

GÉPJÁRMŰ MEGHIBÁSODÁSOK VIZSGÁLATI LEHETŐSÉGE A TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) MÓDSZERREL

POSSIBILITY OF INVESTIGATING VEHICLE FAILURES WITH THE TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL (TDOA) METHOD

*Kriston J. Balázs, PhD hallgató, Dr. Jálics Károly PhD, egyetemi docens
Miskolci Egyetem, Gép- és Terméktervezési Intézet*

ÖSSZEFOGLALÁS (ABSTRACT).

In this paper the method of the Time Difference of Arrival (TDOA) method will be tested for the failure signal localization on vehicle structures. Relevant literature of the diagnostics does not handle the TDOA method for vehicle diagnostic purposes, so it is a novel application field of this method. Based on own measurements on a vehicle structure (Ford Focus body) the effectiveness of the method and the drawbacks, advantages will be presented.

1. BEVEZETÉS

Az autógyártás bonyolult világában a könnyed és kényelmes utazás biztosítása a legfontosabb. A jármű vibrációi, bár gyakran finomak, számos olyan mögöttes problémát jelezhetnek, amelyek mind a vezető kényelmét, mind pedig a jármű általános teljesítményét és biztonságát befolyásolják.

Ahogy a járművek technológiailag egyre fejlettebbek lettek, úgy fejlődtek a rezgések diagnosztizálására és csökkentésére szolgáló módszerek is. A jármű rezgésdiagnosztika, amely a modern gépjármű-karbantartás kulcsfontosságú aspektusa, magában foglalja a járművön belüli rezgésforrások azonosítását és az abnormális rezgések okainak szisztematikus elemzését. Gépek és berendezések rezgés- és zajdiagnosztikájával számos szakirodalom foglalkozik, viszont gépjárművekkel kapcsolatban hasonló publikációkkal alig találkozhatunk. Ezzel a témával foglalkozik pl. az [1.], [2.] és [3.] irodalom. Ennek az az oka, hogy egy üzemelő gépjármű esetén számos zaj és rezgésjelenség van jelen a motor működéséből, az úttesttől származó gerjesztéstől, az áramló levegő általi gerjesztésből, amelyek elfedhetik egymást, kioltathatják egymást stb. Egyszóval rendkívül nehézé teszik egyes hibajelenségek azonosítását a klasszikus zaj- és rezgésdiagnosztikai eszközökkel. Jelen publikációban egy olyan módszert kívánunk bemutatni, amely gépjárműveken történő alkalmazásával kapcsolatos források még nem állnak rendelkezésre. A módszer célja a gépjármű keletkező hiba helyzetének meghatározása, legalábbis hozzávetőleges pontossággal a

gépjárműhöz kötött derékszögű koordináta rendszerben.

2. A LOKALIZÁCIÓS MÓDSZER RÖVID BEMUTATÁSA

Az általunk vizsgálni kívánt módszer a hibajelek beérkezési különbségéből (Time Delay of Arrival: TDOA) határozza meg egy matematikai algoritmus segítségével a hiba helyzetét.

A módszer nem új, régóta használják különböző változatait a tudomány és technika számos területén. említést érdemel a szeizmológia, ahol a földrengések epicentrumának meghatározása történik ilyen módszerrel, a GPS alapú navigáció, anyagok akusztikus emissziós vizsgálata, katonai alkalmazások, mint pl. a fegyverdörrenés helyzetének meghatározása. Ezekkel kapcsolatban számos szakirodalom foglalkozik a módszerrel és felhasználásával ezeken a területeken. Sok területen viszonylag egyszerű a problémafelvetés, hiszen pl. a GPS jelek esetén a terjedést normál esetben nem korlátozza semmi a jeladó (műhold) és a vevő között, hullámterjedés szempontjából homogén közeggel dolgozunk.

Az akusztikus emissziós vizsgálat ettől már összetettebb alkalmazás, mivel a hullámterjedés szilárd közegben megy végbe, ill. a vizsgált objektumok (alkatrészek részegységek) geometriai felépítése bonyolultabb lehet. A módszer felhasználásával gépjárművek esetén azzal a problémával találjuk szembe magunkat, hogy a gépjármű karosszériája bonyolult felépítésű, a homogén hullámterjedést nem teszi lehetővé. Célunk tehát a módszer használhatóságának vizsgálata gépjárműkarosszériák esetén.

3. A LOKALIZÁCIÓS MÓDSZER ELVÉNEK BEMUTATÁSA

Az érkezési időkülönbség módszer (TDOA) kétlépcsős algoritmuson alapul. Első lépésben az egyes források relatív időkésltetését határozzuk meg a kapott adatok alapján. Ezeket az időkésléseket azután hiperbolikus görbék generálására használjuk, amelyek a jelforrás helyzeténél metszik egymást.

A kétlépcsős folyamat, bár csökkenti a helymeghatározás bonyolultságát, viszont bizonyos esetekben nem működik optimálisan. Pl. a módszer kevésbé hatékony többforrású problémáknál, mivel az algoritmusok egy forrású modellt feltételeznek. A módszer tesztelésénél ezt úgy fogjuk elkerülni, hogy ténylegesen csak egyszeres hibajelforrásokat alkalmazunk.

A lokalizációs módszer mátrixokat használ a forrás helyzetének meghatározására a forrás és a vevők közötti késleltetések alapján. Ez a lokalizációs módszer a referencia vevő fogalmát használja úgy, hogy az időkésleltetéseket össze lehessen hasonlítani egymással.

Az alábbiak bemutatom az algoritmust, a részletes levezetést mellőzve, amely megtalálható a vonatkozó szakirodalomban, pl. [5.] -ban. Ez alapján tehát legyen a forrás az ismeretlen helyen (x, y) , az N db szenzor pedig az ismert koordinátákon (x_i, y_i) $i = 1$ -től N -ig. A forrás és az i . vevő közötti négyzetes távolságot a következőképpen adjuk meg:

$$\begin{aligned} r_i^2 &= (x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 \\ &= x^2 + y^2 - 2x_i x \\ &\quad - 2y_i y + x_i^2 + y_i^2 \end{aligned} \quad (1)$$

ahol legyen $x_i^2 + y_i^2 = K_i$.

További átalakításokat végezve ill. bevezetve, hogy $d_{i,1}$ az érkezési időkülönbség az i . érzékelő és az 1. érzékelő (a referenciavevő) között, c a jel terjedési sebessége és $r_{i,1}$ a TDOA távolság, ezzel:

$$r_i^2 = cd_{i,1} = r_i - r_1 \quad (2)$$

További átalakításokat végezve a következő mátrix egyenletet kapjuk:

$$2X \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = 2Ar_1 + B \quad (3)$$

ahol

$$\begin{aligned} X &= \begin{bmatrix} x_{2,1} & y_{2,1} \\ x_{3,1} & y_{3,1} \\ \vdots & \vdots \\ x_{N,1} & y_{N,1} \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} r_{2,1} \\ r_{3,1} \\ \vdots \\ r_{N,1} \end{bmatrix} \text{ és} \\ B &= \begin{bmatrix} r_{2,1}^2 \\ r_{3,1}^2 \\ \vdots \\ r_{N,1}^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

Átalakítva a 3. egyenletet mindkét oldal X^T -vel történő szorzásával, 2 -vel történő osztásával, majd az eredmény mindkét oldalának $X^T X$ -el történő szorzásával a következő alakot kapjuk:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = Cr_1 + D \quad (5)$$

Jegyezzük meg, hogy a fenti egyenlet csak akkor oldható meg, ha létezik $X^T X$ inverze. Ez megköveteli, hogy X -nek egynél több sora legyen (ami három vagy több vevőnek felel meg), az X sorainak pedig lineárisan függetleneknek kell lenniük (ami azt jelenti, hogy a vevők nem kollineárisak). Az 5. egyenlet C és D paraméterei az 6. egyenlet szerinti alakot öltik.

$$\begin{aligned} C &= (X^T X)^{-1} X^T \begin{bmatrix} -r_{2,1} \\ -r_{3,1} \\ \vdots \\ -r_{N,1} \end{bmatrix}; \\ D &= (X^T X)^{-1} X^T \frac{1}{2} \begin{bmatrix} -r_{2,1}^2 + K_2 - K_1 \\ -r_{3,1}^2 + K_3 - K_1 \\ \vdots \\ -r_{N,1}^2 + K_N - K_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Az 5. egyenletet tovább alakítva az alábbi alakot kapjuk:

$$ar_1^2 + \beta r_1 + \chi = 0 \quad (7)$$

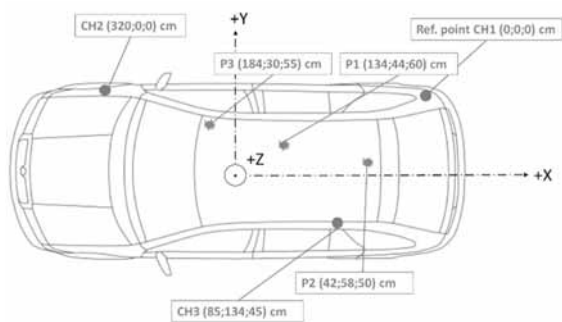
Megoldva az 7. másodfokú egyenletet r_1 -et kapjuk, amelyeket azután (5.) -be behelyettesítve (x, y) közelítő értékét kapjuk.

Az előbb bemutatott algoritmus egyszerűen programozható pl. Matlab kompatibilis GNU/Octave magasszintű programozási nyelvvel. A program elkészült, a $c = 3000$ m/s a karosszéria anyagában terjedő hajlítási hullám terjedési sebességének feltételezésével. Ez az érték acéllemezekre jellemző érték. A cikkben bemutatott helymeghatározási eredmények az GNU/Octave programmal készített kód segítségével számítottuk ki. A módszerre a továbbiakban SX módszerként hivatkozunk, amely az angol „spherical intersection” kifejezésből képzett rövidítés.

4. A MÉRÉS BEMUTATÁSA

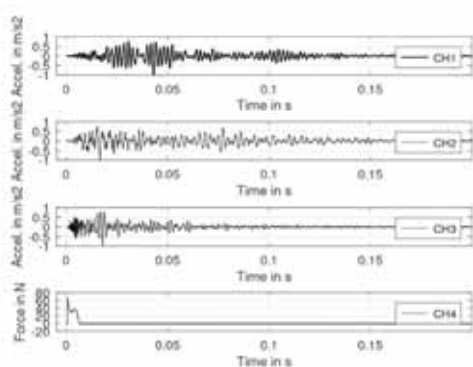
Az SX módszer legalább három érzékelőből álló tömböt használ, amelyek közül az egyiket referencia érzékelőnek választjuk. Jelen esetben legyen az 1. számú érzékelő a referencia érzékelő.

Az érzékelőket a karosszéria felületén helyezük el mágneses csatlakoztatás segítségével, az 1. ábra szerint. Az érzékelők egytengelyű B&K 4382 típusú gyorsulásérzékelők (az ábrán CH1...CH3 jelöléssel), amelyek jeleit egy B&K Photon+ mérési adatgyűjtővel rögzítjük.



1. ábra. A mérési elrendezés a gépjármű karosszériáján

A mérések során tehát karosszériát a P1...P3 pontokon megütjük az impulzus kalapáccsal (PCB 086C02) és mérjük a kalapács, valamint a gyorsulásérzékelőkbe érkező jeleket (2. ábra), mintegy szimulálva egy hibajenéséget.

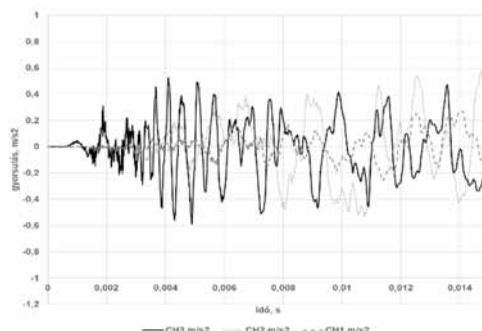


2. ábra. A mért időjelek CH1, CH2, CH3 és CH4 esetén a P1 pontban gerjesztve impulzuskalapáccsal (CH4)

Az impulzus kalapács jelét is rögzítjük, bár az algoritmusnak erre nincs szüksége. A kalapács jelének ismerete azonban segíthet az algoritmus működésének ellenőrzésekor, amikor is az időkülönbségek bevitelére kerül sor. A kalapács jelének, mintegy kezdő/trigger jel ismeretében ugyanis az egyes gyorsulásérzékelők közti időkülönbségek könnyebben meghatározhatók, mivel pontosan ismerjük, mikor keletkezett a hibajel. Ezt azonban csak az algoritmussal számított időkésleltetések ellenőrzésére használtuk.

A 3. ábrából jól látható, hogy CH3 jelszintje emelkedik a legkorábban, ezt követi CH2, majd CH1. Ez azt jelenti, hogy a gerjesztés helyétől CH3 van a legtávolabb és CH1 a legközelebb. Az 1. ábrán feltüntetett koordináták alapján elmondhatjuk, hogy CH3 valóban a legközelebb van (1,02 m), ezt követi CH1 (1,41 m) és végül CH2 (1,92 m). A feladat tehát a három jel beérkezési időkülönbségének magállapítása számítással. Ehhez a további jelfeldolgozás során

CH2 és CH1, valamint CH3 és CH1 között előállítjuk a keresztkorrelációs függvényt és ezekből számoljuk az időeltolódást.

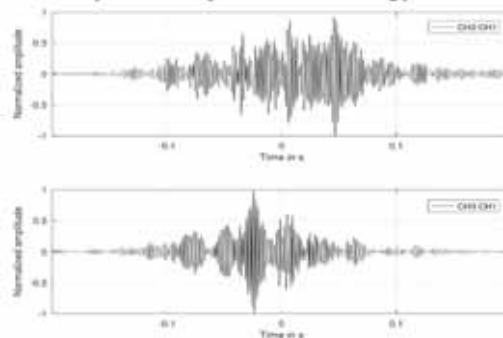


3. ábra. A mért időjelek CH1, CH2, CH3 és CH4 esetén a P1 pontban gerjesztve impulzuskalapáccsal (CH4)

5. A JELFELDOLGOZÁS ÉS A MÉRÉSI EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

A jelfeldolgozás során az $R_{xy}(m)$ keresztkorrelációs függvényt használjuk két egymástól különböző $x(t)$ és $y(t)$ jel korrelációjának leírására a két jel közötti τ különböző időeltolásoknál. A művelet két jel közötti hasonlóságról ad információt, megmutatja, hogy az egyik jelben milyen mértékben található meg a másik. A keresztkorrelációs függvény mért jelekből történő előállítására ismét egy a GNU/Octave -ban írt programkódot hívtuk segítségül, ahol az „xcorr” utasítás segítségével végezhető a számítás. A keresztkorrelációs függvények számításának eredményeit a 3. ábrán láthatjuk.

A két jel időeltolódását végeredményben a keresztkorrelációs függvény maximumhelyének x koordinátájának megkeresésével kapjuk.



4. ábra. A számított keresztkorrelációs függvények CH1 és CH2, valamint CH1 és CH3 között a P1 pontban történő gerjesztés esetén

A művelet ellenőrzéséhez az időeltolás számítását az FFT algoritmus segítségével is elvégezzük. Ehhez CH1, CH2 és CH3 jeleket transzformáljuk a frekvencia tartományba majd

CH1 komplex spektrumát megszorozzuk CH2 komplex konjugált spektrumával, amivel előállítjuk az ún. keresztjeljesítmény spektrumot. Ezután elvégezzük ezen az inverz FFT transzformációt, amivel a CH2 és CH1 vonatkozásában megkapjuk a keresztkorrelációs időfüggvényt. Ezeket a műveleteket elvégezzük CH1 és CH3 vonatkozásában is. A műveleteket itt is GNU/Octave segítségével végezzük el. Az időeltolódások vonatkozásában a már említett „xcorr” függvénnyel és az FFT/invFFT műveletekkel számított időeltolódások egymással megegyeznek, tehát egyenértékűek egymással (1. táblázat). Az időeltolódások a TD21 és TD31 paraméterrel jelöltük, ahol a TD az angol „Time Delay” rövidítése.

1. táblázat. A két módszerrel számított időkülönbségek

	TD ₂₁ [s]	TD ₃₁ [s]
xcorr	0.0466	0.0250
FFT/iFFT	0.0476	0.0239

Megjegyzendő, hogy a modern zaj és rezgésmérő szoftverekben beállítható, hogy már a mérés során a kiválasztott csatornák közti keresztjeljesítményspektrum is rögzítésre kerüljön, amelyen inverz FFT műveletet végrehajtva megkapjuk a keresett keresztkorrelációs függvényt.

6. EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE ÉS A MÓDSZER TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEI

Az előző fejezetben leírt időkések értékei már csak a 3. fejezetben leírt algoritmusba behelyettesítve a GNU/Octave program kiszámolja a keresett hiba koordinátáit. Vizsgáljuk először azonban az időkések elméleti értékeit is. Lemezserű alkatrészekben, mint a karosszériaelemek jelentős része is, elsősorban hajlító hullámok terjednek. A hajlító hullámok terjedési sebessége a rugalmassági modulustól, a Poisson-számtól és az anyag sűrűségétől függ. Acél anyagra ezek figyelembevételével a terjedési sebességre $c_{hj} = 3200 \text{ m/s}$ adódik. Az érzékelők ismert geometriai koordinátáikból egyszerűen ($t = s/v$) kiszámíthatjuk a beérkezési időkülönbségeket, amelyek $TD_{elm21} = 0,000159 \text{ s}$, és $TD_{elm31} = 0,0001218 \text{ s}$ -ra adódnak. Az 1. táblázat értékeivel összehasonlítva láthatjuk, hogy a mérésből számított értékek 2 nagyságrenddel nagyobbak az elméleti értékektől. Elvégezve a helymeghatározási számításokat az eredmények száz m nagyságrendbe esnek, amelyek túl nagyok a karosszéria *max.* 4,5 m hosszához képest. A bemutatott módszer célja a hibák

helymeghatározása, azonban a jelenleg közreadott eredmények alapján a helymeghatározás hibája még túl nagy. Az eltérés oka sokrétű lehet. Először is vizsgálni kell a hullámterjedési sebesség változását terjedés közben, mivel a közeg nem homogén, abban az impedancia változik. Másodsorban a mérés kori mintavételezési frekvencia elégtelensége lehet az ok. A méréshez egy általános rendeltetésű NVH mérési adatgyűjtőt használtunk (B&K Photon+), amelyben beállítható mintavételezési frekvenciát használtuk, azaz 65 kHz -et. Más adatgyűjtőt alkalmazva, pl. NI 9775, akár már 20MHz mintavételezési frekvenciát is használhatunk. A következő lépésben tehát ezen adatgyűjtő alkalmazását fogjuk vizsgálni, hogy mennyiben befolyásolja a helymeghatározás pontosságát a mintavételezési frekvencia növelése. A harmadik, és egyben legígéretesebb vizsgálati lehetőség a hajlító hullámok terjedési sebességének diszperzitásának figyelembe vétele. A jövőbeli munka célja ennek a hibának a csökkentése, eliminálása. Ennek sikere esetén olyan módszer fog rendelkezésre állni, amelyre nincs létező példa. Ez adja majd a munka újszerűségét.

7. IRODALOM

- [1] Kriston, B.J., Jálics, K.: Malfunction or Normal Operation? Evaluation of the Subjectivity of Noise and Vibration Phenomena Accompanying the Operation of Motor Vehicles, LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING Vehicle and Automotive Engineering 4 pp. 848-860., 13 p. (2022)
- [2] Kriston, B.J., Jálics, K.: Application of vibro-acoustic methods in failure diagnostics, JOURNAL OF PHYSICS-CONFERENCE SERIES 1935, 1 p. 012002, 22 p. (2021)
- [3] Szabó, J.Z., Dömötör, F.: Comparative Testing of Vibrations in Vehicles Driven by Electric Motor and Internal Combustion Engine (ICE). In: Jármái, K., Cservenák, Á. (eds) Vehicle and Automotive Engineering 4. VAE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_72
- [4] Schau, H., Robinson, A.: Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences, IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, vol. 35, no. 8, pp. 1223-1225, 1987, doi: 10.1109/TASSP.1987.1165266.
- [5] Zong Thai, D. et al: A.: Speaker Localisation Using Time Difference of Arrival, School of Electrical and Electronic Engineering, The University of Adelaide, DSTO-TR-2126, 2008