

Négy lábú robotok CBRN-képességgel a nukleáris biztonságért: a CERN CERNquadbotjának tapasztalataitól az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. egy lehetséges biztonsági fejlesztéséig

Quadruped robots with CBRN capability for nuclear safety: from the experience of CERN's CERNquadbot to a possible safety improvement of MVM Paks Nuclear Power Plant Ltd.

Ondrejcsik László t. alezredes
Békés Vármegyei Katasztrófavédelmi Igazgatóság
Szeghalmi Katasztrófavédelmi Kirendeltség
iparbiztonsági felügyelő
Nemzeti Közszoigalati Egyetem Katonai Műszaki Doktori Iskola
doktorandusz
Email: laszlo.ondrejcsik@katved.gov.hu
ORCID: 0009-0008-0115-004X 

Absztrakt:

A 21. századi biztonsági környezetben a kémiai, biológiai, radiológiai és nukleáris (CBRN) fenyegetések a veszélyhelyzeti beavatkozás szerves részévé váltak, ami felerősítette a beavatkozó személyzet védelmét szolgáló robotikai megoldások iránti igényt. A cikk a négy lábú (quadruped) robotplatformok nukleáris biztonsági alkalmazásait vizsgálja, középpontban a CERN által fejlesztett és 2024-ben első sugárvédelmi tesztjét sikeresen teljesítő CERNquadbottal, amely egy kereskedelmi Unitree Go1 alapplatformra épülő, saját sugármérő szenzorokkal és autonóm inspekción szoftverrel kiegészített rendszer. Az elemzés a CERNquadbotot a Boston Dynamics Spot dokumentált nukleáris alkalmazásaival (Dominion Energy, Fukushima, Csernobil) veti össze, és három hipotézis mentén értékeli a platform műszaki megalapozottságát, a hagyományos kézi méréshez viszonyított operatív előnyeit, valamint hazai alkalmazhatóságát. A cikk fő megállapítása, hogy a CERN és az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. veszélyeztető tényezőinek és infrastruktúrájának hasonlósága erős alapot ad a technológiatranszferre: a CERN-nél bevált, költséghatékony, nyílt platformra épülő megközelítés a paksi Létesítményi Tűzoltóságnál is alkalmazható lenne, ahol jelenleg nem rendszeresítettek robotplatformot. A szerző a sugárfelderítés automatizálására, a rutinszerű sugárvédelmi körök kiváltására és a Paks II. beavatkozási tereinek előzetes megismerésére vonatkozó konkrét szcenáriókat vázol fel, és rámutat a bevezetés jogi, szervezeti és képzési feltételeire. A következtetés szerint a CBRN-képességgel felszerelt négy lábú robot rendszeresítése a hazai nukleáris energetikában időszerű, műszakilag megvalósítható, és a nukleáris biztonság terén kézzelfogható előrelépést jelent.

Abstract:

In the 21st-century security environment, chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) threats have become an integral part of emergency response, intensifying the demand for robotic solutions that protect responding personnel. This article examines the nuclear-safety applications of quadruped robotic platforms, focusing on CERN's CERNquadbot, which completed its first radiation-protection test in 2024. CERN built the CERNquadbot on a commercial Unitree Go1 base platform, adding dedicated radiation-measuring sensors and autonomous inspection software. The analysis compares the CERNquadbot with the documented nuclear deployments of the Boston Dynamics Spot (Dominion Energy, Fukushima, Chornobyl). It evaluates, along three hypotheses, the platform's technical soundness, its operational advantages over traditional manual measurement, and its domestic applicability. The main finding is that the similarity between the hazard factors and infrastructure of CERN and MVM Paks Nuclear Power Plant Ltd. provides a strong basis for technology transfer: the cost-effective, open-platform approach proven at CERN could also be applied at the Paks facility fire brigade, where no robotic platform is currently in service. The author outlines concrete scenarios for automating radiation reconnaissance, replacing routine radiation-protection rounds, and pre-familiarising responders with the intervention spaces of Paks II, and highlights the legal, organisational and training conditions of deployment. The conclusion is that deploying a CBRN-capable quadruped robot in the domestic nuclear-energy sector is timely, technically feasible, and represents a tangible advance in nuclear safety.

Kulcsszavak: CBRN, négy lábú robot, nukleáris biztonság, CERNquadbot, sugárfelderítés

Keywords: CBRN, quadruped robot, nuclear safety, CERNquadbot, radiation reconnaissance

A 21. századi biztonsági környezet egyik legfontosabb jellemzője a veszélyhelyzetek összetettségének folyamatos növekedése. A fokozódó geopolitikai feszültségek, a terrorfenyegetettség újjáéledése, az éghajlatváltozás által generált természeti katasztrófák és az ipari komplexitás növekedése olyan többdimenziós kockázati teret hoztak létre, amelyben a kémiai, biológiai, radiológiai és nukleáris (CBRN)¹ fenyegetések már nem különálló, kivételes eseményként, hanem a veszélyhelyzeti beavatkozás szerves részeként kezelendők. Ebben a kontextusban a robotika és az autonóm rendszerek fejlődése a beavatkozók életének és testi épségének védelmére szolgáló egyik legígéretesebb eszközzé vált.

A cikk az egyes négy lábú (quadruped) robotplatformok nukleáris veszélyhelyzetekben történő alkalmazásait vizsgálja, középpontjában a CERN által fejlesztett és 2024-ben első sugárvédelmi tesztjét sikeresen teljesítő *CERNquadbot*-tal [1], [3], [5]. A *CERNquadbot* egy Unitree Go1² alapú kereskedelmi platform, amelyre a CERN Controls, Electronics and Mechatronics (CEM)³ csoportja saját sugárázsmérő szenzorokkal, vezérlő algoritmusokkal és automatizált inspekciós szoftverrel⁴ épített bővítményrendszert [17], igazolva, hogy nyílt, kereskedelmileg elérhető platformokon is megvalósítható az ipari szintű CBRN-reagálóképesség. A cikk e fejlesztést a Boston Dynamics⁵ Spot nukleáris alkalmazásaival [9], [10] egybevetve elemzi, és levonja a hazai nukleáris biztonság szempontjából leginkább cselekvésre ösztönző következtetést: az MVM Paksi Atomerőmű Zrt. (a továbbiakban: PA Zrt.) Létesítményi Tűzoltóságánál jelenleg nem alkalmaznak robotplatformot⁶, miközben a CERN-nél és számos atomerőműnél a négy lábú robotok már bevált operatív eszközökké váltak.

A szerző három, egymásra épülő hipotézis köré szervezi az elemzést: az első a *CERNquadbot* CBRN-képességének műszaki megalapozottságát vizsgálja; a második a négy lábú robotplatformok radiológiai felderítésben nyújtott operatív előnyeit elemzi a hagyományos, egyéni védőfelszereléssel és kézi mérőműszerekkel végzett megközelítéshez képest; a harmadik pedig azt az érvet bontja ki, amely szerint a CERN és a PA Zrt. veszélyeztető tényezőinek és infrastrukturális sajátosságainak hasonlósága erős alapot ad arra a következtetésre, hogy a CERN-nél bevált robotikai fejlesztés a PA Zrt.-nél is alkalmazható lehet. A levont következtetések ennél általánosabb érvényűek is: a CBRN-képességgel bővített négy lábú robot a hon- és rendvédelmi szerveknél, a veszélyes ipari üzemeknél és a kritikus infrastruktúrák üzemeltetőinél egyaránt releváns fejlesztési irány lehet.

¹ A hazai ABV és RBV mozaikszavak helyett, a téma nemzetközi kapcsolódásaiból kiindulva, a szerző a továbbiakban a CBRN rövidítést használja.

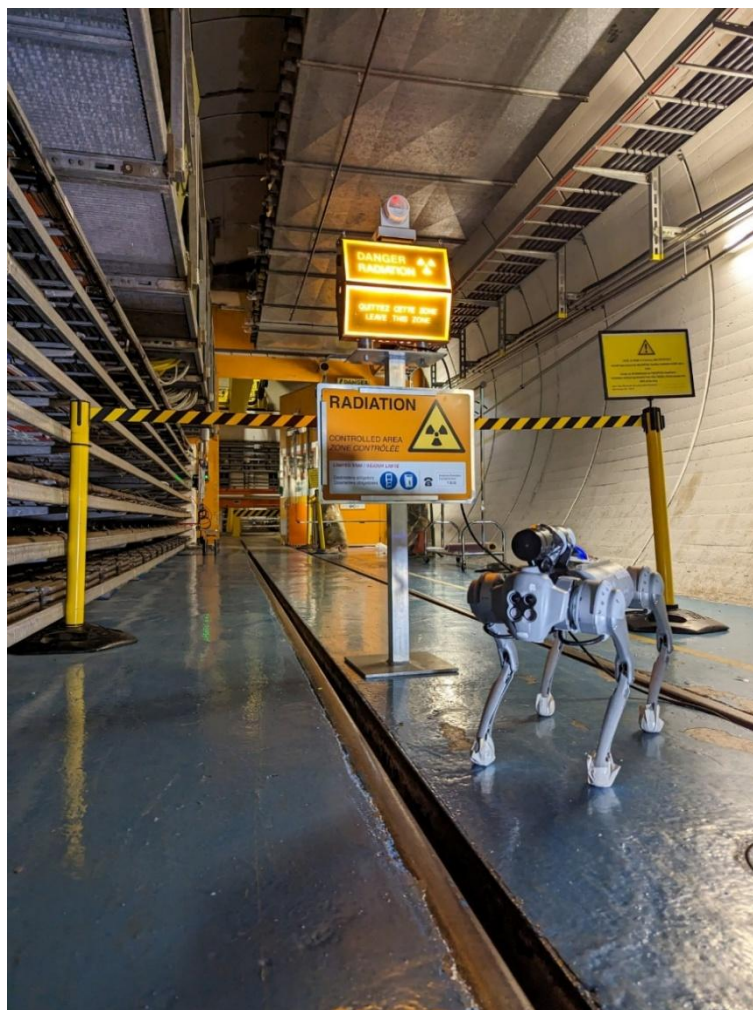
² Az Unitree Go1 típusú robotot az Unitree Robotics, Hangzhou székhelyű kínai cég gyártja. Jelenleg a világ egyik piacvezető vállalata a négy lábú robotok (robotkutyák) és a humanoid robotok fejlesztésében, miközben a tömeggyártásra és a megfizethetőségre fókuszál.

³ Ld. még: <https://home.cern/news/news/engineering/introducing-cerns-robotdog#:~:text=A%20four%20legged%20robotic%20solution%20has%20completed%20its,protection%20test%20inside%20CERN's%20largest%20experimental%20area.>

⁴ Automatizált inspekciós szoftver: ellenőrző szoftver, amely egy olyan technológiai megoldás, ami mesterséges intelligenciát, gépi videó elemzést használ fel arra, hogy emberi beavatkozás nélkül, automatikusan vizsgáljon meg termékeket, folyamatokat vagy infrastruktúrákat.

⁵ A Boston Dynamics Inc. a világ legismertebb és technológiailag valószínűleg legfejlettebb, Egyesült Államokban székelő robotikai vállalata. Az 1992-ben, az MIT-ről (Massachusetts Institute of Technology) levált cég hírnevét a lenyűgöző, néha már-már ijesztően emberszerű vagy állatszerű mozgásra képes robotjaival alapozta meg. (Ld. még: <https://bostondynamics.com/>)

⁶ Az ATOMIX Kft. által a Kft. Biztonsági Üzletágának Tűzoltási és Kárelhárítási Szakágazatában közzétett adatai alapján, ld. bővebben: <https://atomix.mvm.hu/hu-HU/Bemutakozas/Tevekenyseg/BiztonsagiUzletag>



1. kép: a CERN CERNquadbot alkalmazás közben. (Forrás: ld. [27])

2. CBRN-KÉPESSÉGŰ NÉGYLÁBÚ ROBOTOK A NUKLEÁRIS BIZTONSÁGBAN

2.1. Hipotézisek és kutatási kérdések

A cikk három hipotézise a négy lábú CBRN-robotok nukleáris biztonsági alkalmazásának különböző dimenzióit fedi le: a műszaki megalapozottságtól az operatív előnyökön át a hazai integrálhatóságig. Lényeges, hogy e hipotézisek nem pusztán elméleti feltételezéseken, hanem a CERN-nél és más nukleáris létesítményeknél dokumentált, valós alkalmazásokon alapulnak.

H1 – A kereskedelmileg elérhető alapváltozatra (Unitree Go1) épülő CERNquadbot alkalmas arra, hogy egy atomerőmű ionizáló sugárzásnak kitett, emberi tartózkodást kizáró vagy korlátozó környezetében elvégezze a sugárfelderítést és az izotópazonosítást, és a mért adatokat valós időben továbbítsa a kezelőszemélyzetnek anélkül, hogy a beavatkozót a kontaminációs környezet közvetlenül veszélyeztetné.

H2 – A CBRN-szenzorral felszerelt négy lábú robot pontosabb, megbízhatóbb és biztonságosabb radiológiai felderítést tesz lehetővé, mint az egyéni védőfelszereléssel és kézi mérőműszerekkel, ember által végzett mérés: az ismételhető, autonóm mérés konzisztensebb adatokat ad, a személyzetnek nem kell belépnie a sugárveszélyes zónába, a robot pedig valós idejű adatkommunikáción keresztül azonnali döntéstámogatást nyújt.

H3 – A CERNquadbot és a Boston Dynamics Spot atomerőművekben bizonyított alkalmazásainak tapasztalatai együttesen olyan minőségű bizonyítékkal szolgálnak, amelyekből levonható, hogy a PA Zrt. Létesítményi Tűzoltóságánál a négy lábú, CBRN-képességű robot rendszeresítése egy lehetséges fejlesztési javaslat tárgyát képezheti.

A hipotézisekből az alábbi kutatási kérdések következnek: milyen műszaki jellemzőkkel rendelkezik az Unitree Go1 alapplatform, és mit fejlesztett hozzá a CERN; milyen bizonyítékok támasztják alá a négy lábú robot nukleáris környezetben megbízhatóságát, különös tekintettel az ionizáló sugárzás elektronikára gyakorolt hatására; milyen párhuzamok vonhatók a CERN és a PA Zrt. veszélyeztető profilja, fizikai infrastruktúrája és beavatkozási kihívásai között; végül pedig milyen szervezeti, jogi és kiegészítő feltételek szükségesek ahhoz, hogy egy ilyen platform a PA Zrt. Létesítményi Tűzoltóságának eszközparkjába illeszkedjen.



2. kép: a CERN és az LHC (Large Hadron Collider) felépítése madártávlatból. (Forrás: ld. [28])

2.2. Tudományos és biztonsági kontextus

Napjaink biztonsági helyzete gyökeresen eltér a korábbi évtizedekben megszokottól. A SIPRI⁷ már 2019-ben figyelmeztetett, hogy a CBRN-ágensek alkalmazásával kapcsolatos fenyegetések politikai-katonai és technológiai szempontból egyaránt gyors ütemben fejlődnek, és az állami szintű műveletek (mint a 2018-as salisburyi novicsok-mérgezés⁸) új fenyegetési kategória megjelenését jelzik [20]. A nem állami szereplők érdeklődése tartósan fennáll: a technológia demokratizálódása⁹ – az MI-vezérelt drónok, az online hozzáférhető szintéziskémiai ismeretek¹⁰ és a titkosított kommunikáció – csökkentette a CBRN-képességek megszerzésének technikai küszöbét [21].

⁷ Stockholm International Peace Research Institute (SIPRI) – békével, fegyverkezéssel és biztonságpolitikával foglalkozó, nemzetközileg is elismert kutatóintézet.

⁸ Novicsok: egy rendkívül veszélyes szovjet eredetű idegméreg. 2018. március 4-én egy volt orosz hírszerzőt, Sergei Skripalt és lányát mérgezték meg az otthonuk kilincsére helyezve a mérget, ami bejutva a szervezetükbe rendkívül súlyos, halál közeli állapotot idézett elő.

⁹ A technológia demokratizálódása alatt a szerző azt a folyamatot érti, amely során a korábban csak kevesek (szakértők, nagyvállalatok, kormányok) számára elérhető eszközök, tudás és erőforrások már széles tömegek számára is hozzáférhetővé, érthetővé és megfizethetővé válnak.

¹⁰ Szintéziskémiai ismeret: azt a tudást jelenti, amellyel valaki képes meglévő (kiindulási) anyagokból tervezett módon új kémiai vegyületeket előállítani.

Mindez azt jelenti, hogy a CBRN-reagálási képesség ma már nem csupán a hadsereg különleges erőinek kompetenciája, hanem a rendvédelemnek és egyes üzemeltetőknek is rendelkezniük kell vele.

Az ipari balesetek dimenziója szintén növekvő relevanciájú: Seveso (1976), Bhopál (1984), Csernobil (1986), a kolontári vörösiszap-katasztrófa (2010) és Fukushima (2011) mind azt bizonyítják, hogy a veszélyes anyagok és technológiák súlyos baleset esetén CBRN-jellegű következményekkel járhatnak. A WHO 2025-ös elemzése rámutat, hogy a fegyveres konfliktusok különösen sebezhetővé teszik a nukleáris és vegyi létesítményeket [22]. A CBRN-védelmi piac mérete pedig önmagában is jelzésértékű: a szektor értékét 2023-ban 13,4 milliárd USD-re becsülték, 2030-ra viszont 22 milliárd fölé prognosztizálják [23].

A négy lábú robot az állati járás elvét alkalmazó, autonóm vagy távvezérelt rendszer. A nukleáris alkalmazás szempontjából három tulajdonsága kulcsfontosságú és megkülönbözteti társaitól: a lépcsómászás képessége (a reaktorépületek belső tereiben elengedhetetlen), a talajjal való korlátozott érintkezés (visszaszorítja a kontamináció mértékét), valamint a dinamikus alkalmazkodás egyenetlen, törmelékes felszíneken. Ezt az utóbbit különösen fontossá teszi a fukushimai tapasztalat, ahol az első beavatkozó kerek robotok tömeges meghibásodással szembesültek a terep adta viszontagságok miatt.

Az ionizáló sugárzás a robotikai rendszerekre nemcsak közvetlen fizikai károsodás, hanem elektronikai meghibásodás formájában is veszélyt jelent. A sugárzás okozta meghibásodások két fő kategóriája az egyszeri eseményhatások (Single Event Effects, SEE), amelyek átmeneti adathibákat vagy logikai zavarokat idéznek elő, valamint a teljes ionizáló dózis (Total Ionizing Dose, TID) hatása, amely az elektronikai komponensek fokozatos degradációjához vezet. A fukushimai „robottemető” – ahol számos robot az extrém sugárterhelés miatt működésképtelenné vált – szemléletesen mutatott rá arra, hogy a nukleáris robotika egyik legfontosabb kihívása a sugárkeményítés (radiation hardening).

A CERN tapasztalata szerint ez két stratégiával kezelhető: vagy drága, nehezen beszerezhető sugárkeményített komponensekkel¹¹, vagy egy olyan üzemi paradigmával, amelyben a robot a sugárveszélyes területen csak a feladat végrehajtásának idejére tartózkodik, majd azonnal visszatér a biztonságos kezelői pontra. A CERNquadbot ez utóbbi megközelítést alkalmazza, fokozott sugárzástűrő (radiation-tolerant) komponensekkel ötvözve.

Az atomreaktorok ellenőrzését és a sugárvédelmi méréseket végző személyzet számára a hagyományos beavatkozás – egyéni védőfelszereléssel, kézi mérőműszerekkel, korlátozott ideig a sugárveszélyes területen – rendkívül idő- és erőforrásigényes, és a dóziskorlátok miatt komoly kapacitásbéli határokat is szab.

Egy sugárzásmérő szenzorokkal felszerelt négy lábú robot ezt alapjaiban változtatja meg: a robot megy be a veszélyes környezetbe, a mérési adatokat valós időben továbbítja, és a személyzet anélkül tud döntést hozni, hogy egészségügyi vagy fizikai kockázatnak lenne kitéve.

¹¹ Az atomreaktorok és más nukleáris létesítmények környezetében alkalmazott „sugárzásálló” (rad-hard, radiation-hardened) elektronika olyan speciális komponenseket foglal magában, amelyeket kifejezetten intenzív neutron- és gammasugárzásnak, valamint magas hőmérsékletnek való ellenállásra terveztek. Ezek az eszközök lehetővé teszik a biztonságos üzemeltetést és folyamatos felügyeletet, még extrém CBRN körülmények között is. A rendszerek gyakran széles tiltott sávú (wide bandgap) félvezetőket vagy egyéb speciális tervezési technikákat alkalmaznak, hogy megelőzzék a teljes ionizáló dózis (TID) okozta meghibásodásokat, valamint a sugárzás által kiváltott egyszeri eseményhatásokat (SEE).

2.3. A CERN CERNQuadbotja – az alapplatform és a CERN-specifikus fejlesztések

2.3.1. Az Unitree Go1 alapplatform

A CERNQuadbot egy Unitree Robotics Go1 alapú platform¹², amelyet a CERN CEM-csoportja adaptált saját igényeire.

Az Unitree az egyik legszélesebb körben elérhető, legjobb ár-érték arányú négylábú robotok gyártója; a Boston Dynamics Spottal szemben a Go1 alapváltozata már mintegy 2 700 USD¹³ (kb. 0,9 millió Ft) körüli áron megvásárolható [7], [25], ami széles körű kutatói és ipari alkalmazást tesz lehetővé.

A CERN által is alkalmazott Go1 EDU változat kimagasló műszaki teljesítményt képvisel:

- 12 kg saját tömeg és 645×280×400 mm bruttó méret álló helyzetben,
- lábanként 3, összesen 12 szabadsági fokú (Degrees of Freedom, DOF), független ízületi vezérlésű mozgásrendszer,
- 5 db halszemoptikás (360°-os látómezőt biztosító) kamera,
- 3 db ultrahangos (szonárelvű) érzékelő,
- RS-LiDAR-16 (RoboSense 16) 3D-s lézeres távolságmérő 16 szenzorral, akár 150 m hatótávolsággal és 2 cm-es hibahatárral.
- 3 Nvidia Jetson Nano és 1 Raspberry Pi számítógép konfiguráció, ahol a különböző egységek között megosztják a feladatokat. (Ez a heterogén számítástechnikai architektúra biztosítja azt, hogy a robot egyszerre tudjon egyensúlyozni, látni és bonyolult küldetéseket, parancsokat végrehajtani. A 3 darab Jetson Nano modul speciális GPU-val (grafikus processzorral) rendelkezik, ennek köszönhetően tervezhetők mesterséges intelligencia és képfeldolgozás futtatására, azaz a környezetértékeléshez és a gépi látáshoz. A Raspberry Pi pedig az a központi vezérlő egység, ami a magas szintű algoritmusokért (úgy, mint pl. futtatja a robot operációs rendszerét (jellemzően Ubuntu Linux és ROS [Robot Operating System]), utasításokat ad a Jetson moduloknak, illetve a mozgásvezérlőknek) és a rendszerszintű kommunikációért felel (úgy, mint pl. kapcsolatot tart a kezelővel és kezeli a távirányító jeleit).
- 6000 mAh-s Li-ion akkumulátor-kapacitás legalább 1, de – igénybevételtől függően – akár 2,5 óra üzemidővel,
- maximális sebessége 4,7 m/s (~17 km/h),
- lépcsómászási képesség 12 cm lépcsőfok-magasságig,
- 3-5 kg hasznos teherrel való terhelhetőség (tesztelések utáni feljegyzések bizonyítják, hogy szükség esetén akár 10 kg-os terhelhetőséggel is bevethető¹⁴), valamint
- WiFi és opcionális 4G/5G kommunikáció.

A hasznos teher felső lapjára az XT30 csatlakozón keresztül 24V/12A teljesítmény vezethető ki, ami lehetővé teszi a külső szenzorok tápellátását. Pontosan ez az interfész képezi a CERN-szenzormodul csatlakoztatásának és megtáplálásának lehetőségét.

¹² A Go1 volt a világ első, kifejezetten fogyasztói piacra szánt, megfizethető árú robotkutya a piacon. A platformot úgy tervezték, hogy mindennapi társalkodóként, kutatási eszközként vagy akár könnyű teherhordóként is funkcionáljon.

¹³ Go1 Air verzióra értendő, a Go1 Pro ~ \$3,500 USD (kb. 1,1 millió Ft), a Go1 EDU pedig ~ \$8,500 USD (kb. 2,7 millió Ft) áron érhető el (Ld.: <https://spectrum.ieee.org/unitrees-go1-robot-dog-looks-pretty-great-costs-just-usd-2700#:~:text=There%20are%20three%20versions%20of%20the%20Go1%2C%20as%20well%20as%20foot%2Dforce%20sensors%2C%20lidar%2C>)

¹⁴ <https://www.unitree.com/go1>



3. kép: az Unitree Robotics Go1 robotja. (Forrás: ld. [29])

Az Unitree Go1 EDU változat nyílt fejlesztői platformot kínál: natív Python és C++ támogatással vezérelhető, valamint teljeskörű ROS¹⁵ integrációt biztosít. Az Nvidia Jetson alapú mesterséges intelligencia keretrendszerének köszönhetően a hardver alkalmas nagy számítási igényű, gépi tanuláson alapuló percepció algoritmusok valós idejű futtatására is. Ez a nyílt, de egyben kompakt architektúra teszi lehetővé, hogy a CERN saját szoftvereit és érzékelőit integrálja a platformba.

2.3.2. A CERNquadbot – amit a CERN hozzáadott

A CERNquadbot fejlesztése a CERN Beams részlegének CEM-csoportján belül, Dr. Chris McGreavy¹⁶ robotikai mérnök és csapata irányításával zajlik [2], [15], [17]. A fejlesztés két irányban halad: a hardveres szenzorintegráció (sugárzásmérő eszközök csatlakoztatása a hasznos teher interfészre) és a szoftveres vezérlés (autonóm és félautonóm navigáció a CERN alagutas és barlangos tereiben). A CERN-beli környezet rendkívül specifikus: az LHC¹⁷ 27 km-es alagútrendszerében a padlón futó, gyakran rögzítetlen kábel- és csőkötegek a kerék- és láncalpas robotok számára leküzdhetetlen akadályt jelentenek, mivel elmozdulhatnak és megcsúszhatnak. A CERNquadbot négy lába révén átlép ezeken, lépcsőn mászik, szűk folyosón navigál, és a fixen telepített vezetékek alatti területekre is behatol – oda, ahová korábban sem ember, sem más robot nem jutott könnyen. [6]

¹⁵ A ROS (Robot Operating System) integráció azt a folyamatot jelenti, amikor a robot különböző hardveres és szoftveres komponenseit összekapcsolják az ROS keretrendszerrel, hogy azok egységes kommunikációs felületen keresztül tudjanak együttműködni. Az integráció biztosítja, hogy a robot motorjai, szenzorai, döntéshozó algoritmusai és külső rendszerei „közös nyelvet beszéljenek” üzenetküldésen (Topics), kéréseken (Services) és műveleteken (Actions) keresztül.

¹⁶ Dr. Chris McGreavy: 2023 márciusa óta tagja a CERN-nek, előtte az Aalto Egyetemen dolgozott kutatóként. A CERN Beams (BE) részlegének Controls, Electronics and Mechatronics (CEM) csoportjában dolgozó robotikai mérnök, aki a CERNquadbot projekt egyik vezetőkutatója.

¹⁷ LHC: Large Hadron Collider, magyarul Nagy Hadronütköztető. A világ legnagyobb és legnagyobb energiájú részecskegyorsítója, amely a Genf melletti francia-svájci határon, 100 méterrel a föld alatt található. 2026 áprilisában a berendezés az utolsó üzemelési szakaszában volt egy tervezett négyéves leállás előtt. Az LHC protonokat és nehézionokat gyorsít fel közel fénysebességre (a fénysebesség több, mint 99,999999%-ára), majd ütközteti őket, hogy az Ősrobbanás utáni milliszekundumokhoz hasonló körülményeket hozzon létre.

2024. februárjában a CERNquadbot sikeresen teljesítette első sugárvédelmi tesztjét a CERN North Area-ban¹⁸, a létesítmény legnagyobb kísérleti területén [1], [4]. A Sugárvédelmi Csoport¹⁹ közreműködésével lefolytatott koncepcióigazoló (proof-of-concept; PoC) felmérés során a robot stabilan működött, akadálymentesen navigált és a valós sugárási adatokat valós időben közvetítette. Ez az első sikeres teszt egyszerre jelentett műszaki validálást és új korszak kezdetét a CERN-beli robotizált nukleáris biztonság terén. A CERN tervei szerint a CERNquadbot és utódai hosszú távon rendszeresen jelen lesznek az ALICE-detektor²⁰ csarnokában és más kísérleti zónákban²¹, ahol a berendezések állapotát monitorozzák, anyagszivárgásokat azonosítanak, téves riasztásokra reagálnak és rutinszerű sugárvédelmi méréseket végeznek emberi beavatkozás nélkül [27]. A rendszer a TIM (Train Inspection Monorail)²² monorail-robottal egymást kiegészítve működik: a TIM a 27 km-es alagút felső részét pásztázza [26], a CERNquadbot pedig azokat a tereket járja be, ahová a TIM nem tud eljutni. A CERNquadbot kommunikációs architektúrája az alapplatform képességeire épül, kiegészítve a CERN belső, celluláris hálózatával²³: az alap WiFi a közvetlen közelben, a 4G/5G a nagyobb hatótávolságon biztosít adatátvitelt. A valós idejű videó, a sugárásmérési adatok és a rendszerdiagnosztikai állapot a kezelői konzolra kerülnek. Mivel az ionizáló sugárzás interferenciát okozhat az elektronikus kommunikációban, a CERN mérnökei ezt mind a hardver, mind a szoftver megválasztásánál figyelembe vették; a Forkel²⁴ és munkatársai által kidolgozott módszertan szerint a robot mobilitása aktív kommunikáció-optimalizálási eszközként is funkcionál, dinamikusan a rádiós lefedettséghez igazítva a navigációs útvonalat [14].

2.4. A négy lábú robotok precedens értékű nukleáris alkalmazásai

2.4.1. A Boston Dynamics Spot és nukleáris bevetései

A Boston Dynamics Spot a négy lábú robotplatformok legszélesebb körben alkalmazott, valódi kereskedelmi termékként elterjedt rendszere [13]. A nukleáris ipar kiszolgálása egyik alapvető szegmense: a Spot az egyetlen olyan négy lábú platform, amelyet a világ jelentős nukleáris létesítményeiben éles bevetés során alkalmaztak sugárfelderítési és dekontaminálási feladatokra. IP54-es besorolása kritikus a nukleáris környezetben, mivel a porállóság megakadályozza a radioaktív por bejutását az elektronikába, a vízállóság pedig lehetővé teszi a külső felület bevetés utáni tisztítását. Működése $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ között üzembiztos, megközelítőleg 90 perc üzemidővel; az 564 Wh-s, 5,2 kg-os akkumulátor töltési ideje kb. 60 perc; nettó tömege akkumulátorral kb. 33,8 kg, hasznos terhelése 14 kg, maximális sebessége 1,6 m/s ($\sim 5,76\text{ km/h}$).

¹⁸ CERN North Area (Északi Terület) a szervezet legnagyobb kísérleti részlege, amely a franciaországi Prévessin telephelyen található. Ez a központ ad otthont a „fix célpontos” (fixed-target) kísérleteknek, ahol a részecskenyalábokat álló akadályoknak ütköztetik, nem pedig egymásnak, mint az LHC-ben.

¹⁹ A CERN Sugárvédelmi Csoportja (HSE Radiation Protection Group (HSE-RP)) biztosítja, hogy a CERN területén tartózkodó személyzet és a lakosság védelmét a CERN tevékenységéhez kapcsolódó ionizáló sugárzás esetleges káros hatásaitól.

²⁰ Az LHC 27 kilométer kerületű, szupravezető mágnesekből álló gyűrűjének főbb „kísérleti terei” (detektorállomásai, kísérleti csarnokai) négy nagy detektorból állnak, úgy, mint: ATLAS, a CMS, az ALICE és az LHCb.

²¹ Ld. 16. lábjegyzet (CERN North Area) és pl. ECN3 (Experimental Cavern North 3), mely egy 100 méterrel a föld alatt fekvő, sugárvédelmi szempontból fokozottan biztosított barlang, amelyet a nagy intenzitású nyalábokhoz terveztek.

²² A CERN egyik legfontosabb robotizált eszköze, amely az LHC alagútjának biztonságos üzemeltetését segíti. Ez a kisméretű, autonóm egység a mennyezetre szerelt egysínné pályán közlekedik, és olyan feladatokat lát el, amelyek veszélyesek vagy időigényesek lennének az emberi személyzet számára.

²³ A CERN belső celluláris hálózata egy olyan privát mobilhálózati infrastruktúra, amelyet kifejezetten a kutatóközpont extrém körülményeihez (például a 100 méter mélyen lévő alagutakhoz) terveztek. Ez a rendszer biztosítja, hogy a kutatók, mérnökök és a biztonsági személyzet ott is elérhető maradjon, ahol a hagyományos közszolgáltatások jele már nem fogható.

²⁴ Dr. David Günter Forkel a CERN robotikai és mechatronikai részlegének (BE-CEM-MRO) egyik szakértője, aki kiemelt szerepet tölt be a gyorsítóalagutak autonóm felügyeletének tervezésében, kutatás-fejlesztésében.

A platformra alkalmazásprogramozási felületen (Application Programming Interface, API²⁵) keresztül doziméterek, hőkamerák, gamma- és neutrondetektorok, Raman-spektrométerek és más CBRN-szenzorok csatlakoztathatók. Mozgékonyágát jelzi, hogy maximum 30 cm-es egyedi akadályt lép át (Maximum Step Height), a lépcsőérzékelés alsó küszöbe kb. 7,5 cm (Stair Sensitivity), a folyamatos haladáshoz ideális lépcsőfok-magasság pedig max. 20 cm (Max Stair Riser). A gyártó szerint a Spot több mint 1500 eladott egységgel, 35 ország ügyfélkörében van jelen, szenzor- és szoftverfejlesztésében pedig olyan cégek vesznek részt, mint a Leica Geosystems, a Trimble és a FLIR.



4. kép: a Boston Dynamics Spot robotja. (Forrás: ld. [30])

A Dominion Energy²⁶ virginiai atomerőművénél (Surry Power Station) 2022-ben indított kísérleti projekt az egyik legjobban dokumentált nukleáris ipari Spot-alkalmazás [10]. A Spot nemcsak elvégezte ugyanazokat a sugázmérési feladatokat, mint az emberi munkavállalók, hanem konzisztensebb adatokat is szolgáltatott: minden alkalommal ugyanabban a pozícióban és orientációban rögzítette a mért értéket, ami a kézi mérésnél nem garantálható. Az ismételt, autonóm mérés így lehetővé teszi a prediktív elemzést és az eltérések korai azonosítását, és hosszú távon szignifikánsan megkönnyíti a dóziskorlátok betartását.

A fukushimai Daiichi atomerőműben 2022-ben, több mint egy évtizeddel a baleset után kezdték alkalmazni a Spotot olyan helyiségek felderítésére, amelyek ajtaját 2011 óta senki sem nyitotta ki [8]. A helyszín egyes területein a sugárzás az LD50-küszöb (Lethal Dose 50%)²⁷ fölötti, ezért a Los Alamos Nemzeti Laboratóriumban végzett tesztek során az engedélyezett éves emberi dózis több mint kétszázszorosának tették ki az eszközt károsodás nélkül. A romos terepen a Spot mozgékonyága döntő előnynek bizonyult az előző generációs, kerek robotokhoz képest: videót készített, dózisteljesítményt mért, 3D-s pontfelhő-adatokat gyűjtött és mintát vett a fűtőelem-törmelék későbbi eltávolításához.

²⁵ API (Application Programming Interface): a robot digitális csatlakozófelülete. Lehetővé teszi a különböző mérőműszerek és a robot vezérlőrendszerének összekapcsolását (kommunikációs, adat szinten).

²⁶ Dominion Energy, Inc. (röviden Dominion). Egy amerikai energiaipari vállalat, amelynek székhelye Richmondban (Virginia állam) található. Virginia, Észak-Karolina és Dél-Karolina egyes részeit villamos energiával, Utah, Idaho, Wyoming, Nyugat-Virginia, Ohio, Pennsylvania, Észak- és Dél-Karolina, valamint Georgia egyes területeit pedig földgázzal látja el.

²⁷ LD50 (Lethal Dose 50%) – sugárbiológiai szempontból – a teljes testet érő sugárzási dózis. A fukushimai Daiichi atomerőmű egyes területein például gyakori a 3-5 Gray/Sv körüli érték, ami az emberre nézve az az akut dózis, ahol orvosi segítség nélkül a kitétek 50%-a 30 napon belül életét vesztené.

Az Egyesült Királyság Atomenergia Hatóságának (UKAEA) finanszírozásával, a Bristol Egyetem koordinálásában a Spotot 2020-ban vitték Csernobilba²⁸, ahol a 30 km-es zónában²⁹, az Új Védőműben és a Vörös erdő területén végzett gammaspektrométeres és neutronszenzoros méréseket a sugárszennyezettség és a radionuklid-eloszlás 3D-s feltérképezésére [11]. Ez volt az első ilyen típusú autonóm sugárzás-feltérképezés a helyszínen, és egyben a reaktor jövőbeni lebontásának egyik elengedhetetlen előfeltételét szolgálta.

A Spot nukleáris alkalmazásainak sora ezzel nem zárul le. A skóciai Dounreay³⁰ – az Egyesült Királyság egykori legfontosabb gyorsreaktor-kutatási központja, amelyet az üzemanyag-újrafeldolgozás során a tengerbe került sugárzó szemcsék miatt 1994-ben állítottak le – ma Európa egyik legösszetettebb, több mint 1300 fő közreműködésével zajló nukleáris leszerelési projektjének helyszíne, a spanyolországi Santa María de Garoña³¹ leszereléséhez pedig egy egyedileg módosított, Spot Enterprise típusú robotot alkalmaztak [12].

2.4.2. A CERNquadbot és a Spot összehasonlítása

A két platform összevetése több szempontból tanulságos. A legfontosabb különbség a költség: az Unitree Go1 kb. 2 700 USD-tól, a Spot viszont kb. 74 500 USD-tól (kb. 56,2 millió Ft-tól) érhető el. Ez nem pusztán gazdasági szempont, hanem stratégiai következtetés forrása: ha egy olcsóbb, nyílt platformon is megvalósíthatók az elvárt CBRN-feladatok – amint azt a CERN bizonyítja –, akkor a beruházás alacsonyabb belépési költséggel is adaptálható. Mozgékonyaság terén a nehezebb Spot (kb. 32 kg) stabilabb és nagyobb akadályokat vesz, a könnyebb Go1 (12 kg) könnyebb terepen mozog hatékonyabban; a Spot hasznos terhelése 14 kg, a Go1-é 3–5 kg, ami utóbbinál a szenzormodul méretét is korlátozza. Az összehasonlítás alapján a két platform inkább komplementer, semmint helyettesítő: a Spot a tartós, extrém körülmények és a nehézipari alkalmazások bevált eszköze, míg a CERNquadbot a kevésbé extrém, szűkebb terekben végzett, kutatás-fejlesztési és energetikai feladatok nyílt platformja. A PA Zrt. kontextusában a CERN-nel való párhuzam és a CERNquadbot-alapú megközelítés kínálja a közvetlen technológiatranszfer lehetőségét.

2.5. CBRN-érzékelők integrálása a négylábú platformokon

A négylábú robotplatformra csatlakoztatható CBRN-szenzorok alkalmazásának alapelve a moduláris, „plug-and-play” csatlakoztathatóság. A Go1 EDU hasznos teher interfészén elérhető 24 V/12 A elegendő a szenzormodul megtáplálására; az adatkommunikáció Ethernet, USB vagy rádiós belső kapcsolaton, a feldolgozás a robot Jetson Nano rendszerében, Python API-n keresztül valósul meg. A fizikai rögzítés a hordozólapra csavarokkal vagy gyorscsatlakozóval, néhány perc alatt megoldható. A nukleáris alkalmazásra optimalizált szenzoregység egy Geiger–Müller (GM)³² vagy szcintillációs³³ detektort tartalmaz a gamma- és béta-sugárzás mérésére és a dózisteljesítmény valós idejű közlésére; a szcintillációs típusok alkalmasak a radionuklidok azonosítására, ami üzemzavar esetén különösen fontos, mert a detektor megkülönbözteti az üzemanyag radioizotópjaikat a háttérsugárzástól. A Dominion Energy alkalmazásánál éppen ez a differenciáló és konzisztens mérési képesség tette lehetővé a trendanalízist.

²⁸ Ld. még: <https://www.telegraph.co.uk/news/2020/10/27/boston-dynamics-robot-dog-sent-chernobyl-sniff-radiation/>

²⁹ A csernobili 30 km-es zóna (a Csernobili atomerőmű hivatalosan lezárt, környező területe) az 1986-os katasztrófa után létrehozott, mintegy 2600 km² területű, fokozottan ellenőrzött lezárt övezet Ukrajnában, ahol mind a mai napig rendkívüli, magas a radioaktív sugárzás.

³⁰ Ld. bővebben az 1. sz. melléklet szerint.

³¹ Ld. bővebben a 2. sz. melléklet szerint.

³² Pl. Mirion RDS-32 típusú energiakompenzált GM-cső; MightyOhm Geiger Counter.

³³ Pl. Kromek D3S / D5 / SIGMA; Mirion SpiDR vagy Spir-Ident; H3D H-sorozat (pl. H100 vagy a már említett H420) detektorok.

Nukleáris létesítményekben a kémiai szenzorok integrálása szintén releváns, különösen a hűtőkörös közegek (hidrazin, ammónia, bórsav) és az elektromos meghibásodások égéstermékének detektálására. A fotoionizációs detektor (PID) a szerves vegyületek széles skálájára érzékeny és kompaktan integrálható; az elektrokémiai érzékelőpanel (CO, HCN, Cl₂, NH₃, H₂S) a jellemző veszélyes gázok jelenlétére ad azonnali visszajelzést.³⁴ E kémiai érzékelők kiegészítő jellegűek, de a CBRN-képesség teljessé tételéhez fontosak.



5. és 6. képek: Kromek D3S ID szcintillációs detektor (balról; forrás: ld. [31]) és Ion Science MiniPID 2 PPB XF illékony szerves vegyület (VOC) érzékelő fotoionizáció és levegőminőség-monitorozáshoz (jobbról; forrás: ld. [32])

A CBRN-szenzoros robot nem csupán mérőeszköz, hanem döntéstámogatási rendszer is: a valós idejű adatokból az irányítói konzolon 3D-s szennyezettségi térképet generálva kimutatható, hol haladja meg a mért dózisteljesítmény a küszöbszintet. Ez alapján meghatározható, szükséges-e emberi beavatkozás, milyen PPE-szinttel³⁵ hajtható végre, és mennyi a rendelkezésre álló idő – jelentősen csökkentve a személyzet későbbi sugárterhelését.

2.6. A CERN és a PA Zrt. közötti strukturális párhuzam

A PA Zrt. Magyarország egyetlen működő atomerőműve. A Pakson 1969 és 1987 között megépített, VVER-440/V-213 típusú, nyomottvizes (Pressurized Water Reactor, PWR) reaktorokra épülő erőmű négy, egyenként ma már mintegy 500 MW villamos teljesítményű blokkból áll (összesen 2000 MW), és a hazai villamosenergia-termelés mintegy felét biztosítja [24]. Létesítményi Tűzoltóságát 1994. július 1-je óta az ATOMIX Kft. üzemelteti főfoglalkozású tűzoltókkal.³⁶ [18] A szervezet az ország legjobban felszerelt létesítményi tűzoltóságai közé tartozik, eszközparkja azonban jelenleg nem tartalmaz négylábú robotplatformot.

³⁴ Pl.: Ion Science Minipid 2 szenzor és a hozzá csatlakoztatott Honeywell MiniRAE 3000 (vagy Ion Science Tiger).
Ld. még:

[https://ionsense.com/products/minipid-2-ppm-wr/#:~:text=Table_title=%20Technical%20Specifications%20Table_content:%20header:%20%7C%20Supply,18%20V\):%200%20%E2%80%93%203.2%20V%20%7C](https://ionsense.com/products/minipid-2-ppm-wr/#:~:text=Table_title=%20Technical%20Specifications%20Table_content:%20header:%20%7C%20Supply,18%20V):%200%20%E2%80%93%203.2%20V%20%7C)

<https://automation.honeywell.com/us/en/products/sensing-solutions/gas-and-flame-detection/portables/photoionization-detectors-pid/minirae-3000-portable-handheld-voc-monitor>

³⁵ PPE (Personal Protective Equipment): egyéni védőfelszerelés.

³⁶ Az atomerőmű operatív, tűz elleni védelme egészen az építése idejéig visszanyúlik. Ez idő alatt is volt jelen tűzoltó egység, ami kezdetben a városi parancsnokság alá tartozott. 1990-ben megalakították a hivatásos üzemi tűzoltóságot

A CERN és a PA Zrt. elsőre egymástól teljesen különböző intézménynek tűnhetnek: az egyik a világ vezető részecskefizikai laboratóriuma, a másik egy nemzet villamosenergia-ellátásáért felelős nukleáris üze. A veszélyeztető hatásokat, a fizikai infrastruktúrát és a beavatkozási kihívásokat tekintve azonban meglepően sok a hasonlóság. Mindkét létesítmény egyes területeit ionizáló sugárzás jellemzi, ahol az emberi tartózkodás korlátozott: a CERN-ben a gyorsítóalagútban és a detektorállomásokban, a PA Zrt.-ben a reaktorépületekben és a hűtőkörrendszer egyes részein. Mindkettőre jellemző a szerteágazó, alagutas vagy kiterjedt belső tér, amelyben a beavatkozónak egyszerre kell kezelnie a fizikai akadályokat (szűk folyosók, lépcsők, padlószinten futó vezetékkötegek), a pszichikai nyomást és a potenciális radiológiai veszélyt. A PA Zrt. 1991-es és 2003-as üzemzavar eseményei – amelyek az INES skála szerinti 2-es, illetve 3-as szintű besorolást kaptak³⁷ – jól szemléltetik, hogy még egy szakszerűen üzemeltetett, megbízhatóan működő atomerőműben is előfordulhatnak olyan nem kívánatos helyzetek, amelyekben sugárzásveszélyes területen kell beavatkozni. Ilyen esetben az elsődleges beavatkozást a létesítményi tűzoltóság végzi, amelynek tehát – az említett precedensértékű események miatt is – rendelkeznie kell a szükséges eszközökkel.

A CERN Knowledge Transfer csoportja kifejezetten azzal a céllal működik, hogy a bevált technológiákat a szélesebb ipari és intézményi közösség számára elérhetővé tegye [16]. Ebben a kontextusban a CERNquadbot-alapú megközelítés nemcsak inspiráció, hanem konkrét technológiatranszfer-forrás, két okból is: kereskedelmileg elérhető alaplatformot használ, a CERN által fejlesztett szoftverek és algoritmusok pedig nyílt forráskódként megoszthatók. A legfontosabb következtetés így az, hogy ha a világ legbonyolultabb részecskefizikai kísérleteinek sugárveszélyes tereiben a CERNquadbot biztonságosan és hatékonyan üzemel, akkor ugyanez a platform egy atomerőmű hasonlóan összetett sugárveszélyes területein is képes erre – a különbség csupán a szenzorspecifikáció és az üzemi protokollok szintjén van, ami rendszeroptimalizálással és kalibrálással orvosolható.

2.7. A hazai integrálhatóság lehetőségei

A PA Zrt. Létesítményi Tűzoltóságának működésére vonatkozó jogi keretrendszert elsősorban a tűz elleni védekezésről, műszaki mentésről és tűzoltóságról szóló 1996. évi XXXI. törvény, az atomenergiáról szóló 1996. évi CXVI. törvény, a katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény, a létesítményi tűzoltóságokra vonatkozó részletes szabályokról szóló 273/2024. (IX. 19.) Korm. rendelet és az atomenergia alkalmazásával kapcsolatos sajátos tűzvédelmi követelményekről és a hatóságok tevékenysége során azok érvényesítésének módjáról szóló 5/2015. (II. 27.) BM rendelet vonatkozó rendelkezései alkotják. Ezek a jogszabályok a jogalkotói szándékot tekintve az atomenergia békés felhasználásával kapcsolatos lakossági, hatósági, operatív és tervezési feladatokat és hatásköröket fektetik le. Azonban a robotika által nyújtott aktív és passzív védelmi funkciókat nem szabályozzák sem keret, sem átfogó jelleggel. Ez így jogi értelemben egy fehér folt, amelyet a rendszerbe állítás előtt rendezni szükséges – ideértve a CBRN-szenzoros robot által gyűjtött mérési adatok hitelességének és döntéstámogatói felhasználásának kérdését is.

Szervezetileg a bevezetés az üzemeltető (ATOMIX Kft.) és a hivatásos katasztrófavédelmi szerv döntési kompetenciájába tartozna, az Országos Atomenergia Hivatal (OAH), mint a nukleáris energia biztonságos alkalmazásáért és felügyeletéért felelős független hatóság bevonásával.

Paksi Atomerőmű Hivatásos Üzemi Tűzoltóparancsnoksága név alatt, ami egészen 1994-ig, az ATOMIX Kft. megalakulásáig működött ebben a formában.

³⁷ Ld. bővebben a 3. sz. melléklet szerint.

A CERN példájából kiindulva a legcélszerűbb bevezetési stratégia egy kísérleti, pilot-program, amelynek keretében a szükséges hatósági eljárások elvégzése mellett a katasztrófavédelem, az OAH és az ATOMIX Kft. szakemberei megszerezhetik az eszköz rendszerbeállításához szükséges operatív tapasztalatot is.

Az alkalmazhatóság kapcsán jelenleg három konkrét paksi Szenárió kínálkozik. Az első és legkézenfekvőbb Szenárió egy rendszerhiba vagy üzemzavar utáni sugárfelderítési feladat. Ha ezek következtében emelkedik a sugárszint egy olyan területen, ami ember által nehezen megközelíthető vagy amelyben a sugárzás meghaladhatja egy ember általi beavatkozás esetén az elfogadható biztonsági szintet, a CERNquadbot típusú négy lábú robot a sugárzásmérő szenzormodullal elvégzi az elsődleges helyszíni felderítést és méréseket, miközben 3D-s (pontfelhős) szennyezettségi térképet alkot a területről. Ez alapján a sugárvédelmi szakemberek pontosan meghatározhatják, hogy milyen további beavatkozások szükségesek, azokat – a mért adatok alapján – ember által milyen szintű személyi védelem alkalmazásával és mennyi idő alatt lehet elvégezni. Ez a Szenárió egyenes megfelelője a Dominion Surry Power Station-nél bevált gyakorlatnak.

A második lehetséges Szenárió a rutinszerű sugárzásvédelmi körök automatizálása. A PA Zrt. ellenőrzési területeit rendszeresen radiológiai monitorozásnak kell alávetni; ezek jelenleg sugárvédelmi technikusok által is végzett, időigényes és dóziskorlátozott feladatok. Egy autonóm négy lábú robot viszont ugyanazokon a mérési pontokon ugyanazokban az időközökben, konzisztensen és a személyzet expozíciója nélkül képes ezt végrehajtani – pontosan úgy, ahogy a Dominion Energy esetében dokumentálták.

A harmadik Szenárió a Paks II. épülő blokkok beavatkozási tereinek megismerése. A Paksi Hivatásos Tűzoltóparancsnokság beavatkozó egységei és a PA Zrt. Létesítményi Tűzoltósága rendszeres (pl. szituációs begyakorló) gyakorlatokat tartanak (nem csak az atomerőmű, hanem) a Paks II. területén is. Egy CERNquadbot-hoz hasonló különleges képességekkel rendelkező négy lábú robot mielőbbi rendszerbeállítása pedig lehetővé tenné a kárelhárításban résztvevők számára, hogy már az üzem (Paks II.) működésének megkezdése előtt kellő szintű tapasztalatot szerezzenek az eszköz hatékony használatáról és üzemeltetéséről [19].

3. KÖVETKEZTETÉSEK

A cikk végén a három hipotézis tükrében az alábbi következtetések vonhatók le. Az első hipotézis – a négy lábú robotplatform műszakilag megalapozott, CBRN-szenzorral felszerelhető és speciális környezetben alkalmazható – egyértelműen megerősíthető: a CERN 2024. februári sikeres sugárvédelmi tesztje dokumentált bizonyíték arra, hogy a robot megbízhatóan navigált, sikeresen vette a terepi akadályokat és valós idejű adatokat kommunikált [1]. A sugárzásmérő modul az XT30-interfészen és a Jetson Nano rendszeren keresztül hardveresen és szoftveresen egyaránt integrálható, tömege pedig a platform kapacitásán belül marad.

A második hipotézis – a négy lábú CBRN-robot biztonságosabb és pontosabb felderítést tesz lehetővé a hagyományos kézi mérésnél – a Dominion Surry atomerőmű pilot-program eredményei alapján szintén igazolható: a robot konzisztensebb adatokat szolgáltatott, kiváltotta a szakemberek sugárveszélyes területre lépését, és az autonóm módon ismételt ellenőrzések trendanalízist tettek lehetővé, amit a kézi mérés nem biztosít.

A harmadik hipotézis – a precedensértékű CERN-tapasztalat és a globális nukleáris robotikai alkalmazások alapján a PA Zrt. Létesítményi Tűzoltóságánál is indokolt a robotplatform bevezetés – szintén megalapozott; a megvalósítás jogi, szervezeti és képzési feltételeinek megteremtése azonban még egy megelőző feladategyüttes. A technológiai feltételek viszont adottak: a platform kereskedelmileg, viszonylag költséghatékonyan elérhető, a szenzorintegráció megvalósítható, a nukleáris ipari alkalmazások (Dominion Energy, Fukushima, Csernobil, Dounreay) példái pedig elegendő bizonyítékot nyújtanak a megbízhatóságra.

A cikk legfontosabb hozzájárulása az a szintetizáló érv, amely a CERNquadbot, a Spot nukleáris alkalmazásai és a PA Zrt. közötti összefüggésből rajzolódik ki: ezek nem egymástól független iparági kísérletek, hanem egy átfogó szemléletváltás megjelenési formái, amelynek lényege a robotplatform, mint a nukleáris biztonság aktív szereplője. A CERN a legfrissebb láncszemet adta ehhez: egy viszonylag olcsó, nyílt kereskedelmi platform szervezetspecifikus adaptációjával bizonyította, hogy a megközelítés nem igényel speciális, egyedi rendszert – elegendő egy jól megválasztott nyílt platform a megfelelő szenzorokkal és egy gondosan tervezett üzemi protokollal. Az, hogy a PA Zrt. Létesítményi Tűzoltóságánál jelenleg nincs rendszeresítve ilyen megoldás, kiemelkedő fejlesztési lehetőség. A CERN-nél bevált megközelítés, a nemzetközileg dokumentált nukleáris Spot-alkalmazások és a PA Zrt. strukturálisan hasonló kockázati profilja együttesen olyan megalapozott érvet alkotnak, amelyből levonható a cikk fő következtetése, mely szerint a négylábú, CBRN-képességű robot rendszeresítése a PA Zrt. Létesítményi Tűzoltóságánál időszerű, megvalósítható, és a nukleáris biztonság terén kézzelfogható előrelépést jelent.

4. MELLÉKLETEK

1. számú melléklet

A skóciai Dounreay nukleáris létesítménynél történt Spot-alkalmazás

A Dounreay nukleáris létesítmény volt Skócia első működő reaktora és egyben az Egyesült Királyság egykori legfontosabb gyorsreaktor-kutatási központja. A telephelyen három különböző célú reaktor működött: DMTR (Materials Test Reactor - 1958–1969), DFR (Dounreay Fast Reactor - 1959–1977), PFR (Prototype Fast Reactor - 1974–1994). Az üzemelés időszaka alatt viszont olyan nem kívánatos események is történtek, ami a telephely végső leállítását és az energiatermelésének végét jelentette, 1994-ben: az üzemanyag-újrafeldolgozás során ugyanis apró, homokszemnyi sugárzó anyagok kerültek a tengerbe a csatornarendszeren keresztül. A telephely így ma már nem termel áramot, viszont a technológiai sajátosságai miatt jelenleg is Európa egyik legösszetettebb nukleáris leszerelési projektje zajlik itt, több mint 1300 ember által, a Dounreay Division Nuclear Restoration Services (NRS) irányításában.

2. számú melléklet

A spanyolországi Santa María de Garoña atomerőműnél történt Spot-alkalmazás

A spanyolországi Santa María de Garoña atomerőmű leszereléséhez használt Spot Enterprise típusú robot egyedi fejlesztését az Alisys technológiai vállalat és a GDES (Grupo Dominguis Energy Services) energetikai vállalat közösen végezte, az Enresa spanyol hulladékkezelő állami vállalat részére. Az alkalmazás fő célja az ALARA-elv* betartása, azaz az emberi személyzet sugárterhelésének minimálisra csökkentése volt a veszélyes területeken végzett munka során. A robot elsődleges feladata az épület belső falainak, padlóinak és épületszerkezeti anyagainak sugárszennyezettségi mérése és feltérképezése, továbbá a radioaktív hulladékok (az El Cabril-i) hulladéktárolóba történő szállítása előtt azonosítása és osztályozása volt. A robot ezt a feladatot egy nagy pontosságú robotkarral felszerelve végezte el, amely képes volt különféle mérőműszerek használatára a belső helyiségekben. A robot értékelő-elemző szoftvere valós idejű adatokat szolgáltatott a mérési eredményekről, az izotópok típusáról és a sugárzás intenzitásáról. Az egész kommunikációt a felhő alapú kapcsolat tette lehetővé, melynek köszönhetően a robot LiDAR eszköze miatt 3D-s pontfelhő térképet is kaptak a kezelőszemélyzet tagjai a bejárt és vizsgált terület szennyezettségét illetően.

*ALARA: As Low As Reasonably Achievable, magyarul: olyan alacsonyan, amennyire az ésszerűen elérhető. Az ALARA-elv a sugárvédelem alapvető szabálya, amely szerint a sugárterhelést a gazdasági és társadalmi tényezők figyelembevételével az ésszerűen elérhető legalacsonyabb szinten kell tartani.

3. számú melléklet

A PA Zrt. 1991-es és 2003-as üzemzavarai

Az 1991. márciusi INES 2-es esemény (üzemzavar): Az 1-es blokk tervezett karbantartása során egy daru kezelési hibája miatt egy több tonnás fűtőelem-kazetta megdőlt, és beszorult a reaktortartály felső szerkezetébe. Az emberi mulasztás és technikai ellenőrzés hiánya miatti okokból kialakult hiba bár nem járt radioaktív anyag környezetbe kerülésével, és a személyzet sem szenvedett sugárterhelést, a helyreállítás mégis hetekig tartott, mivel a sérült elemet speciális, távvezérelt eszközökkel kellett kiszabadítani.

Az 2003. április 10-ei INES 3-as esemény (súlyos üzemzavar): A fűtőelemek felületén lerakódott magnetitréteget próbálták eltávolítani a 2-es blokk melletti tisztítótartályban. A tisztítás után a hűtés elégtelen volt, mivel a tisztítótartály kialakítása nem tette lehetővé a megfelelő természetes cirkulációt a hűtővíz szivattyúinak leállása után, aminek következtében a kazetták túlhevültek, a burkolatuk megrepedt, és a tartály felnyitásakor radioaktív gázok szabadultak fel. Összesen 30 darab üzemanyag-kazetta szenvedett súlyos sérülést. Minimális mennyiségű radioaktív nemesgáz jutott a környezetbe, de ez jóval a megengedett egészségügyi határérték alatt maradt. A lakosság nem volt veszélyben. Évekig tartott a helyreállítás, amit végül orosz mérnökök segítségével sikerült véghezvinni.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Introducing CERN's robodog. CERN News. [Online]. Elérhetőség: <https://home.cern/news/news/engineering/introducing-cerns-robodog> (2025.12.28.)
- [2] McGreavy C. (CERN CEM csoport): CERNquadbot – fejlesztési háttér. CERN hivatalos sajtóanyag, 2024. február.
- [3] CERN unleashes powerful robot-dog to inspect nuclear radiation zones. Interesting Engineering, 2024. február 6. [Online]. Elérhetőség: <https://interestingengineering.com/innovation/cern-unleashes-powerful-robot-dog> (2025.11.17.)
- [4] O'Sullivan-Dale U., Robot dog performs radiation test at Large Hadron Collider. Robotics and Automation Magazine, 2024. február 13. [Online]. Elérhetőség: <https://www.roboticsandautomationmagazine.co.uk/news/nuclear/robot-dog-performs-radiation-test-at-large-hadron-collider.html> (2025.10.16.)
- [5] A four-legged Robodog is patrolling the Large Hadron Collider. Popular Science, 2024. február 8. [Online]. Elérhetőség: <https://www.popsci.com/technology/robodog-large-hadron-collider/> (2025.12.19.)
- [6] Quach K., CERN training robot dogs to spot radiation hazards at LHC. The Register, 2024. február 8. [Online]. Elérhetőség: https://www.theregister.com/2024/02/08/cern_is_training_robot_dogs/ (2025.11.02.)
- [7] Unitree Robotics Go1 EDU specifikáció. [Online]. Elérhetőség: <https://shop.unitree.com/> (2025.12.18.)
- [8] Spot in Fukushima Daiichi. Boston Dynamics Case Study. [Online]. Elérhetőség: <https://bostondynamics.com/case-studies/spot-in-fukushima-daiichi/> (2026.04.03.)

- [9] How to Gather Better Data and Reduce Dosage in Nuclear Facilities. Boston Dynamics Blog. [Online]. Elérhetőség: <https://bostondynamics.com/blog/how-to-gather-better-data-and-reduce-dosage-in-nuclear-facilities/> (2025.11.13.)
- [10] Dominion Energy – Boston Dynamics Spot Case Study. [Online]. Elérhetőség: <https://bostondynamics.com/case-studies/dominion-energy/> (2025.08.31.)
- [11] Boston Dynamics Spot is Helping Chernobyl Move Towards Safe Decommissioning. IEEE Spectrum, 2023. szeptember 22. [Online]. Elérhetőség: <https://spectrum.ieee.org/boston-dynamics-spot-chernobyl> (2025.10.24.)
- [12] Malayil J., Robot dog to sniff out radiation at Spain's defunct nuclear facility. Interesting Engineering, 2025. június 24. [Online]. Elérhetőség: <https://interestingengineering.com/innovation/boston-dynamics-spot-nuclear-cleanup-spain> (2025.09.22.)
- [13] Data Collection in Nuclear Environments. Boston Dynamics Blog. [Online]. Elérhetőség: <https://bostondynamics.com/blog/data-collection-sensing-in-nuclear-environments/> (2025.12.01.)
- [14] FORKEL, D., CERVERA, E., MARÍN, R., MATHESON, E., DI CASTRO, M. Mobile Robots for Teleoperated Radiation Protection Tasks in the Super Proton Synchrotron, Towards Autonomous Robotic Systems. Springer, 2023. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-48303-5_4
- [15] The Rise of the Radiation Protection Robots. CERN Knowledge Transfer. [Online]. Elérhetőség: <https://kt.cern/news/news/spotlight-series/rise-radiation-protection-robots> (2026.02.20.)
- [16] Radiation Protection and Monitoring. CERN Knowledge Transfer. [Online]. Elérhetőség: <https://kt.cern/competences/radiation-protection-and-monitoring> (2026.02.20.)
- [17] Meet the CERN Robots. CERN News. [Online]. Elérhetőség: <https://home.cern/news/news/engineering/meet-cern-robots> (2026.02.20.)
- [18] ATOMIX Kft. – Biztonsági Üzletág. [Online]. Elérhetőség: <https://atomix.mvm.hu/HU/Bemutakozas/TevekenysegiUzletag> (2026.02.14.)
- [19] Paks II. – Szituációs gyakorlatot tartott a tűzoltóság. Paks-Press Hírügynökség, 2024. június. [Online]. Elérhetőség: <https://pakspress.hu/paks-ii-szituacios-gyakorlatot-tartott-a-tuzoltosag/> (2025.12.09.)
- [20] Reassessing CBRN Threats in a Changing Global Environment. SIPRI Research Report. Stockholm: Stockholm International Peace Research Institute, 2019.
- [21] AJAYKUMAR S. Emerging Technologies in the Development and Delivery of CBRN Threats, Observer Research Foundation Issue Brief No. 768, 2024. december.
- [22] Thirty-nine Years after Chornobyl – How is WHO Helping Member States Strengthen Health Security against CBRN Threats? WHO/Europe, 2025. április 30. [Online]. Elérhetőség: <https://www.who.int/europe/news/item/30-04-2025> (2025.11.20.)
- [23] CBRN Defense Market Outlook (2024–2030). iCrowdNewswire, 2025. május. [Online]. Elérhetőség: <https://icrowdnewswire.com/2025/05/22/cbrn-defense-market-outlook-2024-2030/> (2025.09.28.)
- [24] MVM Paksi Atomerőmű Zrt. Wikipedia. [Online]. Elérhetőség: https://hu.wikipedia.org/wiki/MVM_Paksi_Atomerőmű (2025.10.15.)

- [25] Introducing Unitree Go1 – The World's First Intelligence Bionic Quadruped Robot Companion of Consumer Level. [Online]. Elérhetőség: <https://www.unitree.com/go1> (2025.12.18.)
- [26] DI CASTRO, M. Robotic Solutions for Inspection and Remote Maintenance at CERN, Big Science Sweden Technical Workshop on Remote Handling, 2020. október 22. [Online]. Elérhetőség: <https://www.bigsciencesweden.se/media/m13hugk5/robotics-and-automation-at-cern-by-mario-de-castro.pdf> (2025.10.11.)
- [27] Robodog doing radiation measurements. CERN Document Server [Online]. Elérhetőség: <https://cds.cern.ch/record/2882391> (2026.04.12.)
- [28] Aerial view of CERN. [Online]. Elérhetőség: <https://supernova.eso.org/exhibition/images/cern-aerial-cc/> (2026.04.08.)
- [29] Unitree Official Website [Online]. Elérhetőség: <https://shop.unitree.com/> (2026.04.11.)
- [30] Boston Dynamics Expands Global Sales of Spot® Robot. [Online]. Elérhetőség: <https://bostondynamics.com/news/boston-dynamics-expands-global-sales-of-spot-robot/> (2026.04.07.)
- [31] Kromek Security & Defence Products. [Online]. Elérhetőség: <https://www.kromek.com/news/kromek-wins-two-contracts-totalling-1-5m-for-nuclear-security-products/> (2026.04.17.)
- [32] Direct Industry [Online]. Elérhetőség: <https://www.directindustry.com/prod/ion-science-global/product-223218-2716465.html> (2026.04.17.)