

IPARI ROBOTKAR CSILLAPÍTÁSI TÉNYEZŐ ÉS FREKVENCIAVÁLASZ VIZSGÁLATA MÉRÉSEL ÉS VÉGESELEMES MÓDSZEREKKEL

INDUSTRIAL ROBOT ARM DAMPING COEFFICIENT AND FREQUENCY RESPONSE TESTING WITH MEASUREMENT AND FINITE ELEMENT METHODS

Bodnár Dávid*, Jármái Károly**

ABSTRACT

Ez a cikk egy robotkar rezgési jellemzőit vizsgálja kísérleti mérések és végeelem-elemzés (VEM) segítségével. A manipulátor típusa a MELFA RV-2SDB15. A frekvenciaválasz és a rezgésjellemzők négy különböző tengelyen mérve és összegezve kerülnek meghatározásra; A kísérleti eredmények a digitális modell viszonyítási alapjául szolgálnak.

This paper investigates the vibration characteristics of a robotic arm using real measurements and finite element analysis (FEA). The manipulator type is the MELFA RV-2SDB15. The frequency response and vibration characteristics are measured based on four different axes; the experimental data are used as a reference for the digital model.

1. BEVEZETÉS

A robotkar dinamikus viselkedésének pontos előrejelzése kulcsfontosságú a robotrendszerek fejlesztéséhez és optimalizálásához. E viselkedés lényeges eleme a sajátfrekvencia és frekvenciaválasz, amely közvetlenül befolyásolja a kar stabilitását, pontosságát és működési hatékonyságát [1–6].

E tanulmány elsődleges célja az elméleti előrejelzések és gyakorlati adatok közötti űr betöltése a robotkar frekvenciaválaszának VEM-es és kísérleti mérések segítségével történő igazolásával. A cél annak a felvetésnek a vizsgálata, hogy a robotkar végeelemes analízissel meghatározott sajátfrekvenciái pontosan tükrözhetik a fizikai mérésekből kapott eredményeket.

Ebben a cikkben először egy robotkar lehetséges sajátfrekvenciái, és csillapítási tényezője kerül meghatározásra. Ezek a mérések viszonyítási alapként szolgálnak az ANSYS-al végzett VEM-szimulációk pontosságának értékeléséhez. A szimulált és a mért frekvenciaadatok összehasonlításával a cikk célja, hogy bizonyítsa a FEA mint prediktív eszköz megbízhatóságát ebben az alkalmazásban [7, 8].

1.1 Mitsubishi Melfa RV-2SDB15

A Mitsubishi Electric a MELFA RV ipari robotok széles választékát kínálja. Főbb jellemzőik:

Sokoldalúság: Különböző feladatok ellátására alkalmasak, mint például az anyagmozgatás, a csomagolás, az összeszerelés vagy a hegesztés.

Pontosság: Kiváló ismétlési pontossággal rendelkeznek, ami a precíz munkavégzést biztosítja.

Sebesség: Nagy sebességgel képesek végrehajtani a feladatokat, így növelve a termelékenységet.

Robusztusság: Strapabíró kialakításúak, így hosszú élettartamra számíthatunk.

Könnyű programozhatóság: A felhasználóbarát programozási felületnek köszönhetően egyszerűen beállíthatók és üzemeltethetők.

Ez a robottípus 6 szabadsági fokkal rendelkezik. Kinematikája ismert [9].

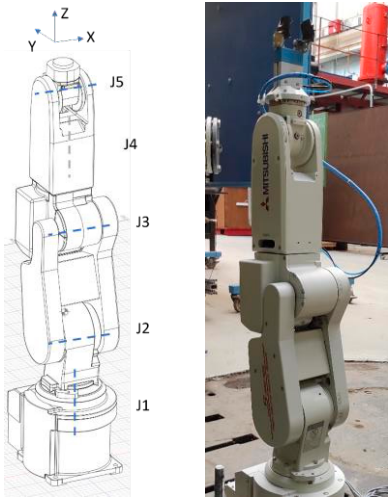
A vizsgálatok a robotkar végállásában, áramtalanítva végeztük. A választott konfigurációval a cél az, hogy a különböző csuklóknál differenciák jelenjenek meg. A teljes mérés során a manipulátor pneumatikus megfogóval volt felszerelve. Ez közelebb áll a valós körülményekhez, mivel a manipulátor nem tud feladatokat végrehajtani a rá szerelt végberendezés nélkül.

2. MÉRÉS RÉSZLETEI ÉS EREDMÉNYE 2.1. MÉRŐRENDSZER

- Robot: Mitsubishi Melfa RV-2SDB15 [10]
- Mérőeszköz: NI cDAQ-9178 gyorsulásmérő NI9234 USB keretben.
- Szoftver: NI SignalExpress
- Gyorsulásmérő érzékenysége: 100 mV/g
- Gerjesztési mód: Kalapácsütés
- Gerjesztett tengelyek: J1, J2, J3, J5
- Gerjesztési irányok: a gyorsulásmérőhöz képest X és Y pozitív és negatív irányban, J1 esetében a Z tengelyen is.

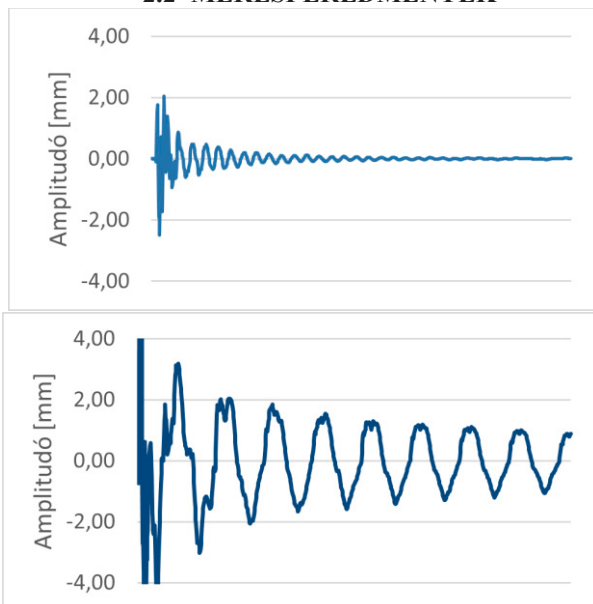
* mérnök, Emerson Automation FCP Kft. Eger, PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet



1. ábra Mérési elrendezés és mérési tengelyek

2.2 MÉRÉSI EREDMÉNYEK



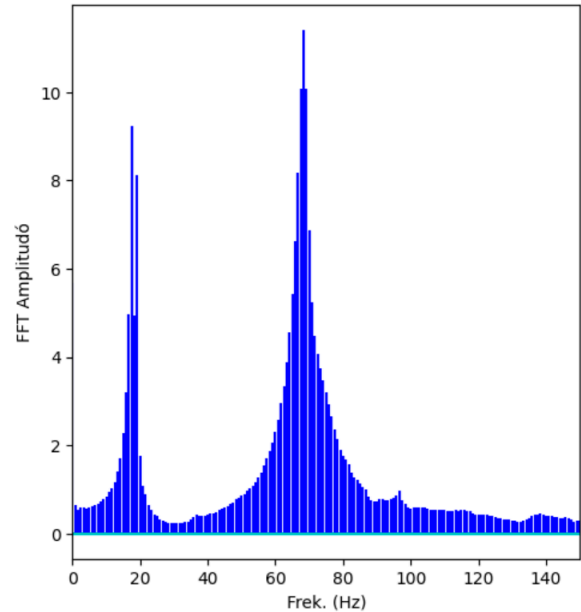
2. ábra J1 és J5 tengelyek mérési eredményei, azonos amplitúdón és időtartamon ábrázolva

A bemutatott ábrákból megállapítható, hogy a robot alapjához közeli tengely nagyobb relatív csillapítási tényezővel rendelkezik, mint a robotkar végén lévő J5 tengely. A 2. ábra adatai alapján meghatározható a különböző csuklók csillapítási tényezője. Ehhez az első 5 csúcs időbeli távolságát és amplitudóját felhasználva a logaritmikus dekrementum és annak segítségével a csillapítási tényező meghatározható.

1. táblázat Csillapítási tényezők a mérések alapján

Tengely	Csillapítási tényező
J1	0,039
J2	0,021
J3	0,023
J5	0,026

A mérési eredményekből meghatározhatóak a saját frekvenciák, FFT elemzést alkalmazva. Ennek az eredménye a 3. ábrán látható.



3. ábra Frekvenciacsúcsok FFT elemzés után

Az ábrán az általános eljárás szerint az első csúcsot kell figyelembe venni. Így nyilvánvaló lenne, hogy az első sajátfrekvencia 18 Hz-nél van, de ez a csúcs a mérőrendszer sajátosságaiából adódik. A mérőrendszer 18 Hz-nél éri el a 100 mV/g névleges érzékenységét, ami egy fals első csúcsot eredményez. Ezért a második csúcsot kell figyelembe venni, az ezzel a rendszerrel mérhető első sajátfrekvencia 68 Hz-nél van. Más csúcsokat nem lehet egyértelműen azonosítani a 0-150 Hz tartományon.

3. VÉGESELEMES VIZSGÁLATOK

3.1 MELFA RV-2SDB CAD MODEL

A manipulátor 3D modellje a gyártó támogatási oldaláról beszerezhető. A letölthető modell méretpontos, de hiányoznak belőle a belső geometriai jellemzők és a mozgást megvalósító elemek. Továbbá a CAD-rendszer által számított tömeg nagyobb, mint az adattáblán szereplő megközelítőleg 20 kg.

Ahhoz, hogy az egyszerűsített modell készen álljon az elemzésre, a következő módosításokat végeztük el:

1. A modellben zsebek kerültek kialakításra.
2. A J4 tengely körüli felső rész 10 mm-re befelé extrudált, hogy utánozza a robot alumínium részét.
3. A testrészek kapcsolódásaihoz 6 mm-es tengelyek kerültek.
5. A modális elemzéshez a rendszert lineárisnak kell feltételezni. Ezt a VEM eredmények igazolták.
6. A modellre a mérési elrendezésnek megfelelő pneumatikus megfogó került.

3.2 MODÁLIS ELEMZÉSI FOLYAMAT

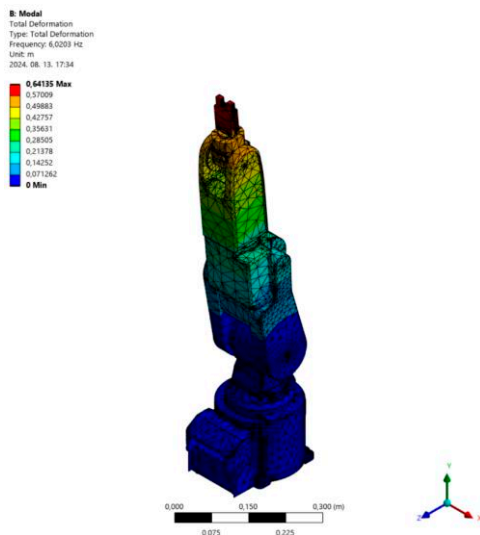
A manipulátor 3D-s CAD-modelljét az Autodesk Fusion-ból (Fusion 2.0) az ANSYS (Academic Student 2024 R2) kereskedelmi végeelem csomagba importálva lehetőség nyílik az elemzések elvégzésére. A manipulátor konfigurációja megegyezik a kísérlettel. A hozzárendelt anyag minden testrészhöz általános alumínium ötvözet, mivel az alapanyag pontos összetétele ismeretlen. A következő lépés a hálógenerálás: az elemméretet 25 mm-re állítva, adaptív méretezést használva 118532 csomópont és 71809 elem az eredmény. Az elemméret további csökkentése nem lehetséges ennél a modellenél az akadémiai diáklícenc miatt, amelynek korlátja 125000 csomópont. A modális analízis csak lineáris kapcsolatokkal futtatható le, ezért a J1 és J4 tengelyek esetében a kötés típusát Bonded, a többi kapcsolat esetében pedig No Separation (nincs szétválasztás) módon kell meghatározni.

3.3 MODÁLIS ELEMZÉS EREDMÉNYEI

Az elemzés eredménye kis mértékben tér el a kísérleti eredményektől. Ezért alkalmas lehet a különböző rezgésekkel és rezgéscsillapítással kapcsolatos jövőbeli vizsgálatokhoz. [11, 12] Az eredményt a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat Modális elemzés eredményei

Módszer	Frekvencia [Hz]
Kísérleti eredmény	68
VEM Modális analízis	67,153



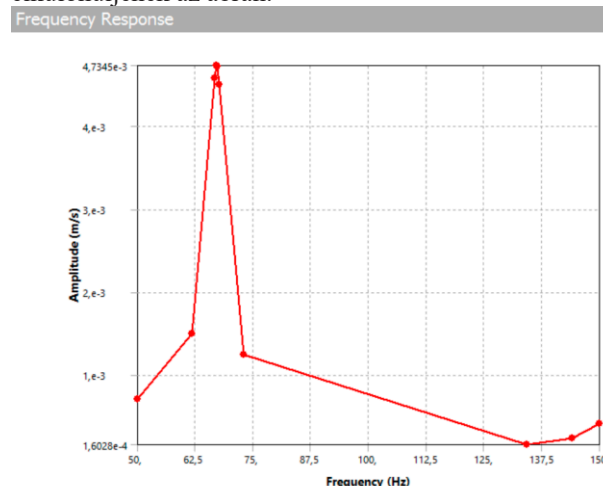
4. ábra A Modális elemzés eredménye

A feltüntetett maximális elmozdulás nem abszolút érték, mivel nincs meghatározva a terhelés iránya a vizsgálatból

adódóan, de felhasználható a modell leginkább érintett részének meghatározására.

3.4 FREKVENCIAVÁLASZ

A frekvenciaválasz elemzést általában arra használják, hogy egy szerkezetben a potenciálisan veszélyes rezgések hatásait elemezzék, [13, 14] az adott esetben vizsgált frekvenciatartományt egy korábban meghatározott sajátfrekvencia közelében lévő kis tartományra állítva. Ettől a szerzők eltértek, a tartományt a frekvenciaválasz megállapításához 50 és 150 Hz közötti tartományt választva, ami lehetőséget ad az eredmény jellegének a bemutatására. A támaszokat is másképp szükséges beállítani: a modális analízishez csak az alap rögzítése szükséges, de a frekvenciaválaszhoz egy olyan erőhatás is kell, amely a mérések során a szerkezet gerjesztésére használt kalapácsütést reprodukálja. Csillapítási tényezőnek a mérés során meghatározott tényezőt használtuk. A szerkezet harmonikus válasza az ábrán látható. A klaszterszámot 4-re állítva biztosítható, hogy az csúcok jól láthatóan elkülönüljenek az ábrán.



5. ábra Frekvenciaválasz számítási eredmények

A csúcs megfelel a kísérleti és modális elemzés eredményének is. A modális és frekvenciaválasz VEM számításai között a 3D modell közös. Modális elemzésnél nem értelmezhető csillapítási tényező, azt csak a frekvenciaválasz veszi figyelembe. A két módszer jól kiegészíti egymást, az eredményeket a 3. táblázat mutatja be.

2. táblázat Összesített eredmények

Módszer	Frekvencia [Hz]
Kísérleti eredmény	68
VEM modális elemzés	67,153
VEM frekvenciaválasz	67,111

*A csillapítási együttható nem szerepel a táblázatban, mivel ez a FEA bemenete

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Ebben a tanulmányban egy robotkar rezgési jellemzőit vizsgáltuk kísérleti mérések és végeselemes analízis (FEA) segítségével. A frekvenciaválasz és a rezgésjellemzők több tengelyre és több irányra vonatkozóan kerültek meghatározásra, és a méréseket a VEM is reprodukálja. A kísérleti és a VEM-számítás nagyfokú egyezést mutat. A kutatás következő lépése a matematikai modell elemzése az ellenőrzött digitális modell segítségével.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki Bozzay Péternek a mérés során nyújtott segítségével; Hegedűs Györgynek a kísérlethez szükséges robotkar biztosításáért és a kutatás befejezésének ösztönzéséért.

A C2307874 számú projekt a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2023 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

5. IRODALOM

- [1] TANG, YADONG, YONGCHANG YU, JINGZHAO SHI és SHUAIJUN ZHANG. Modal and harmonic response analysis of key components of robotic arm based on ANSYS. *Vibroengineering Procedia* [online]. 2017, 12, 109–114 [elérés. 2024-07-23]. ISSN 2345-0533. <https://doi.org/10.21595/vp.2017.18703>
- [2] TSETSERUKOU, D., N. KAWAKAMI és S. TACHI. Vibration damping control of robot arm intended for service application in human environment. In: *Humanoids 2008 - 8th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots* [online]. B.m.: IEEE, 2008, o. 441–446 [elérés. 2024-07-23]. ISBN 978-1-4244-2821-2. <https://doi.org/10.1109/ICHR.2008.4755992>
- [3] KAVRAKI, LYDIA E és STEVEN M LAVALLE. *Springer Handbook of Robotics* [online]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-23957-4. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5>
- [4] BADKOOBEHHEZAVEH, HEDIEH, REZA FOTOUHI, QIANWEI ZHANG és DOUGLAS BITNER. Vibration Analysis of a 5-DOF Long-Reach Robotic Arm. *Vibration* [online]. 2022, 5(3), 585–602. ISSN 2571631X. <https://doi.org/10.3390/vibration5030034>
- [5] BOTTA, ANDREA, PARIDE CAVALLONE, LORENZO BAGLIERI, GIOVANNI COLUCCI, LUIGI TAGLIAVINI és GIUSEPPE QUAGLIA. *A Review of Robots, Perception, and Tasks in Precision Agriculture* [online]. B.m.: MDPI. 1. szeptember 2022. ISSN 26733161. <https://doi.org/10.3390/applmech3030049>
- [6] MUJČIĆ, EDIN, SABINA LONIĆ és MERSA MUMINOVIĆ. Programming and Experimental Analysis of MELFA RV-2SDB Robot. In: *Lecture Notes in Networks and Systems* [online]. B.m.: Springer, 2018 [elérés. 2024-07-23], o. 810–818. https://doi.org/10.1007/978-3-319-71321-2_70
- [7] AMAR NAGESWARA RAO, DR. Modeling and Analysis of Robot ARM using ANSYS. *IJSETR* [online]. 2015, Vol.04, 6692–6697 [elérés. 2024-07-23]. ISSN 2319-8885
Elérhető: www.ijsetr.com
- [8] AMER, MONA, JOERG WALLASCHEK és JOERG R. SEUME. Operational Modal Analysis of an Axial Compressor Rotor and Casing System for the Online Identification of a Digital Twin. *Applied Mechanics* [online]. 2022, 3(1), 244–258. ISSN 26733161. <https://doi.org/10.3390/applmech3010017>
- [9] PAPCUN, PETER és J. JADLOVSKÝ. Mathematical Model of Robot Melfa RV-2SDB. *Advances in Intelligent Systems and Computing* [online]. 2015, 316, 145–154. ISSN 21945365. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10783-7_16
- [10] RV-2SD/2SDB Standard Specifications Manual (CR1DA-700 series Controller). 2012.
- [11] NGUYEN, VINH és SHREYES N. MELKOTE. Identification of industrial robot frequency response function for robotic milling using operational modal analysis. In: [online]. B.m.: Elsevier B.V., 2020, o. 154–158. ISSN 23519789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.05.032>
- [12] CHEN, HAN és KEIVAN AHMADI. Estimating pose-dependent FRF in machining robots using multibody dynamics and Gaussian Process Regression. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2022, 77. ISSN 07365845. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102354>
- [13] NAGY, SZILÁRD, KÁROLY JÁRMAI és ATTILA BAKSA. Combination of GPU Programming and FEM Analysis in Structural Optimisation. *Lecture Notes in Mechanical Engineering* [online]. 2023, 756–767 [elérés. 2024-08-29]. ISSN 2195-4364. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15211-5_63
- [14] YU, YONGCHANG, SHUAIJUN ZHANG, HE LI, XIAOFEI WANG és YADONG TANG. Modal and Harmonic Response Analysis of Key Components of Ditch Device Based on ANSYS. *Procedia Engineering* [online]. 2017, 174, 956–964 [elérés. 2024-08-13]. ISSN 1877-7058. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2017.01.247>