módszerrel összehasonlítva. Az SVD módszerének geometriai értelmezése alapján a módszert általánosítottuk Multiple Input, Multiple Output (MIMO) rendszerekre is [18-20].

Továbbfejlesztettük a valós idejű járműirányítást megalapozó összetett vizuális felismerő rendszerekre vonatkozó modellünket is. Sztereo látáson alapuló eljárást dolgoztunk ki térbeli felületek valós idejű mérésére, amelyet a későbbiekben a jármű környezetének felmérésére kívánunk alkalmazni [47-50]. Nagy hangsúlyt fektettünk az eljárás komplexitásának csökkentésére, amely lehetővé tette a személyi számítógépen való valós idejű működést. Ezzel szoros összefüggésben az implementálás hatékony teljesítménymodelleket is javasoltunk [33] [34]. A komplexitás csökkentésénél a kamerák által regisztrált rekonstruálandó képpontok tárolására olyan adatstruktúrákat alkalmaztunk, melyek lehetővé tették a gyors adathozzáférést, lehetőséget adva így a méréseknél felmerülő mérési hibák approximációs eljárásokkal való valós idejű korrekciójára. Eljárást dolgoztunk ki a csökkentett fényviszonyok melletti hatékony objektumdetektálás elősegítésére. Ennél a módszernél a különböző expozíciós idővel készült képek által hordozott információt szegmentálási módszerek valamint keverő függvények alkalmazásával egyesítettük [35] [49] [41].

Legfontosabbnak tartott kutatási eredmények összefoglalása

I. Nemlineáris rendszerek kanonikus reprezentációi tenzorszorzat modellek magasabb rendű szinguláris értékdekompozíción alapuló megadásával

Mint már említettük a fuzzy operátoros megközelítések mellett fontos célkitűzésnek tekintettük egy olyan elméletileg és matematikailag is korrekten megalapozott módszer kidolgozását, amely alkalmas az ismert analitikus megközelítések és az intelligens, heurisztikus (fuzzy) modellezések között meglévő jelentős „szakadék” áthidalására a nemlineáris rendszerek identifikációjában [37] [39].

Erre megítélésünk szerint az egyik legalkalmasabb eszköznek mind szemléleti mind pedig, matematikai szempontból a HOSVD bázison alapuló tenzorszorzat modellek kanonikus formáinak kidolgozása tűnt. Ez a megközelítés ugyanis szorosan összefügg a legfejlettebb az intelligens megközelítésekben alkalmazott fuzzy irányítási modellekkel miközben az alábbiakban közölt kanonikus reprezentációk megadásával közvetlen kapcsolatba hozható az LPV rendszereket approximáló leghatékonyabb analitikus modellekkel is. Így különleges szemléleti és talán ismeretelméletileg is értelmezhető funkciót tölthet be az intelligens és az

analitikus megközelítések között. Egészen röviden az így kapott fő eredményünk a következőkben foglalható össze.

Legyen adott az alábbi lineáris paraméterváltozójú (LPV) állapotter modell (lásd [53] – 1. egyenlet):

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{pmatrix} = \mathbf{S}(\mathbf{p}(t)) \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix}$$

Az $\mathbf{S}(\mathbf{p})$ rendszermátrix tenzorszorzat formájában az alábbi módon adható meg [53]:

$$\mathbf{S}(\mathbf{p}) = \mathcal{S} \boxtimes_{n=1}^N \mathbf{w}_n^T(p_n)$$

melynek az LPV állapotter modellbe való helyettesítésével az alábbi adódik (lásd [53] – 2. egyenlet):

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \mathbf{y}(t) \end{pmatrix} = \left(\mathcal{S} \boxtimes_{n=1}^N \mathbf{w}_n^T(p_n(t)) \right) \begin{pmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}(t) \end{pmatrix}$$

Magasabb rendű szinguláris értékdekompozíció alkalmazásával módszert adtunk a tenzorszorzatban található ún. magtenzor és az ortonormált súlyfüggvények numerikus meghatározására. Az ortonormált bázist alkotó súlyfüggvények az N dimenziós rendszermátrix magasabb rendű szinguláris értékdekompozícióján keresztül megkaphatók [53]. A dekompozíció eredménye-ként egy N dimenziós ún. magtenzor és minden dimenzióhoz egy ortonormált mátrix adódik. A súlyfüggvények diszkrétizált formái ezen mátrixok oszlopaival feleltethetők meg. A magasabb rendű szinguláris értékdekompozíció tulajdonságainak köszönhetően, a hatékony rendszerreprezentáció mellett bonyolult rendszerek hatékony komplexitás-csökkentésre is lehetőség nyílik [37] [41] [52].

A fentiekben kapott új LPV polytopikus modellek kanonikus reprezentációit jól alkalmaztuk az intelligens járműinformatika különböző területein.

II. Intelligens módszerek a járműütközési folyamatok identifikációjában

Az EU útjain évente mintegy 1,3 millió közlekedési baleset történik, ezek több mint 40000 halálos áldozatot és 1,7 millió sérültet követelnek. Az EU által 2001-ben kiadott „Fehér Könyv” irányelveinek megfelelően az akkori adatokhoz képest 2010-re 50%-kal kell csökkenteni a közlekedésbaleseti halálesetek számát (hazánkra némileg enyhébb szabályozás vonatkozik, 2010-ig 30%-kal, 2015-ig 50%-kal kell csökkenteni ezen értéket). A csökkenés elsősorban a közlekedési morál javításával érhető el, de igen nagy szerepük van az egyre fejlődő járműbiztonsági rendszereknek is. Ez magába foglalja mind az aktív biztonság (baleset megelőzés, vezetési kultúra), mind a passzív biztonság (a megtörtént balesetben lehetőleg minél kisebb emberi sérülés történjen) növelését. A gyártók mind az aktív, mind a passzív biztonsági rendszereket fejlesztik. Az aktív biztonsági rendszerek közé sorolhatók a többi jármű mozgását és az útviszonyokat is elemző intelligens járművezérlési rendszerek, míg a passzív biztonsági rendszerek közé tartoznak a biztonsági öv, a különféle légszákok, és az ún. energia elnyelő elemek, energia elnyelő zónák. Ez utóbbiak az ütközés előtti mozgási energia átalakulásakor keletkező deformációs energia elnyelésére szolgálnak, így megóvják az utasteret az ütközés súlyosabb következményeitől, legalábbis egy bizonyos sebesség határáig.

A felsoroltak mindegyikének fejlesztése rendkívül bonyolult mérnöki feladat, melyek megoldásában felhasználják a tapasztalati adatokat, a vizsgált rendszert legalább közelítőleg

leíró matematikai modelleket, és természetesen a szimulációs eljárások eredményeit. A tapasztalati adatok származhatnak valódi balesetekből, ekkor viszont csak kevés paraméter ismert, és ezek értéke is bizonytalan. Ezért megfelelőbb, ha jól megtervezett, ismert paraméterekkel rendelkező, legalább elvileg megismételhető törési próbákat hajtanak végre. Ennek során a vizsgált jármű és az ütközési folyamat minél több paraméterét regisztrálják, majd az elméleti szimulációs modell viselkedését az itt mért adatokkal hasonlítják össze. Ezek a kísérletek azonban egyrészt rendkívül költségesek, évente csak néhány ezret végeznek el belőlük, másrészt a rendszer minden egyes paraméterét szinte lehetetlen egyszerre mérni az ütközési folyamat igen rövid időtartama alatt. Ezért az egyes részfolyamatokra és azok paramétereire vonatkozó modellezési eljárások és becslési módszerek kiemelt fontosságúak.

FEM ÉS ENERGIAHÁLÓ ALAPÚ MODELLEK

A deformációs energiát leíró, a mai napig használt módszerek két fő csoportba sorolhatók. Az elsőt alkotják a véges elemes módszerek (FEM), melyek általában igen pontosak és jól használhatóak a deformációs folyamat modellezésénél, viszont igénylik a járműtest és az ütközés paramétereinek rendkívül aprólékos ismeretét, amely az esetek nagy részében nem áll rendelkezésünkre. Ezen felül, ha kellően pontos eredményeket szeretnénk, akkor a módszer komplexitása is igencsak megnő.

A véges elemes szimulációkban a gépkocsi modellje ritkán tartalmaz 500 000 elemnél kevesebbet. A modell időfüggő dinamikai folyamatot ír le, és számos érintkezési feltételt kell kezelnie. A számítások nemlineáris anyagtörvényeket kell alkalmazni, hiszen az ütközés során az egyes alkatrészek képlékeny alakváltozást szenvednek. Ráadásul a nagy sebességgel lejátszódó folyamat miatt az anyagjellemzők még az alakváltozás sebességétől is függenek. A futtatás során hatalmas mennyiségű adat keletkezik (pl. minden csomópontban 3 elmozdulásérték, a feszültségtenzor 9 eleme, stb.), és egy modell több 100 000 csomópontból áll. A deformációs energia eloszlását, az egyes részek által elnyelt energia mennyiségét az így számított értékekből (erő, elmozdulás) határozzák meg, természetesen sok más jellemzővel együtt.

A differenciálegyenleteken alapuló véges elemes leírás általános, minden területen használható modellt eredményez, bár ez a modell rendkívül bonyolult és nagy számításigényű. Azonban itt is komoly szerepet kap a heurisztika, a mérnöki tapasztalat, pl. a véges elem háló megalkotásában.

A deformációs energiát meghatározó módszerek másik csoportjának az úgynevezett "energiaháló" alapú modelleket tekinthetjük. A FEM alapú leíráshoz képest ezek a csak egy konkrét részproblémát (energia eloszlás) kezelő heurisztikus modellek jóval kisebb komplexitásúak, de természetesen nem nyújtanak teljes körű leírást a jármű deformációjáról. Ezek jól megtervezett, ismert (laboratóriumi) körülmények között elvégzett törésvizsgék eredményein alapuló, alacsony komplexitású modellek. Általában a maximális deformáció, a maradandó deformáció és a deformáció alakja alapján határozzák meg az elnyelt energiát általában viszonylag egyszerűbb összefüggések alapján.

A DEFORMÁCIÓS FOLYAMAT HEURISZTIKUS MODELLE

Olyan modellt szeretnénk alkotni, amely a teljes deformációs folyamat során információt nyújt az elnyelt energia eloszlásáról és nem csak a végeredménnyel foglalkozik [15] [16] [17] [37]. A törésvizsgétekből és a balesetek elemzéséből az alábbiakra lehet következtetni:

- Egy-egy cella energia elnyelő képessége a deformációs folyamat során nem jellemezhető állandó értékkel.

- A cellák energia elnyelő képessége erősen irányfüggő: előfordulhat, hogy egyik irányban könnyebben, míg más irányban jóval nehezebben deformálhatóak.
- Bizonyos esetekben fontos lehet szomszédos cellák közötti energiaterjedés (nyíróerők).

A fentieknek megfelelő modell rövid leírása a következő: tekintsük a járműtest kétdimenziós derékszögű rácshálójával történő felbontását (felülnézetből, a jármű hossz tengelyével párhuzamos és arra merőleges élekkel). A felosztást az egyes részek energia elnyelési képességét figyelembe véve tesszük meg úgy, hogy egy-egy cella közelítőleg homogén legyen. A felbontást természetesen három dimenzióban is megtehetjük, ekkor a járműtestet a felülnézeti kép mélységében is cellákra osztjuk fel.

A deformációs energia modellezéséhez minden egyes cellához rendelhetünk egy-egy függvényt, amely leírja az adott rész energia elnyelési tulajdonságát. A deformáció során a cella elnyelési képessége erősen változhat, bizonyos mennyiségű elnyelt energia után hasonló mértékű deformáció csak jóval nagyobb energia befektetéssel érhető el, vagyis a cella tulajdonképpen telítődni kezd. Ezen jelenség leírására egy monoton csökkenő függvényt választunk: a cella a beérkező energia egyre kisebb hányadát képes elnyelni, a többi egyszerűen átfolyik rajta, és a szomszédos cellák bemenetét képezi. Egyszerű választás lehet egy szakaszonként lineáris vagy szigmoidszerű függvény. A pontosabb közelítés érdekében akár vehetjük néhány ilyen típusú függvény konvex kombinációját is. A cella által elnyelt energia tulajdonképpen az így definiált elnyelési függvény integráljaként adódik. Tény, hogy a járműtest felosztásával kapott cellák energia elnyelési tulajdonsága erősen irányfüggő: a cellát valamilyen irányban könnyű, míg egy másik (pl. az előzőre merőleges) irányban jóval nehezebb deformálni, vagyis hasonló mértékű deformáció eléréséhez jóval nagyobb bemeneti energiára van szükség. Ezért célszerűnek tűnik minden egyes cellához több, a szóba jöhető ortogonális irányoknak megfelelő függvényt definiálni. Célszerű itt a felosztásnál alkalmazott rácsháló tengelyeivel párhuzamos irányokat használni. Ezen irányok fogják szolgáltatni a rácstengelyekkel nem párhuzamos külső hatások felbontásával keletkező komponensek irányait is, így ferde ütközés esetén az energiaeloszlás az egyes komponensek hatásainak összegeként értelmezhető.

A közúti balesetek jelentős része a frontális ütközés valamely formája (teljes vagy részleges átfedéssel), így szükséges ezzel külön is foglalkozni. Teljesen átfedő ütközésnél a jármű teljes szélességében roncsolódik (pl. fálnak vagy másik járműnek csapódik). Ekkor az energiaterjedés folyamata leírható az egymás mellett álló cellák közötti energiaátvitel elhanyagolásával is, hiszen a deformációs energia nagy része becsapódás irányának megfelelően az egymás mögött álló cellákon halad végig.

Részlegesen átlapoló ütközés esetén (pl. fának ütközik a jármű) viszont fontos szerepet kap az egymás mellett álló cellák közötti energiaátvitel is, tulajdonképpen a külső hatás által deformált cella húzza maga után a vele szomszédosakat. Ezt a hatást a következőképpen vehetjük figyelembe: egy cella által átengedett energia (a bejövő és az elnyelt különbsége) a vele szomszédos cellákkal való kapcsolatának szorosságát jellemző súlyok arányában oszlik el a szomszédjai között.

A DEFORMÁCIÓS FOLYAMAT FUZZY MODELLJE

Az előző részben leírtak megvalósíthatók a felosztott járműtesthez rendelt fuzzy szabálybázis segítségével is [16] [39]. Ebben az esetben az egyes cellákhoz nem energia elnyelési függvényt rendelhetünk, hanem a cella éppen aktuális, energiaeelnyelés szempontjából lényeges tulajdonságát, vagyis azt, hogy milyen mértékben képes még energia elnyelésére. Általában persze a cella valamilyen köztes állapotban van a 'telített' és az 'üres' állapotok között, melyet jellemezhetünk úgy is, mint bizonyos mértékben 'telített' és bizonyos

mértékben 'üres'. Ezek után a cellák ezen szélsőséges állapotaihoz rendelhetünk szabályokat, úgy kezelve az energiaátvitelt, mintha az kvantumokban történe:

- Ha egy cella 'üres', akkor a következő inputot elnyeli.
- Ha egy cella 'telített', akkor a következő inputot áttereszti.

Egy ilyen szabálybázist szemléltet három egymást követő cella esetére a 1. táblázat. Itt E az üres, S a telített cellát jelöli, a konzekvens részen 0, ha az adott cella átengedi az inputot és 1, ha elnyeli. Ezen szabályokból Takagi–Sugeno fuzzy következtetési eljárással kaphatjuk meg az általános esetre érvényes formulát.