ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA Elektronikus folyóirat
MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS * ÁLLAPOTELLENŐRZÉS 2012/4

ELEKTROMÁGNESES ELVŰ RONCSOLÁSMENTES ANYAGVIZSGÁLAT ADAPTÍV HÁLÓ-ADATBÁZISSAL
ADAPTIVE MESH-DATABASE FOR ELECTROMAGNETIC NON-DESTRUCTIVE TESTING

KISS IMRE, GYIMÓTHY SZABOLCS

***Kulcsszavak**: háló-adatbázis, hiba rekonstruálás, inverz probléma, örvényáramú vizsgálat*
***Keywords:** defect reconstruction, inverse problem, mesh-database, eddy-current testing*

ABSZTRAKT

Adaptív mintavételezésen és szimplex-hálófinomításon alapuló módszert mutatunk be a roncsolásmentes anyagvizsgálat inverz feladatának hatékony megoldására. Az így létrejött háló-adatbázis a direkt probléma egyfajta általánosított interpolátorának tekinthető. Hogy az interpolációhoz optimálisan mintavételezett adathalmaz álljon rendelkezésre, fizikai rugórendszeren alapuló hálógenerálási módszereket alkalmaztunk. A tapasztalat szerint az ilyen módon létrehozott háló-adatbázisok lényegesen jobb interpolációs tulajdonságokkal bírnak, mintha egyenletesen vennénk fel az adatpontokat. Az új módszert sikerrel teszteltük egy szimulált örvényáramú anyagvizsgálati feladaton.

ABSTRACT

An adaptive sampling method based on simplex-mesh refinement is proposed for creating a database that facilitates the inverse problem solution in NDT. The resulting database is used as a generic interpolator of the forward problem. In order to obtain optimal sampling for the purpose of interpolation, physically based mesh generation technique relying on spring analogy is utilized. Obviously, the optimized database provides high interpolation quality comparing to regular grid databases, as is demonstrated on a simulated eddy-current testing problem.

1. BEVEZETÉS

Az iparban alkalmazott roncsolásmentes anyagvizsgálat célja nem csak az anyaghibák felderítése, hanem a hiba paramétereinek minél pontosabb rekonstruálása akár a gyártás folyamán, akár egy eszköz vagy berendezés későbbi felülvizsgálatánál. Az örvényárammal végzett anyagvizsgálat (*eddy-current testing*, ECT) elsősorban vezetőképes anyagok hibáit (repedés, zárvány, stb.) képes kimutatni. Igen elterjedt vizsgálati módszer, hogy egy a munkadarab közelébe helyezett, váltakozó árammal táplált tekerccsel örvényáramot keltenek, és mérik a tekercs impedanciájának változását, miközben azt a munkadarab felett mozgatják. A rekonstrukciós (inverz) feladat az anyaghiba paramétereinek meghatározása a mért impedancia jel alapján.

{kiss, gyimothy}@evt.bme.hu

Az anyaghiba rekonstrukció nagymértékben gyorsítható, pontosítható és automatizálható, ha a rekonstrukciót számítógép végzi oly módon, hogy az anyaghiba-prototípusok impedancia-jelét szimulálja (pl. végeselem módszerrel). Mivel a szimuláció rendszerint időigényes, ugyanakkor az iparban követelmény a gyors rekonstrukció, ezért célszerű létrehozni egy adatbázist a néhány prototípusra előre kiszámított adatokból, és erre alapozva valamilyen interpolációs módszerrel közelíteni a szimuláció eredményét. Belátható azonban, hogy az anyaghiba-rekonstrukció pontosságát nagymértékben befolyásolja, hogy mely anyaghiba-prototípusokra vonatkozóan tartalmaz adatokat: túl kevés adat pontatlanságra vezet, túl sok adat pedig nehezen kezelhető, illetve nehezen állítható elő.

Az itt bemutatott új típusú adatbázis adatpontjait egy az anyaghiba-paraméterek *n*-dimenziós terében létrehozott szimplex-háló csúcsai alkotják. A hálót adaptív módon generáljuk úgy, hogy optimális interpolációs tulajdonságokkal rendelkezzen [1]. A hálógenerálás komoly technikai problémákat vet fel nem csak az *n*-dimenziós általánosság miatt, hanem azért is, mert az optimális háló anizotrop, és ilyen magas követelményeknek megfelelő hálógeneráló szoftver tudomásunk szerint nem létezik, illetve nem hozzáférhető. A háló-adatbázist ezért a paraméter-tér helyett egy absztrakt ún. kontroll-térben generáljuk adaptív finomítással. A két tér között a háló mozgatásával (rúgó-analógia), valamint lokális transzformációval teremtünk kapcsolatot [2]. Az elkészült adatbázist sikerrel használtuk fémlemezben lévő repedés rekonstruálására.

1.1 AZ ANYAGVIZSGÁLAT INVERZ FELADATA

Matematikai szempontból az anyaghibának az ECT mérési adatokból történő rekonstrukciója egy ún. inverz probléma. Az *inverz probléma* elnevezés onnan eredeztethető, hogy ez esetben mindig létezik egy ún. *direkt probléma* (az angol nyelvű szakirodalom a *direct* mellett a *forward* jelzőt is használja), amelynek az előbbi a „fordítottja”. A direkt probléma esetében a bemenet (ismert mennyiségek) és a kimenet (meghatározandó mennyiségek) között matematikailag leírható és kiértékelhető összefüggés van (pl. parciális differenciálegyenlet formájában), továbbá a probléma megoldása – fizikai probléma esetében tipikusan – egyértelmű. Az inverz feladatra ezzel szemben többnyire nincs közvetlen matematikai modell, és a megoldása sem egyértelmű – ha létezik egyáltalán.

A vizsgált elektromágneses elvű roncsolásmentes anyagvizsgálat direkt problémája a következő: adva van egy konstrukció geometriája, az anyagjellemzők értékei, továbbá a gerjesztések; ebből meghatározandók a kialakuló elektromágneses tér bizonyos jellemzői. A matematikai összefüggést természetesen a Maxwell-egyenletek szolgáltatják. A numerikus megoldásra többek között a végeselem módszer (*finite element method*, FEM) használható, de történetesen az örvényáramú anyagvizsgálatban más, az integrálegyenleteken alapuló módszerek terjedtek el inkább (l. pl. [4]). A kapcsolódó inverz probléma esetében viszont éppen az elektromágneses tér bizonyos jellemzőit ismerjük, és ebből kell meghatározni az ismeretlen objektum geometriáját, anyagjellemzőit, vagy az elektromágneses teret létrehozó forrásokat.

1.2 Modell alapú rekonstrukció

Még a kvantitatív roncsolásmentes anyagvizsgálatnak sem célja az anyaghiba minden részletre kiterjedő jellemzése; általában megelégszünk egy közelítő leírással. Ennek érdekében az anyaghiba egyszerűsített modelljével dolgozunk, amely véges számú paraméterrel jellemezhető. Példának okáért mondjuk feltehetjük, hogy az anyaghiba jó közelítéssel téglatest alakú, homogén kitöltésű objektum, amely leírható a méreteivel, az orientációjával, a pozíciójával, és a kitöltő anyag jellemzőivel. Ez az anyaghiba egyik lehetséges rekonstrukciós avagy inverziós modellje. A modellalkotás egyik előnye, hogy ezáltal a mérés számítógéppel szimulálhatóvá válik. A másik, legalább ennyire fontos előny, hogy alkalmasan megválasztott modell segítségével egy gyengén meghatározott inverz feladatot jól meghatározottá tehetünk, azaz úgymond *regularizálhatunk*.

Általában a mért jel is valamilyen diszkretizált formában áll rendelkezésünkre: ha például időfüggvényről van szó, akkor időbeli mintákkal, ha pedig impedancia-pásztázásról, akkor a diszkrét térbeli pontokban mért impedanciaértékekkel adható meg. Ha ezt összevetjük az előbbiekben bevezetett anyaghiba-modell paramétereivel (és eltekintünk a konstrukciót jellemző egyéb, ismert paraméterektől), akkor a direkt probléma egy olyan függvénykapcsolatnak vagy *operátornak* tekinthető, amely a véges *n* számú modellparaméterhez megadja a mért jel véges *m* számú értékét (a gyakorlatban általában $n < m$). Az inverz probléma formálisan ennek megfordítását jelentené (l. előző bekezdés).

Az imént tárgyalt modellalapú rekonstrukció sémája az 1. ábrán látható. A direkt probléma *f* operátora (a továbbiakban röviden *direkt operátor*) tehát transzformációt ír le az *n*-dimenziós *X paraméter-térből* az *m*-dimenziós *Y adat-térbe*, vagyis röviden $f : X \to Y$, ahol $x \in X \subset R^n$ a modellparamétereket, $y \in Y \subset R^m$ pedig a mért jelet reprezentálja. A teljes *X* paraméter-tartomány transzformált képe az adat-térben általában hiperfelületet képez. Az anyaghiba-rekonstrukció inverz problémája ennek értelmében úgy is felfogható, hogy keressük a mérés által szolgáltatott adatponthoz legközelebb eső pontot ezen a hiperfelületen (a mérési zaj miatt a mért pont általában nem esik pontosan a felületre), és az ehhez a ponthoz tartozó paraméter-értékek szolgáltatják a megoldást. A direkt operátort valamilyen numerikus térszámítási eljárással modellezhetjük (másképpen szólva „realizálhatjuk") [4].

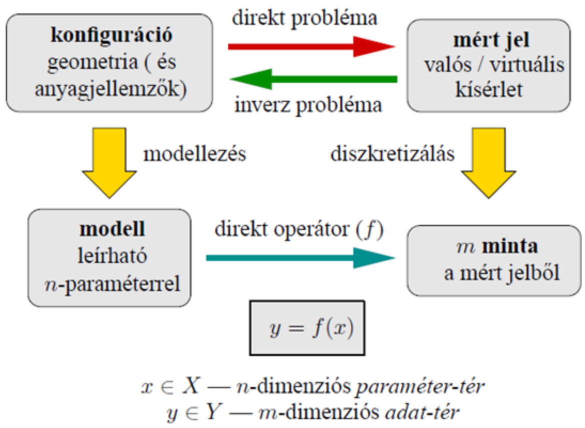

Fig. 1: *A modellalapú rekonstrukció vázlata. / Model based reconstruction.*

2. Anyaghiba-rekonstrukció optimalizált háló-adatbázissal

Az előző szakaszban láthattuk, hogy akár optimalizációs alapú, akár adatbázis alapú rekonstrukciót végzünk, szükség lehet az előzőleg kiszámított adatpontok – az *f* operátor *mintái* – közötti interpolációra. A többváltozós, többkomponensű, szórt mérési adatok közelítésére a mérnöki gyakorlatban elterjedten használják a szimplexhálón történő interpolációt.

A *szimplex* definíció szerint az *n*-dimenziós térben $n+1$ pont által kifeszített legegyszerűbb konvex test. A szimplex-háló értelemszerűen ilyen építőelemekből épül fel úgy, hogy a szimplexek csúcsaikkal, éleikkel, lapjaikkal, stb. konform módon illeszkednek egymáshoz. A közös csúcsokat a háló csomópontjainak (*node*) nevezzük.

A mérési adatainkat a következőképpen foglalhatjuk hálóstruktúrába. Minden egyes mérésnek megfeleltetünk egy pontot a mérés független, azaz bemenő paraméterei által kifeszített absztrakt *n*-dimenziós térben. Ezen pontokra mint csomópontokra szimplex-hálót illesztünk valamely ismert hálógeneráló algoritmus segítségével [3]. Végül a háló csomópontjaihoz hozzárendeljük a mérés eredményét, azaz kimenő adatait. Ezt a struktúrát a továbbiakban *háló-adatbázisnak* nevezzük.

A szimplex-háló könnyen lehetővé teszi, hogy a mérés kimenetét közelítsük a közbülső – tehát az adatbázisban nem szereplő – paraméterértékekre is. A közelítés legtermészetesebb módja a szimplexenként, azaz tartományonként lineáris (*piecewise linear*, PL) interpoláció, amely a szimplex $n+1$ csomópontjában „tárolt” értékek alapján képezhető. Bizonyos esetekben előnyös lehet a tartományonként állandó (*piecewise constant*, PC) közelítés is, amely a legegyszerűbb esetben a legközelebbi szomszédos csomópont (*nearest neighbor*, NN) értéke.

Ilyen típusú háló-adatbázist már korábban is sikerrel alkalmaztak roncsolásmentes anyagvizsgálati feladat megoldására [7]. Az adatbázisokat többek között neurális hálózatok betanítására is használták, amelyek az anyaghibák rekonstruálásakor sokkal pontosabb eredményt adtak, mintha ugyanennyi véletlenszerűen, vagy a paramétertérben egyenletesen felvett mintával végezték volna a betanítást [8]. Jelen cikk újdonsága az a hálógenerálási algoritmus, amellyel a korábbiaknál sokkal jobb minőségű adatbázis hozható létre, és amelynek részletes leírása a 2.3 szakaszban található.

2.1 Optimálisnak az adatbázis optimális kialakítása

tartjuk a hálóadatbázist, ha a lehető legkevesebb adatpont alkalmazása mellett az interpolációs hiba kisebb marad egy bizonyos küszöbértéknél a háló által lefedett paraméter-tartomány bármelyik pontjában. Formulával kifejezve:

$$\max_{x \in X} \left\| f(x) - g(x) \right\| < \delta \tag{1}$$

ahol *f* a korábban bevezetett direkt operátor, *g* ennek közelítése (az „interpolátor”), $\Omega \subset X$ jelöli a szóbajövő paraméter-kombinációk halmazát (gyakran egy hiperkocka a paraméter-térben), $\|\cdot\|$ pedig egy megfelelően választott (pl. euklideszi) norma.

A δ küszöbértéket praktikusan a mérés pontosságával hozzuk összefüggésbe. Ebbe a küszöbértékbe sűrítünk bele minden olyan hatást, amely a mérés, ill. szimuláció során – mint véletlenszerű folyamat – torzíthatja a kapott eredményeket. Ide tartozhat a mérési zaj éppúgy, mint a numerikus számítás pontatlansága.

Mivel az anyaghiba-paraméterek gyakran egészen különböző jellegűek (pl. geometriai méret, anyagjellemző, stb.), az interpoláció szempontjából optimális felosztás szükségképpen anizotrop. Az optimális adatbázis kialakításához tehát anizotrop – azaz optimálisan torzított szimplexeket tartalmazó – háló szükséges [1]. Belátható ugyanis, hogy az interpolációs hiba egyenletessé tételéhez a kevésbé érzékeny paraméterirányok mentén a szimplex oldalainak elnyújtottabbnak kell lenniük, míg más irányokban, amelyek mentén sokkal érzékenyebb a kimenet a kis változásokra is, rövidebb élek szükségesek.

Bár elvileg lehetséges ilyen háló adaptív létrehozására, a tapasztalat szerint háromnál magasabb dimenzióban csak nehézkesen, vagy egyáltalán nem működik. Ez a probléma egyelőre technikailag áthidalhatatlannak tűnik, mert jelenleg a világon – ismereteink szerint – nem létezik még megbízható, valóban általános n-dimenziós, adaptív, anizotrop hálógeneráló algoritmus.

2.2 Optimális adatbázisok létrehozása

A szakirodalomban az optimálisan változó sűrűségű és anizotrop hálót gyakran mutatják be úgy, mint amelynek elemei azonos méretűnek és közel szabályosnak látszanának egy speciális, helyről-helyre változó, azaz lokális metrika alatt [5]. A metrika felfogható transzformációnak is, amelynek révén a hálót egy hipotetikus ún. *kontroll-térbe* képezzük le, és ahol annak képe ezek szerint homogén sűrűségű és „izotrop” (azaz nem anizotrop). Legyen $\Xi \subset R^m$ az *m*-dimenziós kontroll-tér, $\xi_i \subset \Xi$ annak egy pontja, leképzést jelölje: $\ell : \Xi \to X$. Az ilyet röviden egységhálónak (*unit mesh*) is nevezik.

A szóban forgó metrikát az interpolációs hibával szokás kapcsolatba hozni. Ennek szemléletes magyarázata – némileg pongyolán – úgy fogalmazható meg, hogy „ha az anizotrop háló képe egyenletes az interpolációs hiba terében nézve, akkor ez azt jelenti, hogy a hiba egyenletesen oszlik el a hálón”. Vagyis ekkor megvalósul az ekvidisztribúció, amely az optimalitás kritériuma.

Felmerülhet a kérdés, hogy miért ne lehetne a hálóadatbázist közvetlenül egy ilyen kontroll-térben létrehozni, majd megkeresni annak képét a „valódi" paraméter-térben. A vázolt megoldás legnagyobb előnye az lenne, hogy így nem kellene anizotrop hálót generálni. Az ötletet a 2. ábra illusztrálja.

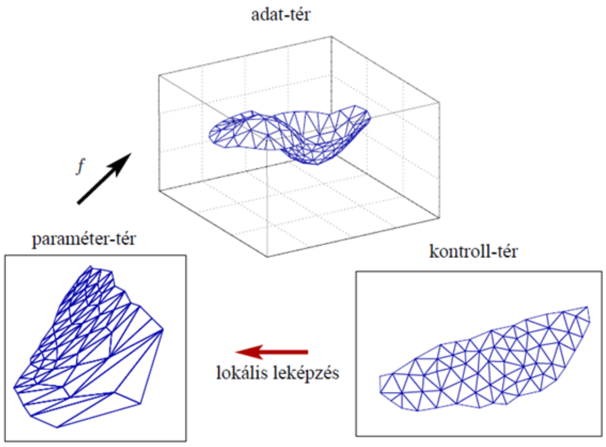

***Fig. 2:** Az anizotróp háló és a kontroll tér. / Anisotropic mesh and the control space.*

2.3 Az iterációs ciklus leírása

Az általunk kifejlesztett algoritmus első lépésként felvesz $n+1$ pontot a paramétertérben, ahol n a modell paramétereinek száma. E pontokat véletlenszerűen, vagy előre definiált pozíciókban választhatjuk meg. Az n-dimenziós térben $n+1$ (nem elfajult helyzetű) pont szimplexet alkot, amelyet itt kiindulási elemnek vagy „magelemnek" (*seed element*) nevezünk. Innen indul az iteráció, amelynek egyetlen üteme négy szekvenciális lépésre bontható. Az eljárást a 3. ábra szemlélteti.

1. lépés: hálózás Ebben a lépésben a kontroll-térbeli pontokra Delaunay-hálót illesztünk (l. 3.a ábra). A Delaunay-háló egy speciális és az adott ponthalmazra nézve egyedi szimplex-háló, amely bizonyos szempontból optimális: a lehetőségekhez mérten viszonylag „jó minőségű" szimplexekből áll [3].

2. lépés: hálósimítás: A háló csomópontjainak úgy kell elhelyezkedniük a kontroll-térben, hogy a szimplexek mérete tükrözze a tartományukon mérhető interpolációs hiba nagyságát. E célra a rúgóanalógiát alkalmazzuk úgy, hogy a rúgók nyugalmi hosszát az adattávolsággal vesszük azonosnak, így a kiegyensúlyozott hálóban az élhosszak várhatóan az adattávolsággal lesznek megközelítően azonosak. A csomópontokat zérus tömegűnek tekintjük, csillapítás nincs. A rúgóerők egyensúlyára vonatkozó vektoriális egyenlet az i-edik pontra felírva a következő:

$$\bar{0} = \sum_{j=1}^{\upsilon} \alpha_{ij} \left(1 - \frac{\Delta y_{ij}}{\Delta \xi_{ij}}\right)\left(\bar{\xi}_i - \bar{\xi}_j\right)$$

Ahol α_{ij} az i-edik csomópontot a j-edikkel összekötő rúgó rúgóállandója, ν az i-edik csomóponthoz éllel kapcsolódó szomszédos pontok száma, $\Delta\xi_{ij}$ a pontok közötti él hossza, míg Δy_{ij} a pontok adat-térbeli távolsága, azaz a rúgó nyugalmi hossza.

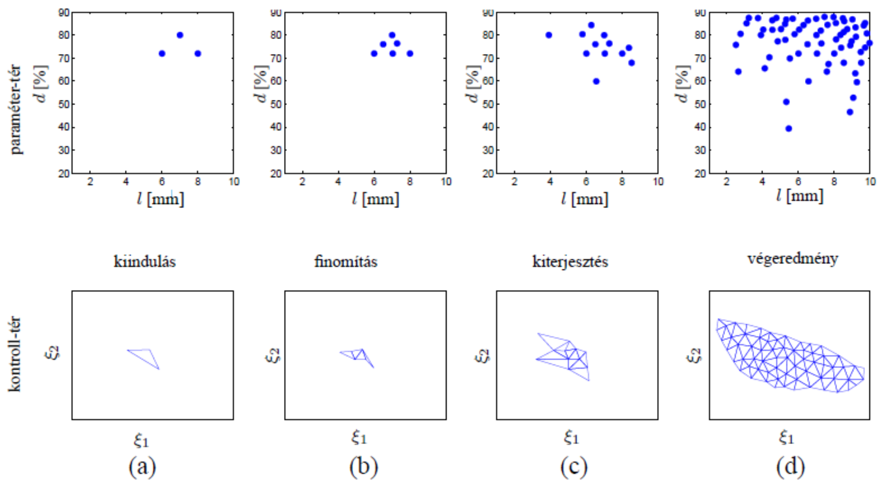

***Fig. 3:** Az adatbázis létrehozásának főbb lépései: kiindulási elem (a), a háló finomítása (b), a háló kiterjesztése (c), és a végleges hálóadatbázis (d). Fent a paraméter-térbeli, lent a kontroll-térbeli állapot látható. / Main steps of the database generation: seed element (a), refinement (b), extension (c) and the final database (d). Parameter-space shown in top and the control-space in bottom.*

3. lépés: hálófinomítás A hálófinomítás azt jelenti, hogy újabb csomópontokat illesztünk be a hálóstruktúrába (l. 3.b ábra). A finomítás során az új pontot valamelyik szimplexre vonatkoztatva veszik fel, például annak súlypontjában, vagy a körülírt köre (hipergömbje) középpontjában. Mi az utóbbit használjuk azzal a kiegészítéssel, hogy ha ez a pont a hálón kívülre esik, akkor alkalmas módon a háló peremére vetítjük. Minden olyan elemet finomítunk, amelyeknek legalább az egyik éle hosszabb az előírt δ küszöbértéknél.

4. lépés: kiterjesztés Amikor a háló már nem finomítható tovább, elmondhatjuk, hogy a paraméter-térben a jelenlegi pontok által meghatározott „területen” belül az *f* operátor mintavételezése optimális. Azonban a háló még nem feltétlenül fedi le a vizsgálandó Ω paraméter-tartományt. Ennek érdekében megpróbálunk újabb pontokat felvenni az aktuális hálón kívül. Új pontokat úgy keresünk, hogy az aktuális háló szélső elemeinek belső pontjait „tükrözzük” a háló peremére (l. 3.c ábra).

3. Tesztprobléma

Egy ismeretlen repedést tartalmazó nagy kiterjedésű, nem-mágneses acéllemez felett váltakozó árammal táplált tekerccsel pásztázunk, és mérjük annak impedancia-változását különböző pozíciókban. A feladat a repedés paramétereinek meghatározása a mért impedancia-értékekből. A tekercs légmagos szolenoid; a lemez és a tekercs között vékony légrés helyezkedik el. A tekercs impedanciáját egy képzeletbeli 11×41 pontból álló rács pontjaiban mérjük. Ezek alapján a 451 pozícióban mért komplex szám egy 902 dimenziós adatteret határoz meg (*m*=902).

A repedést egy egyszerűsített modell formájában rekonstruáljuk. Feltesszük, hogy felületszerű repedésről (*surface crack*) van szó, amelynek síkja merőleges az *x*-tengelyre. A repedés modellje téglalap alakú, és a lemeznek a tekerccsel átellenes oldaláról nyílik (OD-típusú repedés). Az elrendezést a 4. ábra mutatja. Ezen feltevésekkel a repedést egyértelműen jellemezhetjük a következő négy paraméterével: a középpontja x_0 és y_0 koordinátájával, *l* hosszával, valamint *d* mélységével. Látható, hogy a paraméter-tér ez esetben négydimenziós (*n*=4).

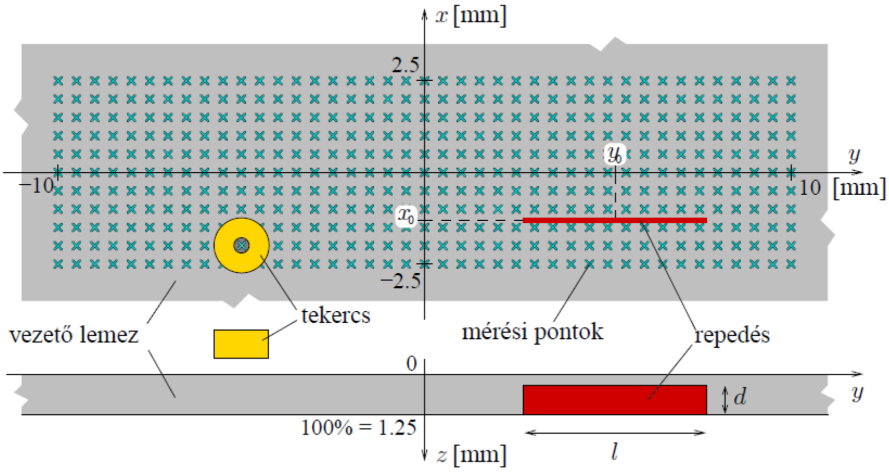

Fig. 4: A vizsgált tesztprobléma: mérési pozíciókat „x” jelöli. / The investigated problem: scanning positions are marked by „x”.

4. Eredmények

Ebben a szakaszban az optimális hálóadatbázissal történő rekonstrukció hatékonyságát és pontosságát vizsgáljuk. Összehasonlításképpen felvettünk egy azonos számú pontból álló „reguláris” adatbázist (referencia), amelyet a paraméter-tartományon felvett négyszögrács pontjai alkotnak. A rekonstrukcióra egyszerű PC vetítést használunk: a mért eredményhez az adattérben legközelebb eső adatpont paramétereit választjuk. A vizsgálatot az áttekinthetőség kedvéért az előző szakaszban leírt probléma egyszerűsített, kétparaméteres változatán $(l, d, x_0 = 0, y_0 = 0)$ végezzük, amelyben tehát a keresett repedés helyzetét ismertnek tekintjük, csak a hossza és a mélysége kérdés.

Ahogy várható, a reguláris adatbázis egyrészt feleslegesen sűrű a kis repedések tartományán, másrészt túl ritka a nagy repedésekén. Ennek bemutatására tekintsük először az 5. ábrát. Tegyük fel, hogy a rekonstruálandó repedés paramétereit most ismerjük (kék színű pont). A pontot körülvevő vörös folt azon repedés-konfigurációk halmaza, amelyek elméletileg mérhető (zajmentes) impedancia-jele a kék pont jelétől δ távolságon belül van (euklideszi normában mérve). Az 5.a ábra azt illusztrálja, hogy az optimális adatbázis esetén egy-egy repedés-konfiguráció (kék pont) körüli foltba jellemzően egyetlen adatbázispont (zöld) esik, és a PC típusú rekonstrukció során ennek paramétereit fogadjuk el. Ezzel szemben a reguláris adatbázis esetében (5.b ábra) ezen a tartományon jellemzően több adatpont (zöld) is beleesik a foltba, és a gyakorlatban – a mérés zajától függő-

ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS * ÁLLAPOTELLENŐRZÉS
Elektronikus folyóirat
2012/4

en – bármelyik képezheti a rekonstrukció eredményét.

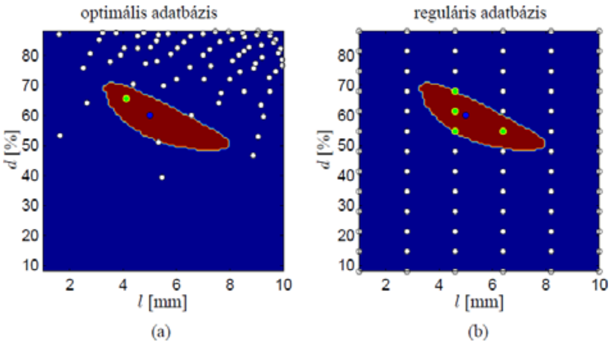

Fig. 5: *Illusztráció a rekonstrukció feltételezett hibájának számításához. / Illustration for the computation of the reconstruction error.*

A háló-adatbázis pontosságának bemutatása céljából megvizsgáljuk a rekonstrukció hibáját az egyes paraméterek tekintetében, a teljes paraméter-tartományon. Az eljárás során egy képzeletbeli, megfelelően sűrű szabályos rácsot illesztettünk a paraméter-térre, majd ennek minden egyes pontjára megvizsgáljuk a rekonstrukció lehetséges legnagyobb hibáját (a fentiekben leírt módon), a mérésben δ zajszintet feltételezve. A rekonstruált paraméterek abszolút hibájának eloszlását a 6. ábra mutatja. A baloldalon az *l* hosszban, a jobb oldalon a *d* mélységben jelentkező legnagyobb hiba eloszlását láthatjuk színekkel ábrázolva, a repedés-konfiguráció függvényében. A felső képeken a háló-adatbázis, az alsón a reguláris adatbázis esete látható (az adatpontokat fehér körök jelzik). Jól látszik, hogy a reguláris adatbázissal történő rekonstrukció hibája kisméretű repedések esetén nagyobb, mint az optimális adatbázis használatával, míg nagy repedésekre nem látszik számottevő különbség a hibában.

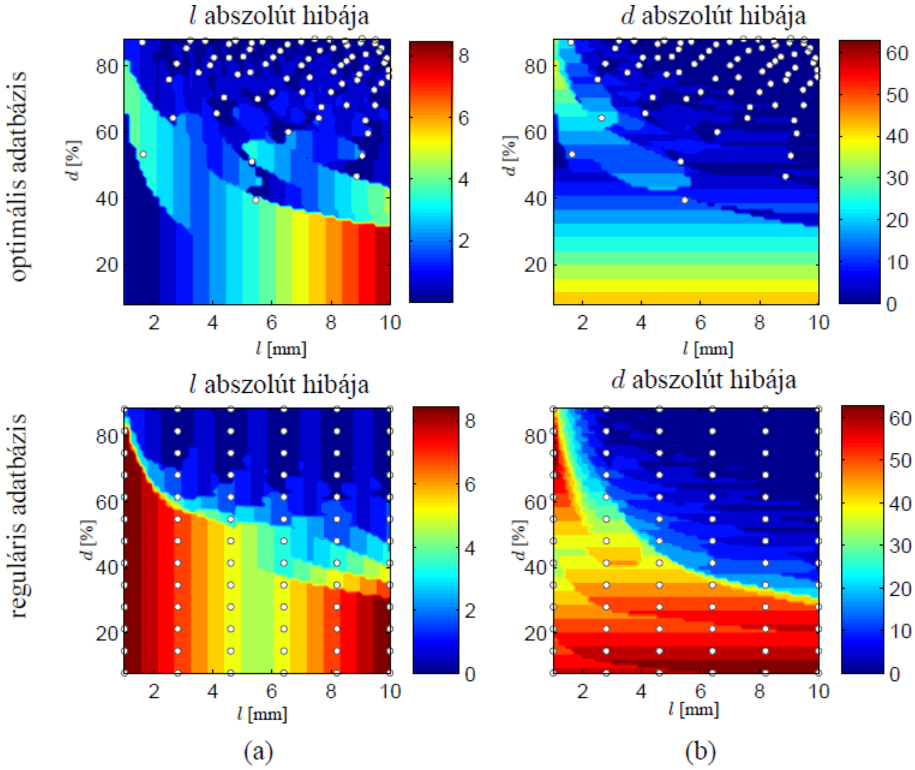

Fig. 6: A rekonstrukció feltételezett legnagyobb hibájának eloszlása: fent az optimalizált hálóadatbázissal, lent a reguláris adatbázis. / Distribution of the assumed largest reconstruction error: optimal database in top, regular database at bottom.

5. Összefoglalás

Az adatbázison alapuló anyaghiba-rekonstrukció két szempontból is előnyösebb ipari felhasználás céljára, mint az optimalizáción alapuló rekonstrukció. Egyrészt az adatbázisban való keresés gyorsasága lehetővé teszi a valósidejű rekonstrukciót. Másrészt a végfelhasználónak így nincs szüksége a bonyolult és drága szimulációs szoftverre, valamint az ahhoz tartozó nagy hardver-erőforrásokra, csupán a szoftver által előre kiszámított adatokra. Az általunk bemutatott módszerrel az adott feladathoz illeszkedő optimális, azaz adott pontosság eléréséhez minimális számú adatpontot tartalmazó adatbázis készíthető.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] J. Pávó, Sz. Gyimóthy, „Adaptive inversion database for electromagnetic nondestructive evaluation”, *NDT&E International*, vol. 40, no. 3, 2007, pp. 192-202.

[2] Sz. Gyimóthy, I. Kiss, J. Pávó, „Data-equidistant Evaluation Set of the Direct Problem with Application to Electromagnetic NDT”, *IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering*, Sept. 21-24, 2008, Graz (Austria), pp. 406-411.

[3] J. Frykestig, „Advancing front mesh generation techniques with application to the finite element method”, PhD thesis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 1994.

[4] J. Pávó and K. Miya, „Reconstruction of crack shape by optimization using eddy current field measurement,” IEEE Transactions on Magnetics, vol. 30, pp. 3407–3410, 1994.

[5] H. Borouchaki, P. J. Frey, and P. L. George, „Adaptive triangular-quadrilateral mesh generation,” International Journal of Numerical Methods in Engineering, vol. 41, pp. 915–934, 1998.

[6] F. J. Blom, „Considerations on the spring analogy,” International Journal for Numerical Methods in Fluids, vol. 32, pp. 647–668, 2000.

[7] S. Gyimóthy and J. Pávó, „Qualification of the inverse problem of defect reconstruction using optimized mesh database,” COMPEL, vol. 24, no. 2, pp. 436–445, 2005.

[8] S. Gyimóthy, Y. L. Bihan, and J. Pávó, „Optimized database for training neural networks used in non-destructive testing,” International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, vol. 25, no. 1-4, pp. 717–721, 2007.