

# Univerzális csomagológép digitális ikerpárjának létrehozása virtuális beüzemeléssel

## Creation of a Digital Twin of a Universal Packaging Machine with Virtual Commissioning

PÉTER Ádám<sup>1</sup>

Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar, 6000 Kecskemét Izsáki út 10. +36 (76) 516-301,  
<https://gamf.uni-neumann.hu/elerhetosegek/>; gamfdekanihivatal@nje.hu

### Abstract

*Digital twin technology is one of the key elements of Industry 4.0, enabling real-time simulation, testing, virtual commissioning, and optimization of physical systems. Within the framework of a university research and development project, a fully functional digital twin of a universal packaging machine was developed, integrating a Unity-based 3D environment, Siemens S7 PLC communication, and a visual programming system (PlayMaker).*

**Keywords:** digital twin, virtual commissioning, Unity, Siemens, industrial automation

### Kivonat

*A digitális iker technológia az Ipar 4.0 egyik kulcseleme, amely lehetőséget teremt a fizikai rendszerek valós idejű szimulációjára, tesztelésére, virtuális beüzemelésére és optimalizálására. Egyetemi kutatási és fejlesztési projekt keretében egy univerzális csomagológép teljes értékű digitális ikerpárja készült el, amely a Unity játékmotoron alapuló 3D környezetet, Siemens S7 PLC-kommunikációt és vizuális programozási rendszert (PlayMaker) integrál.*

**Kulcsszavak:** digitális iker, virtuális beüzemelés, Unity, Siemens, ipari automatizálás

## 1. BEVEZETÉS

Az ipari automatizálás fejlődése az elmúlt években új megközelítéseket követelt meg a géptervezés, rendszerintegráció és üzembe helyezés területén. A hagyományos fejlesztési folyamat során a mechanikai tervezés, a vezérlési rendszer implementálása és a fizikai beüzemelés egymást követő lépésekben valósult meg, amely gyakran jelentős idő- és költségigénnyel járt. A vezérlési logikában vagy a rendszerintegrációban rejlő hibák sok esetben csak a helyszíni üzembe helyezés során váltak felismerhetővé, ami többletmunkát és kockázatot eredményezett. A digitális iker technológia és a virtuális beüzemelés alkalmazása, amelyek lehetővé teszik a fizikai rendszerek működésének előzetes vizsgálatát és validálását virtuális környezetben. A digitális iker olyan komplex modellként értelmezhető, amely nem csupán a berendezés geometriai reprezentációját tartalmazza, hanem képes a mechanikai mozgások, a vezérlési algoritmusok és a szenzor-aktuátor kapcsolatok integrált szimulációjára is. A virtuális beüzemelés ezen modell ipari alkalmazását jelenti, ahol a vezérlőrendszer és a digitális környezet közötti adatkapcsolat révén a teljes rendszer viselkedése még a fizikai megvalósítás előtt tesztelhető. Az univerzális csomagológép digitális ikerpárjának korábbi fejlesztése bemutatta, hogy a Unity játékmotor, a Siemens SIMATIC S7 PLC kommunikáció és a vizuális programozási eszközök integrációja alkalmas komplex ipari rendszerek modellezésére. [1]

## 2. A DIGITÁLIS IKER ÉS A VIRTUÁLIS BEÜZEMELÉS ELMÉLETI HÁTTERE

A digitális iker koncepciója eredetileg nagy megbízhatóságot igénylő rendszerek – például az úripari alkalmazások – modellezésében jelent meg, ahol a fizikai rendszer virtuális megfelelője lehetőséget biztosított

a működési állapotok és meghibásodások szimulációjára. Az ipari automatizálás területén a digitális iker mára a gyártórendszerek tervezésének, optimalizálásának és életciklus-kezelésének meghatározó eszközévé vált.

A digitális iker lényegi eleme a fizikai rendszer és annak virtuális reprezentációja közötti kapcsolat. A legegyszerűbb esetben ez egy statikus geometriai modell, amely elsősorban vizualizációs célokat szolgál. Fejlettebb szinten a modell már tartalmazza a mozgásláncok és szabadságfokok leírását, így lehetővé válik a rendszer kinematikai viselkedésének reprodukálása. Amennyiben a modell fizikai motorral is kiegészül, a dinamikai jellemzők például tömegek, erők és ütközések is figyelembe vehetők. A legösszetettebb megközelítések esetén a digitális iker képes komplex kölcsönhatások, tönkremeneteli folyamatok és fotorealisztikus vizualizáció kezelésére is.

A virtuális beüzemelés ezen modellezési szintekre építve biztosít lehetőséget a vezérlési rendszer korai validációjára. A módszer célja, hogy a PLC-program, a mechanikai modell és a szenzor-aktuátor kapcsolatok egy integrált környezetben működjenek együtt. Ennek eredményeként a rendszer viselkedése a fizikai telepítést megelőzően vizsgálható, ami csökkenti a helyszíni beavatkozások számát és növeli a fejlesztés biztonságát.

A virtuális beüzemelés nem kizárólag a hibakeresést támogatja, hanem lehetőséget teremt a kezelőfelületek vizsgálatára, az operátori interakciók modellezésére és a rendszer paramétereinek optimalizálására is. Ily módon a digitális iker a fejlesztési folyamat aktív eszközévé válik, amely összekapcsolja a tervezési, vezérlési és üzemeltetési szempontokat.

### **A virtuális beüzemelés szintjei és gyakorlati értelmezésük**

A virtuális beüzemelés nem egységes technológiai állapotként értelmezhető, hanem különböző fejlettségi szinteken valósítható meg. A szintek közötti különbséget elsősorban az határozza meg, hogy a digitális iker milyen mértékben integrálódik a vezérlőrendszerrel, illetve milyen mélységben reprezentálja a fizikai rendszer működését. A célgépek és robotcellák tervezése során szerzett tapasztalatok alapján négy, egymásra épülő megközelítés különíthető el.

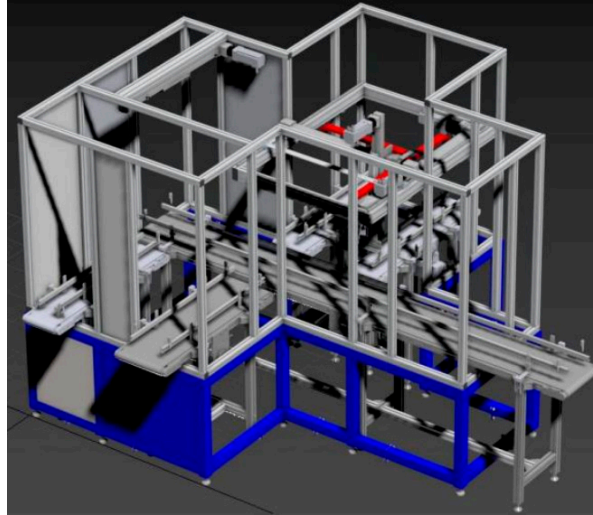
A legalacsonyabb szinten a digitális iker működését kizárólag a játékmotorban implementált logika irányítja. Ebben az esetben a rendszer viselkedése előre definiált állapotgépek, szkriptek vagy paraméterezett animációk alapján történik, külső vezérlőegység bevonása nélkül. A modell alkalmas a mechanikai struktúra ellenőrzésére, a mozgástartományok validálására és az ütközések vizsgálatára, azonban a PLC-program valós tesztelésére még nem ad lehetőséget. Ez a szint elsősorban koncepcióellenőrzésre és vizuális validációra alkalmazható, különösen a fejlesztés korai fázisában.

A harmadik szintet a valós hardverrel vezérelt digitális iker jelenti. Ebben az esetben a digitális modell egy tényleges ipari PLC-hez kapcsolódik, például egy Siemens S7-1200 vagy S7-1500 típusú vezérlőhöz. A kommunikáció valós idejű adatkapcsolaton keresztül történik, így a digitális környezet a fizikai vezérlő kimeneteire reagál, miközben a bemeneti jeleket a virtuális szenzorok generálják. Ez a megközelítés lehetővé teszi a teljes vezérlési és kommunikációs lánc validálását, beleértve a hálózati beállításokat, a címzési struktúrát és az I/O-kiosztást. A rendszer működése ebben az esetben már nagymértékben megfeleltethető a későbbi fizikai berendezés viselkedésének, így alkalmas a gyári átvételi tesztek előkészítésére és a helyszíni beüzemelés kockázatának csökkentésére.

A legmagasabb szinten a virtuális és a fizikai rendszer párhuzamosan, szinkronizált módon működik. Ebben a konfigurációban a digitális iker nem csupán tesztelési környezetként szolgál, hanem a működő berendezés valós idejű leképezéseként funkcionál. A fizikai rendszer szenzoradatai közvetlenül megjelennek a virtuális modellben, amely képes visszacsatolást is biztosítani. Ez a megközelítés lehetőséget teremt az üzem közbeni felügyeletre, a karbantartási stratégiák támogatására és az operátori képzésre. A módosítások és optimalizálások előzetesen tesztelhetők a virtuális környezetben anélkül, hogy a termelési folyamat megszakadna. A négy szint közötti átmenet nem éles határvonal mentén történik, hanem fokozatos integrációval valósul meg. A gyakorlatban gyakran előfordul, hogy egy fejlesztési projekt a játékmotor-alapú modell validációjával indul, majd virtuális PLC-integrációval folytatódik, végül pedig valós hardverrel zárul. A módszer legnagyobb előnye abban rejlik, hogy a hibák jelentős része már a fizikai kivitelezés előtt azonosítható, ezáltal csökkentve a költségeket és a beüzemelési időt. [2][7][5]

### 3. AZ UNIVERZÁLIS CSOMAGOLÓGÉP DIGITÁLIS IKRÉNEK MŰSZAKI MEGVALÓSÍTÁSA

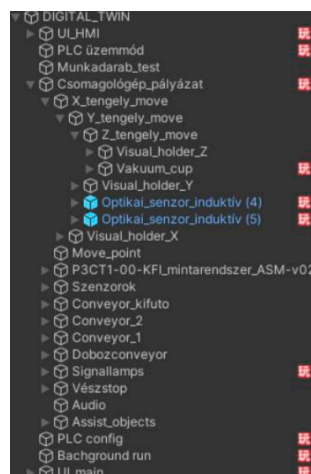
A virtuális beüzemelés gyakorlati értéke nagymértékben függ a digitális iker pontosságától és strukturáltságától. Az univerzális csomagológép esetében a fejlesztési folyamat a rendelkezésre bocsátott STEP formátumú 3D modell feldolgozásával indult. A modell ipari tervezőszoftverben készült, így geometriai részletessége jelentősen meghaladta a valós idejű szimulációhoz szükséges mértéket. A közvetlen importálás nem lett volna célszerű, mivel a túlzott poligonszám számottevő teljesítménycsökkenést eredményezett volna. A kapott modell az 1. ábrán látható 3Ds Max szoftverben.



1. ábra. A csomagológép 3D modellje 3Ds Max-ban. [saját kép]

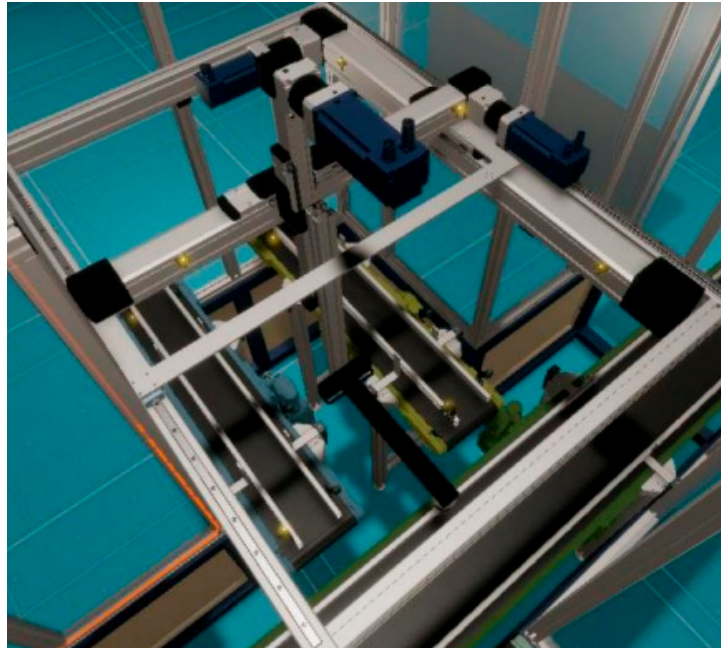
A modell ezért először FBX formátumba került konvertálásra, majd a Unity környezetbe történő importálást követően optimalizálási eljárásokon esett át. A nyers modell közel 12,9 millió poligont tartalmazott, amely valós idejű fizikai szimuláció és PLC-kommunikáció mellett nem biztosított volna stabil futási teljesítményt. Az optimalizálás során eltávolításra kerültek azok a részletek – például kötőelemek, belső szerkezeti elemek, apró mechanikai komponensek, amelyek a működés szempontjából nem befolyásolták a szimuláció eredményét. Az egyszerűsítést követően a jelenet poligonszáma mintegy 2,6 millióra csökkent, ami már megfelelő kompromisszumot jelentett a vizuális minőség és a számítási teljesítmény között.

A modell optimalizálását követően kiemelt jelentőséget kapott a hierarchikus objektumstruktúra kialakítása. A valós gép mechanikai felépítésének megfelelően a digitális iker is logikailag elkülönített egységekre bontva került felépítésre. A jelenetben külön kezelési réteget kaptak a statikus környezeti elemek, a vezérléshez kapcsolódó komponensek, valamint maga a digitális iker objektum. Ez a strukturált felépítés nem csupán az áttekinthetőséget szolgálta, hanem a mozgásláncok és a vezérlési kapcsolatok korrekt működésének is alapfeltétele volt. A felépítést a 2. ábra mutatja be.



2. ábra. Unity DIGITAL\_TWIN objektum felépítése [saját kép]

A csomagológép egyik legmeghatározóbb eleme a háromtengelyű, derékszögű koordinátarendszerben mozgó manipulátor, amely a termékek és dobozok pozicionálását végzi. A digitális modellben a mozgáslánc megfelelő szülő–gyermek kapcsolatainak kialakítása kulcsfontosságú volt, mivel a tengelyek egymásra épülő translációs mozgásokat valósítanak meg. A hajtásrendszer vezérléséhez egy referencia-objektum került bevezetésre, amelynek térbeli pozíciója határozta meg a manipulátor aktuális végpontját. A referencia pont koordinátáinak módosítása esetén a tengelyek automatikusan felvették az új pozícióhoz tartozó értékeket, ezáltal biztosítva a folyamatos és fizikailag konzisztens mozgást. Ez a megközelítés lehetővé tette, hogy a PLC-ből érkező célpozíciók közvetlenül leképezhetők legyenek a 3D környezetben. A háromtengelyű hajtásrendszer Unity-s képét a 3. ábrán látható.



3. ábra A manipulátor modellje Unity-ban [saját kép]

A rendszer másik lényeges komponense a futószalag-pályák modellezése volt. A konveorok esetében nem elegendő pusztán animáció alkalmazása, mivel a munkadarabok fizikai interakciója és szenzorérzékelése is modellezendő. A digitális ikerben a futószalagok kinematikus merevtest-komponensekkel, valamint érzékelő és ütköző zónákkal kerültek kialakításra. Az érzékelési zónák a munkadarabok jelenlétének detektálását, míg az ütköző felületek a fizikai kölcsönhatások kezelését biztosították. A munkadarabok állapotkezelése véges állapotgépen alapult, amely a beérkezés, szállítás és kilépés fázisait koordinálta. Ez a megoldás lehetővé tette, hogy a PLC által vezérelt motorindítási és megállítási parancsok valós idejű hatást gyakoroljanak a virtuális termékáramlásra.

A szenzorok modellezése szintén meghatározó szerepet játszott a rendszer hitelességében. Az optikai érzékelők esetében nem csupán logikai állapotváltozás történt, hanem vizuális visszajelzés is megjelent a 3D térben, amely megkönnyítette a hibakeresést és a folyamat vizsgálatát. Az induktív végállásérzékelők a tengelyek pozíciójának határfeltételeit definiálták, biztosítva a mechanikai mozgástománnyok helyes korlátozását. A vákuumos megfogó működése szintén logikai és vizuális szinten került modellezésre, lehetővé téve a megfogási és elengedési ciklusok pontos vizsgálatát.

A vezérlési logika a Unity környezetben vizuális programozási eszközzel került implementálásra, amely lehetővé tette az állapotátmenetek és működési szekvenciák strukturált kezelését. A mechanikai mozgások, a szenzorjelek és a PLC-ből érkező változók egységes rendszerben kapcsolódtak össze, így a digitális iker nem csupán animált modellként, hanem funkcionális szimulációs platformként működött.

A modell felépítése során kiemelt szempont volt a valós idejű működés stabilitása. A grafikai optimalizálás, a fizikai számítások korlátozása és a vezérlési ciklusidők összehangolása biztosította, hogy a rendszer folyamatos adatkapcsolat mellett is stabil képkockasebességet tartson. Ez különösen fontos a virtuális beüzemelés során, ahol a vezérlési logika és a 3D környezet közötti időzítési eltérések hibás következtetésekhez vezethetnek. [4]

## 4. PC-PLC KOMMUNIKÁCIÓ ÉS VALÓS HARDVERREL TÖRTÉNŐ VIRTUÁLIS BEÜZEMELÉS

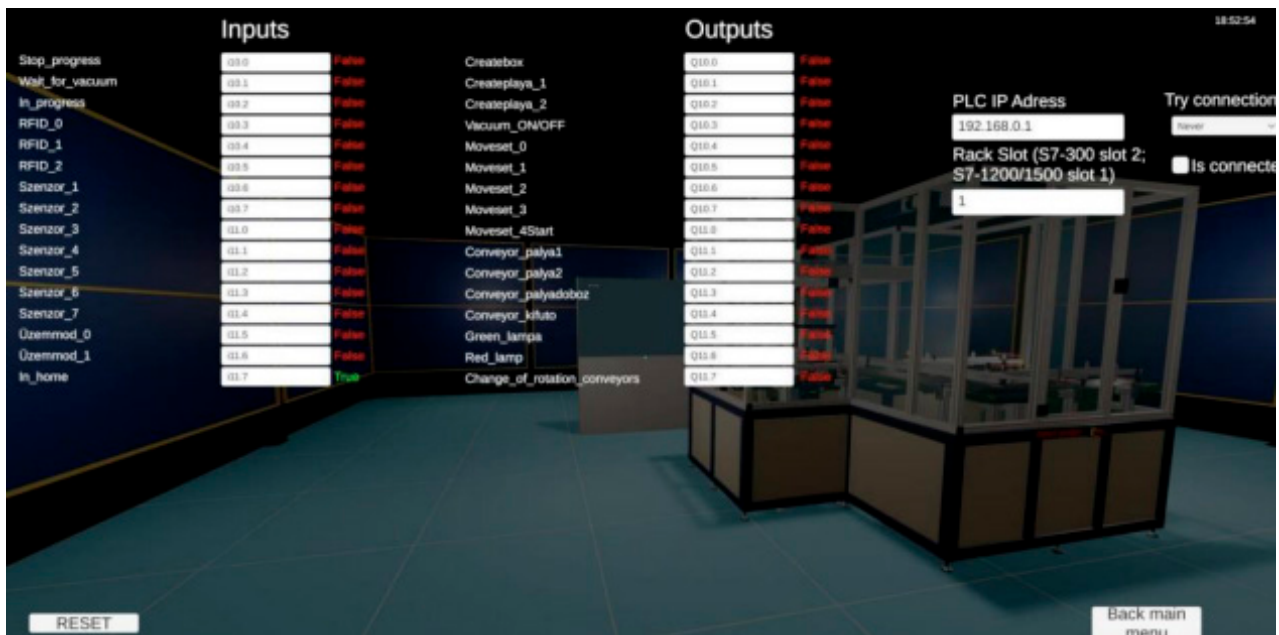
A virtuális beüzemelés egyik legkritikusabb eleme a digitális iker és a vezérlőrendszer közötti megbízható adatkapcsolat kialakítása. A mechanikai modell önmagában nem elegendő a vezérlési logika validálásához; a rendszer csak akkor tekinthető ipari szempontból relevánsnak, ha a PLC-program valós időben képes kölcsönhatásba lépni a 3D környezettel. Az univerzális csomagológép esetében a vezérlőprogram Siemens SIMATIC TIA Portal környezetben készült, S7-1200 típusú PLC-re. A kommunikáció Profinet protokollon keresztül valósult meg. A Unity és a PLC közötti adatcserét egy dedikált interfészréteg biztosította, amely képes volt a bemeneti és kimeneti változók strukturált kezelésére. A rendszerben elkülönített logika kezelte a PLC által írt kimeneti változókat és a virtuális környezet által generált bemeneti jeleket. Ez a szétválasztás biztosította, hogy az adatáramlás iránya egyértelmű és determinisztikus maradjon. A PLC kimeneti változói közvetlenül befolyásolták a digitális iker aktuátorainak állapotát. A motorindítási parancsok például a futószalagok mozgásának aktiválását eredményezték, míg a tengelypozíciók a manipulátor referencia-koordinátáin keresztül jelentek meg a 3D térben. A PLC ciklusideje és a Unity frissítési ciklusa közötti szinkronizáció kulcsfontosságú volt annak érdekében, hogy az állapotváltozások torzításmentesen jelenjenek meg.

A nem megfelelő időzítés adatvesztéshez vagy vizuális inkonzisztenciához vezethetett volna, ezért a kommunikációs ciklus optimalizálása a fejlesztés fontos részét képezte. A bemeneti oldal kezelésénél a virtuális szenzorok által generált jelek kerültek továbbításra a PLC felé. Amikor egy munkadarab áthaladt egy optikai érzékelő érzékelési tartományán, annak logikai állapota módosult, és ez a változás a PLC megfelelő bemeneti címére került továbbításra. A vezérlőprogram ezt valós fizikai jelként kezelte, így a vezérlési döntések ugyanazon logika szerint történtek, mintha a rendszer tényleges hardverkörnyezetben működne. Ez a megközelítés lehetővé tette a szenzorlogika, az állapotátmenetek és a biztonsági feltételek teljes körű ellenőrzését. A valós hardverrel történő tesztelés során különös figyelmet igényelt az I/O címezés és az adatstruktúrák megfeleltetése. A PLC adatblokkjainak szerkezete és a Unity oldali változókezelés közötti konzisztencia alapfeltétele volt a stabil működésnek. A hibakeresés jelentősen egyszerűbbé vált azáltal, hogy a 3D környezet vizuálisan is megjelenítette az egyes változók aktuális állapotát. A motorindítás, a szenzoraktiválás vagy a végállás elérése azonnal láthatóvá vált, ami gyors visszacsatolást biztosított a vezérlési program helyességéről.

A rendszer lehetőséget biztosított adatgyűjtésre is, amely a virtuális beüzemelés során további elemzési lehetőségeket teremtett. A meghatározott mintavételezési frekvenciával rögzített változók CSV formátumban kerültek mentésre, lehetővé téve azok utólagos kiértékelését. Bár a mechanikai mérések például motoráram, hőmérséklet vagy rezgés a digitális iker esetében szimulált értékek voltak a mérési infrastruktúra tesztelése szempontjából releváns visszajelzést adtak. A PLC-ből származó valós logikai változók rögzítése ugyanakkor lehetővé tette a vezérlési ciklusok és állapotváltások időbeli elemzését.

A valós hardverrel integrált digitális iker egyik legnagyobb előnye az volt, hogy a teljes vezérlési lánc a PLC programtól a szenzor és aktuátorszintig fizikai gép nélkül validálhatóvá vált. Ez különösen jelentős a fejlesztési ciklus azon szakaszában, amikor a mechanikai rendszer még nem áll rendelkezésre, vagy annak módosítása költséges lenne. A virtuális környezetben végrehajtott tesztek eredményei közvetlenül átültethetők a fizikai rendszerbe, így csökkenthető a helyszíni beüzemelés ideje és kockázata.

A kommunikációs architektúra tehát nem csupán adatátviteli megoldásként értelmezhető, hanem a virtuális beüzemelés alapvető infrastruktúrájaként. A digitális iker ebben az esetben már nem demonstrációs modell, hanem a vezérlőrendszerrel szoros integrációban működő, validációs célú mérnöki eszköz. A 4. ábrán látható a PLC-PC UI felület. [4] [3]



4. ábra PLC konfiguráló felhasználói felület [saját kép]

Konkrét referencia munkák videó felvételeken: [mind saját munkák]  
Az univerzális csomagológép működése a virtuális térben.

<https://www.youtube.com/watch?v=e7zJppGrpRQ>  
<https://www.youtube.com/watch?v=vCUFTfr-83U>  
<https://www.youtube.com/watch?v=S3lmhwyYSb0>

A GAMF Műszaki és Informatikai Kar (10/1) Robottechnika laboratóriumban lévő 3 tengelyes gép virtuális beüzemelésre mintapélda Siemens SIMATIC vezérléssel. A valós környezet és a virtuális környezet szinkronizációja valósul meg.

<https://www.youtube.com/watch?v=GWMluQ8YSh8>  
<https://www.youtube.com/watch?v=eSumxxKDrU&t=1s>

A GAMF Műszaki és Informatikai Karon a gépészmérnök BSc mechatronikai szakirányon lévő Mechatronikai tervezés című tantárgy beadandó házi feladatára egy lehetséges mintafeladat a digitális iker és a virtuális beüzemelésre.

[https://youtu.be/iS\\_04li\\_VXQ](https://youtu.be/iS_04li_VXQ)

## 5. KONKLÚZIÓ

A Unity játékmotor és a Siemens SIMATIC rendszerek integrációja lehetővé teszi olyan komplex ipari szimulációk létrehozását, amelyek a kisebb célgépektől egészen a teljes gyártórendszerekig skálázhatók. A játékiparból származó motorok, mint a jelen munkában alkalmazott Unity, illetve az Unreal Engine megfelelő alapot biztosítanak digitális ikrek és virtuális beüzemelési rendszerek megvalósításához. Külön előnyt jelent, hogy ezek a platformok oktatási környezetben is könnyen hozzáférhetők, így hatékonyan támogatják a mérnökképzést és a gyakorlati szemlélet kialakítását.

A digitális iker és a virtuális beüzemelés alkalmazása jelentősen csökkentheti a fizikai beüzemelés és a gépátadás időigényét, mivel a vezérlési és működési hibák már a fejlesztési fázisban azonosíthatók. Ugyanakkor a módszer alkalmazása nem mentes kihívásoktól. A szükséges szoftverek és eszközök hatékony használata jelentős tanulási időt igényel, valamint multidiszciplináris tudást feltételez. A fejlesztés során egyaránt szükség van 3D modellezési ismeretekre, programozási és rendszerszintű gondolkodásra, valamint megfelelő mérnöki kreativitásra, ami növeli a belépési küszöböt, ugyanakkor hosszú távon jelentős versenyelőnyt biztosíthat az ipari alkalmazásokban.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetet mondanak a projektben résztvevő intézmények - Nádor Rendszerház Kft., Controlsoft Automatika Szolgáltató Kft., Neumann János Egyetem GAMF Műszaki és Informatikai Kar - kollégáinak. Köszönettel tartozunk a kutatás támogatásáért, amely az "Ipar 4.0 moduláris felépítésű ipari csomagológép fejlesztése integrált adatelemzéssel és mesterséges intelligenciára épülő optimalizálással, hibaelemzéssel 2020-1.1.2-PIACI-KFI-2020-00062" pályázat keretében valósult meg. A projekt a Magyar Állam és az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával, a Széchenyi 2020 program keretében valósul meg.

## IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Industry 4.0 Policy Department Economic and Scientific Policy, 2016, p 22-23
- [2] Harshama, F.;Tomizuka, M., Fukda, T., Mechatronics-What is it, why and how? 1996
- [3] Siemens SIMATIC TIA Help Viewer
- [4] <https://docs.unity3d.com/6000.1/Documentation/Manual/UnityManual.html> Unity Manual utolsó megtekintés 2025.07.04
- [5] [https://en.wikipedia.org/wiki/Digital\\_twin](https://en.wikipedia.org/wiki/Digital_twin) Digital twin utolsó megtekintés 2025. 05.05
- [6] Radanliev, P. et al. (2022) Digital twins: artificial intelligence and the IoT cyber-physical systems in Industry 4.0. *Int. J. Intell. Robot. Appl.*, 6, 171–185. DOI:10.1007/s41315-021-00180-5
- [7] Huang, Z. et al. (2021) A Survey on AI-Driven Digital Twins in Industry 4.0: Smart Manufacturing and Advanced Robotics. *Sensors*, 21(19), 6340. DOI:10.3390/s21196340 [8] Javaid, M.; Haleem, A.; Suman, R. (2023) – Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review. *Cognitive Robotics*, 3, 71–92. DOI:10.1016/j.cogr.2023.04.003