

Ütközési sokk hatásainak modellezése MEMS szenzorban

Modelling the effects of impact shock in a MEMS sensor

PLAVECZ Lambert^{1,2}, PhD hallgató
KARAP Attila², szimulációs mérnök
BEREZVAI Szabolcs¹, adjunktus

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Műszaki Mechanikai Tanszék,
H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3;

²Robert Bosch Kft., 1103 Budapest, Gyömrői út 104.

lambert.plavec@mm.bme.hu, attila.karap@hu.bosch.com, berezvai@mm.bme.hu

Abstract

In this study, the case of dropping a simplified MEMS sensor on the floor is simulated with a finite element method, while the propagation of the impact shock and its effect on the sensor structure are investigated. Because of the quick timescale of this process, it should be simulated with an explicit finite element software. It is demonstrated that the effect of the impact on the structure depends highly on the angle of the sensor before drop, the size of the contact surface, and the material characteristics of the floor. Aiming to create a simple and generally applicable model, a transfer function is fitted to the shock propagation in the sensor package.

Keywords: FEM, MEMS, impact, contact, explicit simulation

Kivonat

Jelen tanulmány részei egy egyszerűsített MEMS gyorsulásmérő szenzor padlóra történő ejtésének végesselemes szimulációja, valamint az ütközés okozta sokk terjedésének és az ütközés szenzorstruktúrára gyakorolt hatásának vizsgálata. A folyamat gyors dinamikája explicit végesselemes szoftver alkalmazását követeli meg. A struktúrára gyakorolt hatást erősen befolyásolja a szenzor ejtésének szöge, a kontaktfelület nagysága és a padló anyaga. A sokk szenzorházon keresztüli terjedésére átviteli függvény illeszthető, amellyel a jelenség gyorsan és egyszerűen modellezhető.

Kulcsszavak: VEM, MEMS, ütközés, kontakt, explicit szimuláció

ÁTTEKINTÉS

1.1. Kérdésfelvetés és motiváció

A MEMS (micro-electromechanical system, mikro-elektromechanikai rendszer) gyorsulásmérő szenzorok mára mindennapjaink részét képezik, ott vannak az okostelefonjainkban, fülhallgatóinkban, okosóránkban, de az autóink kritikus rendszereinek is fontos részét képezik [4]. A technológia folyamatos fejlődésével a szenzorstruktúrák egyre kisebbek és érzékenyebbek lesznek, az ütközésekkel, hirtelen behatásokkal szembeni ellenállóságuk csökken [3]. A szenzorok számos esetben elszenvednek ütközést, például autóbaleset során, illetve leeshetnek a gyártósorról, vagy leejthetjük őket a mobiltelefonunkkal együtt is. A sokk szenzorházból való terjedésének helyes modellezésével lehetőség nyílik a szenzor ütésállóságának értékelésére és javítására már a szenzortervezés korai szakaszában.

A MEMS gyorsulásmérő szenzorok ejtés- és ütésállóságának kérdése összetett. Sok múlik a szenzorstruktúra (tényleges mechanikai érzékelést végző egység) megfelelő kialakításán, de az ütközés erején, gyorsaságán, a felületi érdességen, illetve a szenzor beépítésén, a hordozó eszközön is. A szenzorstruktúra megfelelő ellenállóságát explicit végesselemes szimulációk segítségével lehetséges ellenőrizni, ám a pontos kiértékeléshez az ütközési sokk tokozáson, vagy akár a hordozón keresztül való terjedésének megértésére és modellezésére is szükség van.

A probléma tehát három szinten értelmezhető. A legfelső szint a hordozó elektronikai eszköz, például telefon, amibe a szenzor beépítésre kerül, és amely centiméteres méretskálával rendelkezik. A következő szint

a szenzortokozás, amely néhány milliméter, a legalacsonyabb szint pedig a benne lévő szenzorstruktúra, amely a 10 – 100 mikrométer skálán helyezkedik el. A szükséges végelem méretek körülbelül két nagyságrenddel kisebbek mindhárom szint esetében. A teljes rendszer (hordozó, tokozás, struktúra) együttes szimulációja a méret- és időskálák különbsége, valamint a szükséges nagy elemszám miatt rendkívül komplex és költséges. Ugyanakkor, mivel a struktúra tömege töredéke a tokozásénak, hasonlóképpen a tokozásé töredéke a hordozóénak, ezért az alacsonyabb szintek visszahatása elhanyagolható [5].

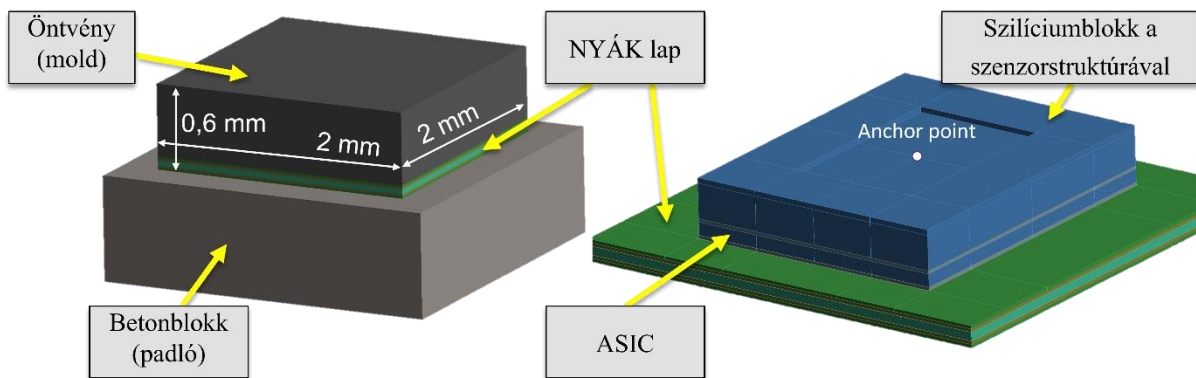
Egy másik fontos eset a gyártás és beszerelés során fordulhat elő, a szenzortokozás magában is leeshet, ütközhet a gyár padlójával. Kritikus problémát jelenthet, ha a tokozás külső sérülés nélkül átvészeli az ütközést, ám a struktúra károsodik.

A szerzők hosszú távú célja egy mind a hordozós esetben, mind a szenzortokozás önmagában való leejtése esetén alkalmazható egyszerű modell megalkotása a sok tokozásban való terjedésének modellezésére. Egy egyszerű empirikus/illesztett modell alkalmas lehet a tokozás esetére, mivel az a szenzorfejlesztési folyamat során – szemben a struktúrával – csak keveset változik. Továbbá egy hordozószimuláció és egy struktúraszimuláció között az egyszerű átviteli modell alkalmazásával jelentős fejlesztési idő takarítható meg.

Jelen tanulmány tartalmazza a szenzortokozás betonpadlóra ejtésének az ejtési magasságtól és az ütközés szögétől való függésének végeelemes vizsgálatát, továbbá az ütközési sokk tokozáson keresztüli terjedésének átviteli függvényes modellezését. A megfelelő átviteli függvény megtalálásához több lehetséges bemeneti mennyiség is kipróbálásra kerül.

1.2. A szenzortokozás modellje

A végeelemes (VEM) szimulációk egy egyszerűsített MEMS-tokozásmodellrel készültek, amelynek fő részei a tokozás alját képező NYÁK (nyomtatott áramkör), a szenzorjel előfeldolgozását végző ASIC (*application-specific integrated circuit*, alkalmazás-specifikus integrált áramkör), a szenzorstruktúrát tartalmazó szilíciumblokk, illetve a tokozás alakját adó öntvény (mold). A fő részek megfigyelhetők az 1. ábrán. Különleges figyelmet érdemel a szilíciumblokkban található üreg, amelyben a szenzorstruktúra foglal helyet. Mivel a struktúra nagyságrendekkel kisebb részeket is tartalmaz, így a modellbe való integrálása a szükséges szimulációs időt és számítási kapacitást rendkívül megnövelné. Azonban a szenzorstruktúra azt érzékeli, ami az úgynevezett *anchor ponton* történik, azaz ott, ahol a struktúra a szilíciumblokkhoz csatlakozik (lásd. 1. ábrán jobbra).



1. ábra. A MEMS tokozás modell a beton blokkal (bal), illetve a tokozás öntvény nélkül az anchor ponttal (jobb)

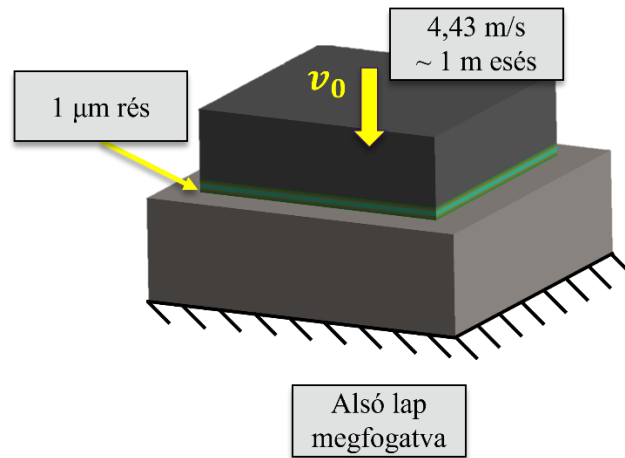
1.3. A szimulációs modell

Az előzőekben ismertetett tokozásmodell egy a padlót reprezentáló betonbloknak ütközik, ahogy látható a 2. ábrán. A tokozás kezdeti sebessége 4,43 m/s, ami 1 m magasságból való ejtésnek felel meg. A betonblokk alja rögzített. A blokk és a tokozás között kezdetben 1 μm rés található, azaz a kontakt nyitott.

A betonblokk mérete olyan kell legyen, hogy az jól reprezentálja egy lényegesen nagyobb betonpadló viselkedését. Azaz az ütközéskor kiinduló elasztikus hullámok [2] az oldalfalon visszaverődve nem érhetnek vissza olyan gyorsan, hogy az ütközés lefolyására érdemi hatást gyakoroljanak. Ehhez megfelelően széles és magas blokk kell, amelyet paramétertanulmánnyal lehet a legegyszerűbben megtalálni. Jelen esetben a blokk megfelelő méretei 6,6×6,6×2,5 mm-re adódnak.

A modell hálózása hálózatlanság-vizsgálattal megállapított 20 μm -es hexaédes elemekkel történt, a betonblokk elemmérete pedig 80 μm volt. Jelen egyszerűsített modell behálózásához körülbelül 400 ezer

elemre volt szükség, míg a futási idő 2 perc körül alakult. Ugyanakkor egy valós szenzortokozás pontos modellje finomabb hálót igényel, továbbá méretében is nagyobb lehet, amely néhány óra nagyságrendbe helyezi a szimuláció futási idejét. A szimulációk Ansys LS-DYNA [1] explicit végeleemes szoftverrel készültek.

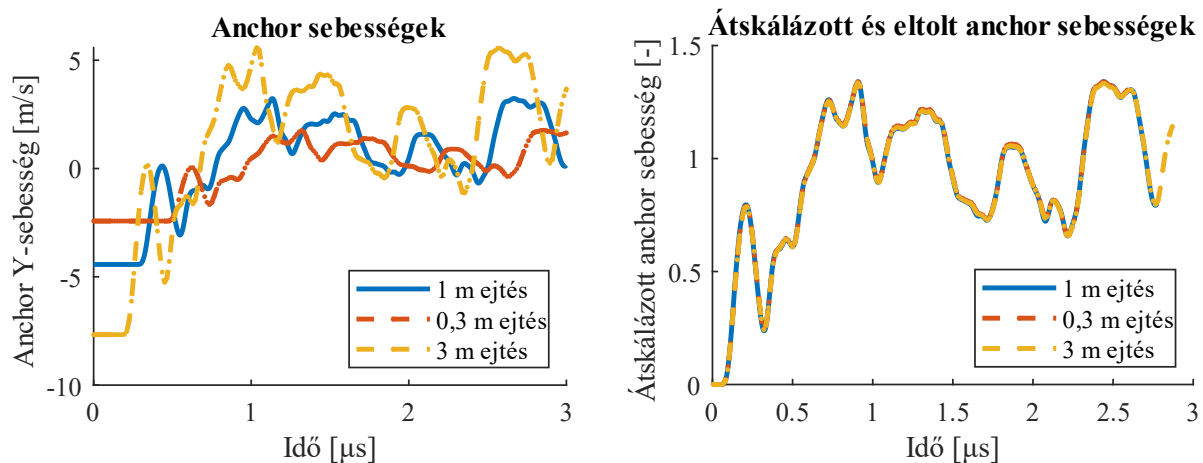


2. ábra. A szimulációs elrendezés

SZIMULÁCIÓK

2.1 Ejtési magasság

Fontos paramétere a szimulációnak a kezdeti sebesség, amely az ejtési magasságot reprezentálja. Három különböző ejtési magasság (0,3 m; 1 m; 3 m) mellett végzett szimulációk rámutattak, hogy az anchor sebességek lineárisan változnak az ejtési magassággal. A 3. ábrán megfigyelhetők az anchor sebességek, valamint a szenzortokozás átlagsebességével skálázott és az 1 μm megtételéhez szükséges idővel eltoló görbék. Ez utóbbiak a skálázás és eltolás után jól illeszkednek, mutatva a rendszer linearitását.



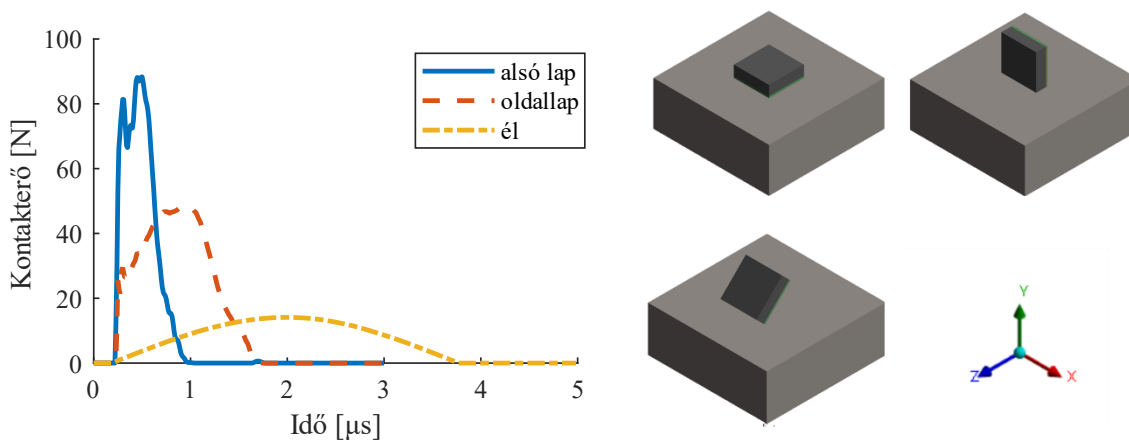
3. ábra. Anchor sebességek a 3 ejtési magasság esetében (bal), valamint az átskálázott görbék (jobb)

A rendszer linearitása az ejtési magasság szempontjából lehetőséget teremt az átviteli függvénnyel való modellezésre. Egy kiválasztott ejtési magasság esetére illesztett átviteli függvény így alkalmas lehet tetszőleges ejtési magasság esetében a tokozáson keresztüli sokk terjedésének modellezésére.

2.2 Ejtési szög

Valós esetben a tokozás tetszőleges szögben ütközhet a padlónak, a kontakt történhet teljes oldallappal, de akár egy éllel is. Három alapvető eset került megvizsgálásra, az alsó lapra ejtési, oldallapra ejtési és egy

élre ejtési szituáció. A három eset kontakterőgörbéi és a kapcsolódó szimulációs elrendezések láthatók a 4. ábrán. Az alsó lap kontaktja esetén a legnagyobb a kontakterő maximuma, és az ütközés lefolyása is ekkor a legrövidebb. Ennek megfelelően ez az eset tekinthető a legkedvezőtlenebbnek, a tokozás mélyén helyet foglaló szenzorstruktúrára ekkor hárul a legnagyobb terhelés. Amikor tehát az alsó lappal való ütközést vesszük figyelembe, akkor a mérnöki szempontból kritikusabb esetre koncentrálnunk.



4. ábra. Anchor sebességek a 3 különböző ejtési szög esetében (bal) és a szimulációs elrendezések (jobb)

ÁTVITELI FÜGGVÉNY ILLESZTÉS

Az ejtésnél/ütközésnél figyelembe vehető három különböző szint a hordozó eszköz, a tokozás és a szenzorstruktúra. Ezen három szint külön-külön történő szimulációjával vizsgálható a teljes rendszer úgy, hogy a magasabb szintekből nyert elmozdulások/erők/sebességek az utánuk jövő szint bemenetei/terhelései lesznek. Amennyiben a szimulációk közötti áthatást egyetlen időgörbével írjuk le, akkor egy átviteli függvény modellel is kiváltható a tokozás szintjének szimulációja.

3.1 Átviteli függvény értelmezése

A szenzorstruktúrára a hatások az anchor pontokon keresztül érkezik, így az átviteli függvény kimenete az anchor pont y -irányú (padlóra merőleges) sebessége lett. Bemenetnek több különböző lehetőség vehető számba: a tokozás és a padló közötti kontakterő, a tokozás csomóponti vagy a tömeggel súlyozott átlagsebessége, illetve akár a tokozás alsó lapjának átlagsebessége. Amennyiben az átviteli függvényt mind a tokozás önmagában, mind a hordozóban való ütközésének esetére is szeretnénk alkalmazni, akkor olyan bemenetre van szükség, amely nem közvetlenül a kontaktból származik. Ekkor a kontakt nemlinearitása is kevésbé jelenik meg az átvitelben, így a lineáris átviteli függvény jobban teljesíthet.

Az átviteli függvény operátortartománybeli értelmezése a következő:

$$V_a(s) = G(s)X(s), \quad (1)$$

ahol $V_a(s)$ az anchor sebesség, $X(s)$ pedig a választott bemenet Laplace-transzformáltja. Az átviteli függvény polinomtörtnek feltételezhető:

$$G(S) = \frac{\sum_{j=0}^k b_j s^j}{\sum_{i=0}^n a_i s^i}, \quad (2)$$

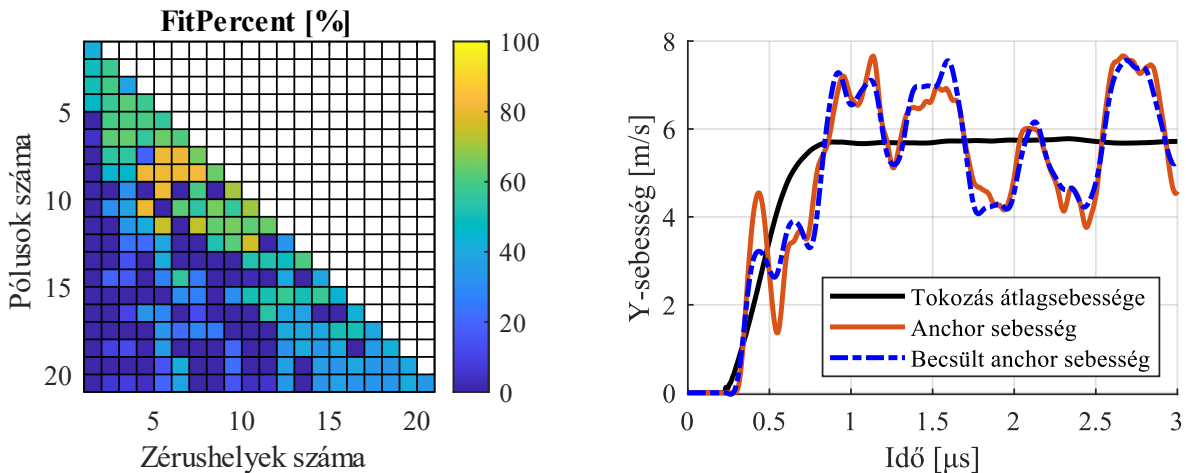
ahol a_i, b_j együtthatók illesztését kell elvégezni. Az illesztés a MATLAB *tfest* [6][7] függvénnyel történt, amely vonalkereső („line search”) algoritmusokat alkalmaz, és mindössze a pólusok és zérusok számát várja paraméterként. Az illesztés jószágát a *FitPercent* érték jellemzi:

$$FP = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (y_{p,j} - y_j)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

ahol a számlálóban az illesztésből kapott értékek ($y_{p,j}$) és valós értékek (y_j) eltérése, a nevezőben pedig a valós értékek és az átlag eltérése (\bar{y}) található.

3.2. Illesztések

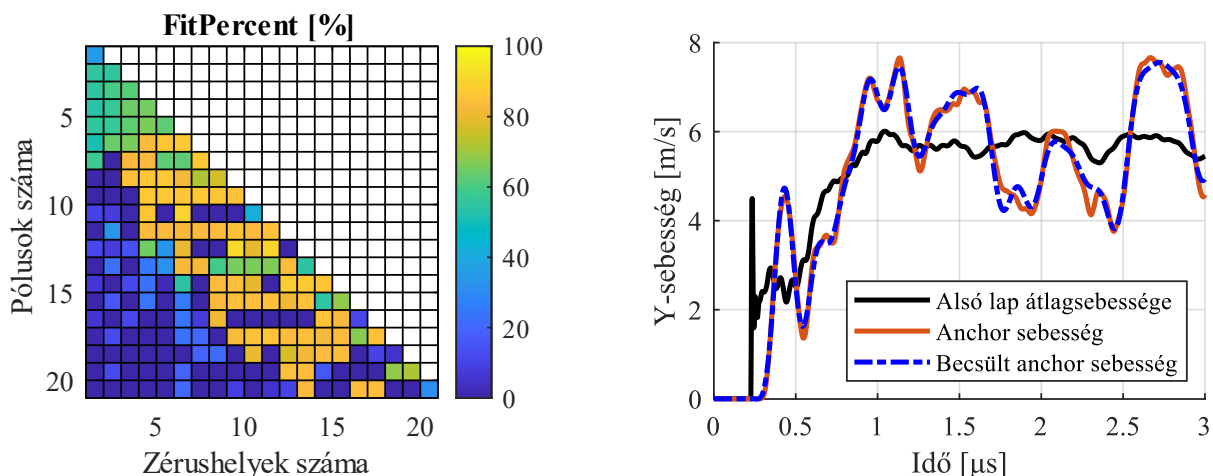
A csomóponti átlagsebesség-bemenet alkalmazása mellett az átviteli függvények illesztési jósága az 5. ábrán balra figyelhető meg, a pólusok és zérusok számának függvényében. Több jó illesztés található $n = 7; 8$ pólus esetében. Az $n = 8$ pólushoz és $k = 6$ zérushelyhez tartozó illesztés grafikonja az 5. ábrán jobbra látható. Az átviteli függvény kimenete az időbeli viselkedést megfelelően reprezentálja. Az amplitúdó csúcsoknál figyelhetőek meg eltérések, az első csúcs esetében számottevő a különbség. Más illesztések esetében az első csúcs modellezése pontosabb lehet, ám ekkor később jelentkeznek nagyobb eltérések.



5. ábra. Az illesztések jósága (bal) és egy jó illesztés görbéje (jobb) csomóponti átlagsebesség-bemenet esetén

A kontakterő bemenet hasonlóan viselkedik az átlagsebesség-bemenethez, mivel a kontakterő arányos az átlagos gyorsulással, egy integrálás vagy deriválás pedig részét képezheti az átviteli függvénynek is. A kontakterő továbbá igen nehezen becsülhető, így kevésbé alkalmas bemenet.

Ha az alsó lap átlagsebességét vesszük bemenetnek, a 6. ábrát kapjuk, balra az illesztések jósága, jobbra egy jó illesztéshez ($n = 12, k = 9, FP = 91\%$) tartozó időgörbe. Az első csúcs az anchor sebességben megfelelően modellezhető, hiszen mindössze a bemenetben is jelenlévő csúcs eltolásából és simításából keletkezik. Megfelelő illesztésből is lényegesen több van, amely a bemenet jó alkalmazhatóságát mutatja.



6. ábra. Az illesztések jósága (bal) és egy jó illesztés görbéje (jobb), bemenet: alsó lap átlagsebessége

További kísérletek arra mutattak, hogy az alsó lap átlagsebessége nagyobb kontaktfelület esetén alkalmazható jól. Ha a kontaktfelület kis méretű, a lokális jelenségek jobban dominálnak és az átlagolás is kevésbé simítja a görbét, így a bemenet nem reprezentálja megfelelően az ütközés nagyléptékű alakulását. Ezenfelül a csomóponti átlagsebességgel elérteknél jobb eredmények várhatók a tömeggel súlyozott átlagsebesség esetében. Ezutóbbi, mivel megegyezik a súlypont sebességével, valós fizikai értelmezéssel is

rendelkezik, és a kezdeti, valamint a végsebesség alapján egyszerűen becsülhető. Így a szenzortokozás önmagában való ejtése esetén a tömeggel súlyozott átlagsebesség a preferált bemenet.

Az illesztett átviteli függvények, habár mindössze az 1 m magasságból való ejtés esetére lettek illesztve, más ejtési magasságokra is jó eredményt adnak, a szimuláció ejtési magasság szempontjából való linearitásának köszönhetően. Továbbá lehetőség van arra is, hogy több különböző padlóanyag esetében is alkalmazható átviteli függvényt hozzunk létre. A padlóanyag változtatása azonban jelentősen módosítja a rendszert, így ekkor az illesztés jósága csökken.

ÖSSZEGZÉS

A MEMS gyorsulásmérő szenzorok ejtésének és ütközésének problémáját három szinten lehetséges értelmezni, ezek a hordozó, a tokozás és szenzorstruktúra szintjei. A struktúra ütésállóságának értékelése explicit végeselemes módszerrel történhet, amelyhez azonban szükség van a magasabb szintek ejtésének szimulációjára is. Jelen esetben a tokozás ejtését vizsgáltuk, hordozó eszköz nélkül.

A szenzortokozás betonpadlóra ejtése esetén a rendszer az ejtési magassággal lineárisan változik, az ejtési szög módosítása azonban kvalitatív változást idéz elő. Az ütközés akkor fejt ki a legnagyobb hatást a struktúrára, ha nagy a kontaktfelület, azaz az alsó (vagy felső) lappal történik az ütközés.

A tokozás alsó lapjának betonpadlóval való ütközését illesztett átviteli függvénnyel is lehet modellezni, amely esetben a bemenet a teljes szenzortokozásnak vagy alsó lapjának az átlagsebessége lehet. Az átviteli függvény kimenete az úgynevezett anchor pont sebessége, amely a szenzorstruktúra szimulációjában kinematikai kényszerként alkalmazható. Az egy kiválasztott ejtési magasság esetére illesztett átviteli függvény tetszőleges ejtési magasság esetében használható.

A szenzortokozás padlóra ejtésének teljes modellezéséhez még szükség van az átlagsebesség-bemenet szigmoid-jellegű függvényének becslésére is. További fejlesztést igényel a kevésbé kritikus ütközési szögekhez tartozó átviteli függvény illesztés, illetve a szimulációban a felületi érdesség kezelése.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a Robert Bosch Kft. támogatásával készült. A kutatás az NKFIH „OTKA” posztdoktori kiválósági programja (PD 137806), a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-5-BME-457 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Ansys Inc. Ansys LS-DYNA, Ansys Enterprise Mechanical, Version 2021 R2. 2021., <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-ls-dyna>.
- [2] Barber J.R., Contact Mechanics, Springer International Publishing, 2018., 20. fejezet, Impact. ISBN: 9783319709390. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-319-70939-0_20.
- [3] Boroch, R. E., Mechanical Properties and Fatigue of Polycrystalline Silicon under Static and High Frequency Cyclic Loading, PhD thesis, Universität Karlsruhe, 2007, <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000009793/44444689>.
- [4] Claßen J. et al. “Evolution of Bosch Inertial Measurement Units for Consumer Electronics”. In: 2020 IEEE Sensors (2020), pp. 1–4. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:228093993>.
- [5] Corigliano, A., Ardito R., Comi, C., Frangi, A., Ghisi, A. és Mariani, S., Mechanics of Microsystems, 271–289. oldal, JohnWiley & Sons, Ltd, 2018., ISBN 9781119053828, DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119053828.ch13>.
- [6] The MathWorks Inc., Estimate transfer function model – MATLAB tfest, Natick, Massachusetts, United States, 2023, <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/tfest.html>.
- [7] The MathWorks Inc. MATLAB. Version 9.11.0 (R2021b). Natick, Massachusetts, United States, 2021., <https://www.mathworks.com>.