

# Optimális UV fertőtlenítési terv generálása minimális számú besugárzási pozícióval

Bugár-Mészáros Barnabás, Rózsa Zoltán, Szirányi Tamás és Majdik András<sup>†</sup>

## Abstract

Az elmúlt években a globális világjárvány rámutatott az érintés nélküli fertőtlenítés szükségességére olyan beltéri helyeken, ahol minden nap sok ember tartózkodik. Ennek az igénynek a kielégítésére hatékonyan alkalmazhatóak az UV fény fertőtlenítő hatására épülő rendszerek, amelyek közül a legfejlettebbek már képesek automatikusan besugárzási terveket generálni. Ezek a technológiák azonban gyakran támaszkodnak a környezet 2D-s modelljére, vagy összetett útvonalak bejárását teszik szükségessé, ami korlátozza széleskörű alkalmazhatóságukat. A javasolt rendszer 3D besugárzási számításokat, valamint egy genetikusan alapú optimalizáló modult alkalmaz ahhoz, hogy egyszerű besugárzási terveket készítsen, amelyek az elvárt fertőtlenítési szint eléréséhez szükséges minimális számú fényforrás pozíciót tartalmaznak. A továbbiakban bemutatott módszert különféle szintetikus környezetekben teszteltük, ahol jobb eredményeket ért el, mint hasonló besugárzás számítási és optimalizálási stratégiák, mind hatékonyság, mind az elért fertőtlenítési szint tekintetében.

## 1. Bevezető

Napjainkban általános követelmény lett a különböző beltéri közterületek, így kórházak, iskolák, bevásárlóközpontok megfelelő sterilizálása az általános takarítás mellett. Erre a célra különféle eljárásokat fejlesztettek ki, és a kémiai módszerek mellett az egyik legnépszerűbb megközelítés az UV fény alkalmazása<sup>1</sup>. Az UV fény nagyon hatékonyan bizonyult a vírusok, baktériumok és más mikroorganizmusok elpusztításában azáltal, hogy visszafordíthatatlan károsodást okoz az RNS-ben, illetve DNS-ben<sup>2,3</sup>. Ennek a módszernek a használata azonban számos kérdést vet fel. Különböző típusú fényforrások és besugárzás becslési technikák léteznek, valamint a fényforrás elhelyezése is kritikus jelentőségű.

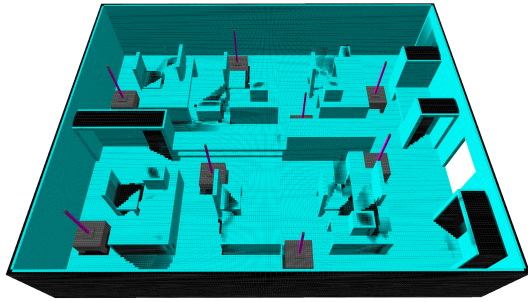
A COVID-19 világjárvány kitörése óta rengeteg munkát fektettek az UV fény mikroorganizmusokra gyakorolt hatásának kutatásába és új UV fertőtlenítő rendszerek

kifejlesztésébe<sup>4,5,6,7,8,9,10</sup>. A közelmúltban a kutatók és ipari vállalatok is célul tűzték ki, hogy UV fényforrással felszerelt mobil robotokat építsenek sterilizációs feladatok elvégzésére. A legtöbb ilyen megoldás közvetlenül számítja ki a besugárzási dózisokat a felületeken<sup>4,5,6,7,8,9</sup>, vagy UV érzékelőket alkalmaz<sup>5,9</sup>, hogy igazolja a fertőtlenítési folyamat hatékonyságát. Az egyszerűbb rendszerekben a besugárzási pozíciókat manuálisan választják ki<sup>5,6</sup>, és miközben a robotot autonóm módon vagy távirányítással vezérlik, megbecsülik a közeli felületekre eső dózisokat. Egy ennél összetettebb megközelítés, amikor a környezet digitális modelljét és egy besugárzás becslési formulát használnak arra, hogy a robot számára előre kiszámítsanak egy megvalósítható és optimalizált útvonalat<sup>4,7,8,9</sup>.

Bár egyes UV fertőtlenítő rendszerek ígéretes eredményeket mutattak, még sok lehetőség van a továbbfejlesztésre. A jelenleg elérhető megoldások közül sok a környezet 2D-s térképére támaszkodik a navigációhoz és a fertőtlenítési útvonal meghatározásához<sup>4,8</sup>, amik nem veszik teljesen figyelembe az objektumok alakját és a tér szerkezetét. Ezenkívül ezek a fertőtlenítő rendszerek gyakran egy adott robot konfigurációhoz vannak kötve, ami megnehezíti más eszközökhöz való adaptálásukat és teljesítményük átfogó elemzését.

Az itt bemutatotthoz leginkább hasonló módszert Marques és tsai javasolták<sup>7</sup>, amelynek célja egy fertőtlenítő

<sup>†</sup> Bugár-Mészáros B., Rózsa Z., Szirányi T. és Majdik A. a HUN-REN Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet (HUN-REN SZTAKI) Gépi Érzékelés Kutatólaboratóriumának, H-1111 Budapest, Kende u. 13-17., valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Karának (BME KJK), H-1111 Budapest Műegyetem rkp. 3., munkatársai. {barnabas.bugar-meszaros, zoltan.rozsa, tamas.sziranyi, andras.majdik}@sztaki.hu



**Figure 1:** Nyolc besugárzási pozícióból álló fertőtlenítési terv egy irodai környezetben. A feketével jelölt részek nem elérhetők az UV sugarakkal, míg a többi területen a világos türkiz szín jelzi az előre meghatározott besugárzási szint elérését.

robot optimális pályájának generálása, a környezet háló modellje alapján. Ezzel szemben, mi egy iteratív genetikus algoritmus alapú rendszert javasolunk, amely képes megtalálni az elvárt fertőtlenítési szinthez szükséges minimális számú besugárzási pozíciót. Az egyszerűbb besugárzási tervnek több előnye is van: a működéshez nem feltétel egy autonóm vagy ember által irányított robot használata; a fertőtlenítés egyidejűleg több eszközzel is elvégezhető anélkül, hogy bonyolult útvonal összehangolásra lenne szükség. A következőkben összefoglaltuk a munkánk főbb eredményeit:

- Egy újszerű környezet leírás, amely lehetővé teszi szerkezeti, szemantikai és besugárzási információk hozzárendelését külön minden 3D elemhez.
- Egy 3D besugárzási dózis becslésre alapuló, iteratív genetikus algoritmust használó optimalizációs eljárás, amely képes megtalálni az elvárt fertőtlenítési szinthez szükséges minimális számú besugárzási pozíciót.
- Kísérletek, amelyek rávilágítanak arra, hogy a javasolt optimalizációs eljárás által generált egyszerű besugárzási tervekkel nagyobb fertőtlenítési szintet lehet elérni, mint bonyolultabb megoldásokkal.

Az 1. ábrán látható egy komplex beltéri környezet esetében, hogy akár már nyolc besugárzási pozíció is elegendő lehet a szinte teljes fertőtlenítési lefedettség eléréséhez. Ebben a tanulmányban a rendszer tudományos háttérét és fő komponenseit mutatjuk be, kiterjedt kísérleti eredményekkel együtt, míg a teljes műszaki leírás a szabadalmi bejelentésünk tárgya<sup>11</sup>. A további UV fertőtlenítéssel kapcsolatos kutatások megkönnyítése érdekében a bemutatott rendszer forráskódját nyilvánosan hozzáférhetővé tettük (<https://github.com/barnibbb/RPO>).

## 2. Kapcsolódó munkák

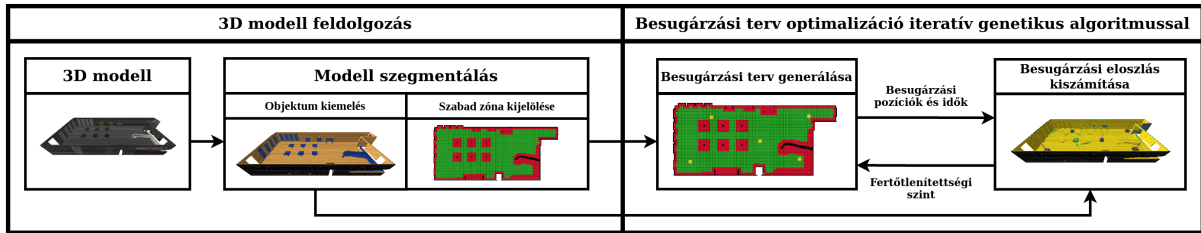
Az optimális felületfertőtlenítésre vonatkozó szakirodalom három kategóriába sorolható. Először is elengedhetetlen

egy olyan rendszer fizikai megvalósítása, amely képes UV fényvel történő fertőtlenítésre. Másodsor, fontos a felületek besugárzási dózisének pontos kiszámítása akár a fertőtlenítési folyamat előtt, akár közben. Végül a harmadik kategória olyan módszereket tartalmaz, amelyek a célterületen a besugárzási pozíciók ideális kiválasztására és az optimális útvonal kiszámítására összpontosítanak.

A piacon számos ipari UV fertőtlenítő robot áll rendelkezésre<sup>1</sup>, azonban a kutatók új rendszerek kifejlesztésén is dolgoznak<sup>4,5,8,9,10,12</sup>, részben azért, hogy hozzájáruljanak a tudományterület fejlődéséhez, részben azért, hogy demonstrálják új algoritmusaik alkalmazhatóságát. Guettari és tsai. megépítették az i-Robot UVC robot fertőtlenítőt<sup>10</sup>, amely több szenzorral (pl. ultrahang szenzor, LiDAR szenzor) felszerelt, és képes autonóm működni, valamint különböző tényezők figyelembevételével becsülni a szükséges fertőtlenítési időt. Conroy és tsai. bebizonyították, hogy olcsó fertőtlenítő robot is építhető egyszerű alkatrészekből<sup>4</sup>, amely a navigációhoz és a térképezéshez szabványos robotikai algoritmusokat tud használni. A legtöbb fertőtlenítő robot mobil platformra szerelt UV fénycsöveket tartalmaz, azonban Conte és tsai. továbbfejlesztették ezt a szabványos szerkezetet azzal, hogy egy robotkar végére erősített pontszerű UV fényforrást is használtak a nem függőleges és rejtett felületek fertőtlenítéséhez<sup>5</sup>. Léteznek a miénkhez hasonló UV fertőtlenítési rendszerek is, amelyek nem támaszkodnak egy adott robotra típusra, így felhasználhatóak lehetnek a különböző eszközök összehasonlítására<sup>6,7</sup>.

Ahhoz, hogy a besugárzás becslése során figyelembe lehessen venni a környezet szerkezetét szükséges annak digitális modellje, ami ezen kívül fontos a fertőtlenítési szint vizualizálásához is. A digitális modell lehet két-<sup>4,8</sup> illetve háromdimenziós<sup>5,6,7,9</sup>, a szenzorok típusától és az alkalmazott algoritmusok jellemzőitől függően. Conroy és tsai.<sup>4</sup> valamint Tiseni és tsai.<sup>9</sup> a környezet egyszerűsített modelljét használják, ahol minden 2D-s pozícióban csak egy elemet vesznek figyelembe, amely a legkisebb besugárzási dózist kaphatja. Általánosságban, az egyszerűsített környezet modellek gyorsabb, míg a teljes 3D térképek pontosabb számítást tesznek lehetővé. A 3D modellek jellemzően háromszögekből<sup>7</sup> vagy a tér részletesebb felosztását biztosító voxelekből<sup>5,6</sup> épülnek fel.

A célterületen a besugárzási dózisok kiszámításához különböző stratégiák alkalmazhatók. Guettari és tsai.<sup>10</sup> illetve Chanprakon és tsai.<sup>12</sup> több tényezőt is figyelembe vesznek a szükséges fertőtlenítési idő becsléséhez anélkül, hogy közvetlenül használnák a környezet 3D-s modelljét. A besugárzási értékek a fertőtlenítési folyamat során is kiszámíthatók<sup>5,6</sup>. Conte és tsai. a korábban említett, karral felszerelt robot platformjukat arra használták, hogy működés közben 3D-s fertőtlenítési térképet hozzanak létre<sup>5</sup>. A Kurniawan és Adiprawita által javasolt rendszer a besugárzási folyamatot egy digitális iker segítségével szimulálja, és



**Figure 2:** A rendszer áttekintése. Először a környezet 3D modelljét behelyezzük a modell szegmentáló blokkba, amely további információkkal egészíti ki azt, és kiválasztja azt a zónát, amelyen belül a fényforrások elhelyezhetők (azaz a szabad zónát). Ezt követően a terv generátor modul összeállít besugárzási pozíciókból és időkből álló fertőtlenítési terveket, amelyeket a besugárzási eloszlás kiszámítását végző modul a 3D modell alapján kiértékel. Az értékelés eredményeképpen a fertőtlenítési lefedettségi szinteknek megfelelő besugárzási térképek jönnek létre, amelyek segítségével összehasonlíthatók a megoldások, és így a genetikussal alkalmazásával, valamint a fényforrás pozíciók számának növelésével jobb besugárzási tervek hozhatók létre.

a fényforrást zajmentes 3D LiDAR-ként modellezi, ami lehetővé teszi a kitakart területek figyelembevételét <sup>6</sup>. Ez utóbbi két módszer alkalmas a besugárzás becslésére és a fertőtlenítési szint megjelenítésére, azonban a fényforrás optimális elhelyezését nem veszik figyelembe.

Mivel a fényforrásnak a besugárzandó felületekhez viszonyított elhelyezése kiemelkedő jelentőségű a fertőtlenítés hatékonysága szempontjából, számos, erre a tényezőre összpontosító módszert fejlesztettek ki. Mind Conroy és tsai. <sup>4</sup>, mind Marques és tsai. <sup>7</sup> először diszkrétizálják a teret, majd lineáris programozással keresik meg azokat a helyeket, amelyeket a robotnak érintenie kell a fertőtlenítési terv teljesítéséhez, míg az útvonalakat egy utazó ügynök probléma megoldásával számítják ki. A Conroy és tsai. által javasolt rendszer fő korlátja a környezet 2D-s térképként való leegyszerűsítésében rejlik <sup>4</sup>. Marques és tsai. egy megbízhatóbb 3D-s reprezentációt használnak, azonban a mi módszerünkkel ellentétben ők nem az alacsony komplexitású fertőtlenítési tervek megtalálására koncentrálnak, és voxelek helyett egy háló modellen számítják a besugárzási értékeket <sup>7</sup>.

Pierson és tsai. <sup>8</sup>, szintén a célterület 2D-s reprezentációját használták fel, mint Conroy és tsai. <sup>4</sup>, és két különböző megközelítést mutattak be a fertőtlenítő robotok vezérlésére. Statikus környezet esetén a diszkrétizált 2D-s térképből egy gráfot hoznak létre, ahol a csomópontok azokat a helyeket jelölik, amelyeket a robot érthet (mindegyikhez tartozik egy besugárzási dózis követelmény), és az útvonalat A\* algoritmus segítségével számítják ki. Ezzel szemben, ha az akadályok helye változhat két fertőtlenítés között, akkor egy Voronoi-alapú megközelítést javasolnak, ahol a robot cél pozícióját a terület aktuális besugárzási eloszlása alapján választják ki. Tiseni és tsai. szintén bemutattak egy módszert, amellyel a robotot olyan területekre lehet irányítani, amelyek még igényelnek fertőtlenítést, azonban ők egy időben változó mesterséges potenciálmezőt

használtak a sebesség közvetlen kiszámításához <sup>9</sup>. A környezet modelljében a kiegyenlítetttség érdekében csak a legrosszabb hatásfokkal rendelkező 3D elemet vetik figyelembe minden egyes 2D helyen, és a sebesség számításai képlet három együtthatóját genetikussal segítségével optimalizálták a lehető legjobb pálya elérése érdekében. Bár ez a két rendszer ígéretes eredményeket mutatott valós kísérletek során, az egyszerűsített környezet reprezentációk használata korlátozza alkalmazhatóságukat.

Bár a legtöbb esetben a környezeti modell elemeit egyformán kezeljük a fertőtlenítési szint kiszámításakor, előnyös lehet az olyan tárgyakat előnyben részesíteni, amelyeket az emberek gyakran megérintenek (pl. asztalok, székek). Qiu és tsai. <sup>13</sup> egy olyan rendszert javasoltak, amely a környezet 3D modelljének elkészítése során képes megkülönböztetni a sokszor megérintett felületeket, és ezt az információt felhasználva megtervezni az UV fertőtlenítő robot mozgását a Marques és tsai. által bemutatott algoritmus <sup>7</sup> továbbfejlesztett változatának segítségével. A mi besugárzási terv optimalizáló eljárásunk is képes a szemantikus információ felhasználására, azonban a feltehetően gyakran megérintett objektumok kiválasztására csak a teljes környezet rekonstrukciója után kerül sor.

### 3. A javasolt rendszer

A javasolt rendszer két fő részből áll. Először, a célterület 3D modelljét dolgozzuk fel, hogy minden egyes elemet további információkkal egészítsünk ki, amelyeket a besugárzási lefedettség számításakor használunk fel. A második, optimalizáló rész iteratív módon növeli a besugárzási helyek számát, amíg a kívánt fertőtlenítési szintet el nem érjük. Minden egyes iterációban lefut egy genetikussal algoritmus, amely a közeli felületekre eső dózisok alapján megtalálja a besugárzási pozíciók optimális halmazát. A 2. ábra mutatja a javasolt rendszer különböző részeit, amelyeket az alábbiakban részletezünk.

### 3.1. A környezet 3D modelljének feldolgozása

A besugárzási dózis kiszámításához a fertőtlenítendő környezet diszkrétizált 3D-s modelljére támaszkodunk. A 3D geometriát figyelembe vevő UV fertőtlenítő rendszerek általában vagy háló modelleket<sup>7</sup> vagy voxel reprezentációkat<sup>5,6</sup> használnak. Az általunk javasolt rendszerben az OctoMap voxel modellt<sup>14</sup> úgy bővítettük ki, hogy minden egyes cellában további strukturális (pl. felületi normálvektor), szemantikai (pl. objektumtípus) és besugárzási (pl. aktuális dózis, fertőtlenítési határérték) információkat is tudjunk tárolni.

A 3D modellben először annak a *szabad zónának* a meghatározását kell elvégezni, ahol a fényforrás ütközés nélkül elhelyezhető. Másodsor, minden egyes elem esetében megbecsüljük a lokális felületi normálvektorokat, amelyek a besugárzási értékek pontos kiszámításához szükségesek. Ezután a modell azon elemeit jelöljük ki, amelyeket elméletileg közvetlenül elérhetnek a *szabad zónán* belül sugárzó fényforrásból induló UV sugarak. Ehhez a 3D modell minden elemére előzetesen kiszámolunk besugárzási értékeket, néhány száz egyenletesen elhelyezett fényforrást feltételezve. Egy elemet akkor jelölünk elérhetőnek, ha a besugárzási értéke bármelyik elhelyezett fényforrás esetében nagyobb, mint nulla. Ahogyan azt a Marques és tsai.<sup>7</sup> is megállapították, a közvetett besugárzás a legtöbb esetben elhanyagolhatóan kicsi, ezért nem kell figyelembe venni.

Utolsó lépésként, a modell struktúráját és a kiszámított felületi normálvektorokat felhasználjuk a 3D elemek különböző kategóriákba történő besorolásához. Bár a rendelkezésre álló információ nem elegendő a pontos osztályozáshoz, az objektumok megkülönböztethetők a padlótól és a falaktól, így előnyben részesíthetők a fertőtlenítési tervek értékelésénél. Ennek az eljárásnak az az előnye, hogy csak a 3D modell alapvető jellemzőit használja fel, azonban a gyakran megérintett részek pontosabb kiválasztásához a Qui és tsai.<sup>13</sup> által bemutatotthoz hasonló szemantikus szegmentációs módszer is alkalmazható.

### 3.2. Besugárzási dózis számítás

A legegyszerűbb esetekben az UV besugárzás számítása pontszerű fényforrást feltételezve történik. A legtöbb elérhető UV fertőtlenítő rendszer azonban fénycsövekből épül fel<sup>5,9,10</sup>. Következésképpen mi is hengeres modellt használunk a fényforrás leírására hasonlóan, mint Tiseni és tsai.<sup>9</sup> Ebben a modellben a fénycsövet pontszerű fényforrások halmazával közelítjük, és egy adott felületemre gyakorolt hatásukat a hossz tengely menti integrálással számítjuk.

Egy elem besugárzási dózisa ( $H$ ) kiszámítható az egységre jutó besugárzási teljesítmény és az idő szorzataként. Az egységre jutó besugárzási teljesítményt ( $I$ ) az 1. egyenlet szerint kell kiszámítani a korábban ismertetett fényforrásmodell alapján, figyelembe véve a környezet geometriai tulajdonságait, mint például a fényforrástól a

felületek felé mutató vektorokat ( $r$ ), a felületi normálvektorokat ( $n$ ), valamint a rejtett területeket figyelembe vevő láthatósági paramétereket ( $v$ ).

$$I(r, n, v) = \frac{P \cdot v}{4 \cdot \pi \cdot L} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{|r \cdot n|}{|r|^3} dl \quad (1)$$

Az 1. egyenletben  $P$  és  $L$  a fényforrás teljesítményét, illetve hosszát jelöli, míg az alkalmazott láthatósági paramétert sugárkövetés segítségével számoljuk ki. Mivel hengeres fényforrást feltételeztünk, a hossz tengely mentén egyenletesen elosztott pontokból több sugárnyalábot bocsátunk ki. A láthatósági paraméter a célpontot elérő sugarak és a 3D elem irányába kibocsátott összes sugár arányát írja le.

A 3.1. fejezetben leírtak szerint az elérhető elemek kiválasztása különféle pozíciókba elhelyezett fényforrásokhoz kötődő besugárzási értékek előzetes kiszámításával történik. Az általunk javasolt módszer képes felgyorsítani a számításokat azáltal, hogy a lehetséges besugárzási pozíciók halmazát lekorlátozza az előzetes számításokban használtakra és a kapcsolódó megbecsült besugárzási értékeket felhasználja az optimalizáció során. A 4.1 fejezet bemutatja, hogy módszerünk más stratégiákhoz viszonyítva mind a lefedettség, mind a futási idő tekintetében jobb eredményeket ad.

Az optimalizálási folyamat során a legtöbb esetben a besugárzási terv több fényforrás pozíciót tartalmaz. Ezért egy felületem fertőtlenítési szintjének meghatározásához a besugárzási hatásokat a 2. egyenlet szerint összegezzük,

$$H = \sum_{k=1}^m I_k(r, n, v) \cdot t_k \quad (2)$$

ahol  $m$  a besugárzási helyek számát,  $t$  pedig a kapcsolódó időtartamokat jelöli.

### 3.3. Besugárzási terv optimalizáció

Az optimalizálási fázis célja, hogy megtaláljuk a besugárzási pozícióknak azt a minimális halmazát, amely már képes garantálni a szükséges fertőtlenítési lefedettséget. Egyrészt, a mélytanuláson alapuló megközelítések nem alkalmasak ennek a problémának a megoldására, mivel a tanítási fázisban már optimalizált tervekre van szükség nagy számú különböző célkörnyezetre. Másrészt, az olyan optimalizálási technikák esetén, mint a lineáris programozás, nehézkes lenne a besugárzási tervek komplexitására vonatkozó megkötés definiálása. Több sztochasztikus módszer használatát is mérlegeltük, és végül a genetikus algoritmus mellett döntöttünk, mivel ez lehetővé teszi a besugárzási pozíciók számának rugalmas változtatását, illetve korlátozását, ami egy kis paraméterkészletet eredményez, amely hatékonyan optimalizálható. A genetikus algoritmusban minden egyes egyed egy lehetséges fertőtlenítési tervnek felel meg, ami a fényforrás 2D-s pozícióinak (azaz  $x$  és  $y$

koordinátáinak) illetve a kapcsolódó besugárzási időkhöz a halmazából áll. Jelenleg azért csak az  $x$  és  $y$  koordinátákat használjuk, mert a legtöbb elérhető UV fertőtlenítő rendszer csak 2D-s síkban képes mozogni, az alapelv azonban kiterjeszhető 3D-s mozgásra is.

A genetikus algoritmus képes javítani a fertőtlenítési terveket adott számú besugárzási pozícióra, azonban önmagában ez nem biztos, hogy elegendő a kívánt besugárzási eloszlás eléréséhez. Ezen limitáció leküzdése érdekében a teljes genetikus optimalizálást növekvő számú fényforrás pozícióra iteratív módon végezzük el. Azért, hogy a fertőtlenítési tervek összehasonlíthatóak legyenek, a folyamat teljes időtartamát rögzítjük, így a genetikus algoritmus operátorai és a pozíciók számának növelése csak a besugárzási idő arányát befolyásolja.

Az algoritmus először létrehozza a kezdeti populációt, majd addig alkalmazza az operátorokat, amíg el nem érjük az előre meghatározott fitness pontszámot, vagy a generációk maximális számát. Az utóbbi esetben minden egyed külön-külön egy-egy új véletlenszerű fényforrás pozícióval bővíti ki a rendszert, majd újra számítja a besugárzási időket. A besugárzási helyek számát addig növeljük, amíg a genetikus algoritmus nem talál olyan megoldást, amelynek fitness pontszáma meghaladja a kívánt határértéket, vagy a bővítés nem vezet rosszabb eredményhez.

Általános esetben a 3D modell minden elemére ugyanazt a besugárzási dózishatárt ( $H_{limit}$ ) állapítjuk meg. Ahogy a 3. egyenlet mutatja, a fitness pontszám ( $F$ ) azon voxelek aránya, a 3D modell feldolgozási fázisában meghatározott elérhető voxelek számához ( $n$ ) viszonyítva, amelyek esetében a számított dózis ( $H_j$ ) meghaladja a határértéket.

$$F = \frac{\sum_{j=1}^n \delta_j}{n} \quad \delta_j = \begin{cases} 1, & \text{if } H_j \geq H_{limit} \\ 0, & \text{if } H_j < H_{limit} \end{cases} \quad (3)$$

A 3.1 szakaszban leírtak szerint azonban a 3D modellben az objektumok megkülönböztethetőek a padlótól és a falaktól, ami lehetővé teszi az optimalizációs algoritmus módosítását. Egyrészt fejlettebb fitness függvények fogalmazhatóak meg, ahol a különböző típusú elemek fertőtlenítési szintjét külön-külön számíthatjuk ki, és végül miután súlyokat rendeltünk az egyes tagokhoz, összegezhethetjük azokat. Másrészt az egyes osztályok számára különböző besugárzottsági határértékek állíthatóak be, amennyiben valamelyik típus nagyobb dózist igényel a megfelelő fertőtlenítettséghez. A 3D elemek osztályozására összpontosító kísérletet a 4.3. fejezet mutatja be.

#### 4. Kísérletek

A teljesítményének igazolása és elemzése érdekében különböző konfigurációkban vizsgáltuk a javasolt rendszert. Először is összehasonlítottuk a besugárzásbecslési módszerünket több más stratégiával, hogy hangsúlyozzuk a

pontos 3D-s számítások szükségességét. Ezután a rendszert egy kórházi betegszoba 3D-s modelljében teszteltük, mivel ez egy tipikus fertőtlenítendő környezet, valamint lehetővé teszi az összehasonlítást egy másik korszerű optimalizációs megoldással is <sup>7</sup>. Végül megvizsgáltuk azt is, hogy az eredeti fitness függvény módosításával előnyben részesíthetőek-e az objektumok a besugárzás szempontjából. A szimulált fényforrás jellemzői, az előírt besugárzottsági szint és a genetikus algoritmus tervezési paraméterei az optimalizációk során végig állandóak voltak. Minden kísérletet egy 32 GB RAM-mal és 12 magos Intel i7-7800X processzorral rendelkező számítógépen végeztünk.

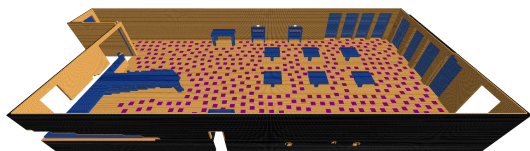
#### 4.1. Besugárzás becslési stratégiák

A különböző besugárzásbecslési stratégiák értékeléséhez használt 3D modell egy irodát ábrázoló, egyedileg generált voxel rács, amely az 1. ábrán látható. Amint azt a 3.2. szakaszban leírtuk, egy 3D elem besugárzási értéke függ a fényforrástól vett távolságtól, a beesési szögtől, a láthatóságtól és az alkalmazott fényforrásmodellről. Rendszertünk az 1. egyenletre támaszkodik a számítások során, a teljesítményét pedig több egyszerűsített módszerrel is összehasonlítottuk. Az összes stratégiát az optimalizációs egységünkkel összekapcsolva vizsgáltuk, és rögzítettük az elért valós fertőtlenítési lefedettséget, a sugárzási pozíciók számát és a futási időt.

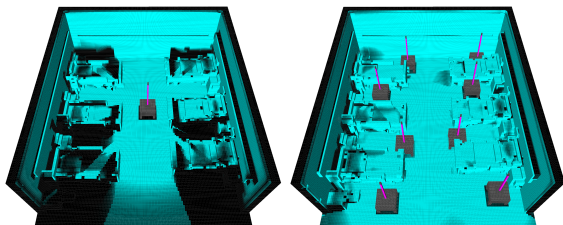
Az első módszer Pierson és tsai. <sup>8</sup> munkájára támaszkodik, akik a környezet 2D-s ábrázolását használták, és nem vették figyelembe a beesési szöveget. A második stratégia a Conroy és tsai. <sup>4</sup> által leírt besugárzásbecslési elveket követi, azzal a különbséggel, hogy a 2D távolságszámítást a fényforrás függőleges helyzetével egészítettük ki, nem a szoba magasságának felével.

A harmadik és negyedik stratégia a Tiseni és tsai. <sup>9</sup> által bemutatott módszerre épül. Munkájuk fő egyszerűsítése az, hogy bár a környezet 3D-s modelljét használják, csak a legrosszabb hatásfokú elemet veszik figyelembe minden egyes 2D-s helyen. Míg ezek a 3D elemek a fényforrás pozíciójától függően változhatnak, mi egy általánosabb, a lámpa elhelyezésétől független megoldást valósítottunk meg. Minden egyes 2D-s pozíció esetében megvizsgáltuk a kapcsolódó 3D-s elemeket, és az elhelyezkedésük alapján besoroltuk az adott helyet vízszintes illetve függőleges kategóriába. Ezután feltételeztük, hogy a legrosszabb hatásfokkal rendelkező 3D elem egy adott 2D pozíciót vizsgálva a vízszintes kategória esetében a fényforrás középpontjához legközelebbi, míg a függőleges kategória esetében az attól legtávolabbi. A két stratégia közötti különbség, hogy a harmadiknál egy pontszerű, míg a negyediknél egy az eredetihez hasonló hengeres <sup>9</sup> fényforrás leírást alkalmaztunk.

Kurniawan és Adiprawita <sup>6</sup> munkája inspirálta az ötödik és hatodik stratégiát. Ezekben az esetekben a legfontosabb szempont a pontszerű fényforrásmodellre való



**Figure 3:** Egy virtuális kávézó 3D modellje, ahol a lila pontok az előre kiszámított besugárzási pozíciókat jelölik.



**Figure 4:** Balra: Egyetlen lámpa pozícióhoz tartozó besugárzási szint (47%-os lefedettség). Jobbra: A javasolt optimalizáló eljárás használatával elért lefedettség, ahol a kapott fertőtlenítési terv mindössze nyolc besugárzási pozícióból áll (68%-os lefedettség).

egyszerűsítés, bár az eredeti módszerben a beesési szöget sem vették figyelembe (ötödik stratégia). Az utolsó vizsgált módszer a mi rendszerünkben alkalmazott eljárás, ahol a lehetséges besugárzási helyek halmazát néhány százra korlátoztuk, és az optimalizálás előtt a Marques és tsai. <sup>7</sup> által javasolt megoldáshoz hasonlóan kiszámoltuk a rájuk jellemző besugárzási eloszlásokat. A 3. ábra mutatja az egyik tesztkörnyezetre a lehetséges besugárzási pozíciók elhelyezkedését.

A kapott eredmények alapján a legmagasabb fertőtlenítési szintet a mi módszerünk érte el, 86,45%-ot. Ez 1,42%-kal magasabb, mint a második legjobb, hatos számú stratégiáé, és 9,1%-kal magasabb, mint a leggyengébb, kettes számú becslési megközelítésé. A legalacsonyabb fertőtlenítési lefedettségek azokhoz a stratégiákhoz tartoznak, amelyek kizárólag a környezet 2D-s ábrázolására támaszkodnak, és ezért nem tudják teljes mértékben figyelembe venni annak szerkezetét. A fertőtlenítési szintek azoknál a stratégiáknál állnak a legközelebb a mi módszerünk által elérthez, amelyeknél csak egy egyszerűsítést alkalmaztak, nevezetesen a negyedik és a hatodik számítási módnál.

A mi módszerünk az optimalizáció elvégzéséhez nagyjából 10 percet igényel és így legalább 2,4-szer gyorsabb, mint bármelyik másik stratégia, az előszámítási lépésnek köszönhetően. Megfigyeltük, hogy általában a futási idő az elvégzett sugárkövetések számával növekszik. Következésképpen azok a módszerek, amelyek a környezet 2D-s reprezentációjára támaszkodnak, viszonylag gyorsak a negyedik stratégiához képest, ahol a hengeres fényforrás

modell miatt sokkal több sugarat bocsátunk ki. Érdekes azt is megjegyezni, hogy míg más stratégiák esetében a fertőtlenítési tervben szereplő fényforrás pozíciók száma nagy hatással van a futási időre, addig a mi megoldásunknál az inkább az előre kiszámított besugárzási eloszlások számától függ. Összefoglalva, az előre számításra alapuló stratégiánk más megközelítésekhez képest jóval jobb eredményt nyújt, miközben előnye, hogy az optimalizálás után nincs szükség további ellenőrzésre, mivel a besugárzási értékeket az 1. egyenletben leírt pontos becslési képlet alkalmazásával kapjuk meg a 3D modell összes elérhető elemére.

#### 4.2. Kiértékelés egészségügyi környezetben

Bár számos besugárzás becslő és optimalizáló rendszer létezik, a különböző környezet reprezentációk és figyelembe vett tényezők miatt nem egyértelmű az összehasonlítás. A mi módszerünk teljesítményének méréséhez Marques és tsai. munkáját választottuk referenciának <sup>7</sup>, mivel az rendelkezik a legtöbb hasonló jellemzővel. Ők is a környezet 3D-s reprezentációjára támaszkodnak, diszkrét besugárzási pozíciókból álló optimalizált útvonalat generálnak, valamint az árnyékolást is figyelembe veszik. A fő különbség az ő rendszerük és a miénk között az, hogy mi minimális számú besugárzási pozíció kiválasztására törekszünk, akár a teljesítmény esetleges kismértékű csökkenése mellett is.

A kísérletet ugyanazokkal a paraméterekkel végeztük el, mint Marques és tsai. <sup>7</sup>, ugyanabban a kórházi környezetben, azonban az eredeti háló modellt át kellett alakítani, mivel a mi módszerünk voxel reprezentációt használ. Összehasonlítottuk a *Single* esetet, amikor a fényforrás a célterület közepén helyezkedik el, és az *Optimalizált* megoldásunkat a Marques és tsai. cikkében szereplő *Static* és *Towerbot* modellekkel elért eredményekkel, 30 perces fertőtlenítési időkorlátot figyelembe véve <sup>7</sup>.

A terület alapos fertőtlenítése mellett a javasolt rendszer fő célja alacsony komplexitású besugárzási tervek megtalálása, amelyek minimális számú fényforrás pozíciót tartalmaznak. Annak vizsgálatára, hogy ez a megközelítés általánosan alkalmazható-e, megmértük, hogyan változik a fertőtlenítési lefedettség a besugárzási pozíciók számának növelésével. Annak érdekében, hogy érvényes következtetéseket tudjunk levonni, ezt a kísérletet nemcsak a kórházi modellre, hanem a másik két tesztkörnyezetre is elvégeztük.

A Marques és tsai. által javasolt módszer egy statikus fényforrás esetén nagyjából 50%-os, míg az optimalizált esetben nagyjából 60%-os fertőtlenítési szintet tudott elérni a kórházi tesztkörnyezetben <sup>7</sup>. Ezzel szemben az általunk javasolt rendszerrel egy lámpa pozíció esetén 47%, míg az optimalizált tervnél 68% az eredmény. Ezekhez az értékekhez tartozó besugárzási eloszlások láthatóak a 4. ábrán. Az egyetlen besugárzási pozícióra kapott értékek közötti különbséget a környezet eltérő reprezentálása okozhatja, azonban az megfigyelhető, hogy a mi

esetünkben az optimalizáció hatása jóval jelentősebb. Fontos még megjegyezni, hogy a mi optimalizált fertőtlenítési tervünk nagyjából egy nagyságrenddel kevesebb besugárzási pozíciót tartalmaz, mint a Marques és tsai. által generált <sup>7</sup>.

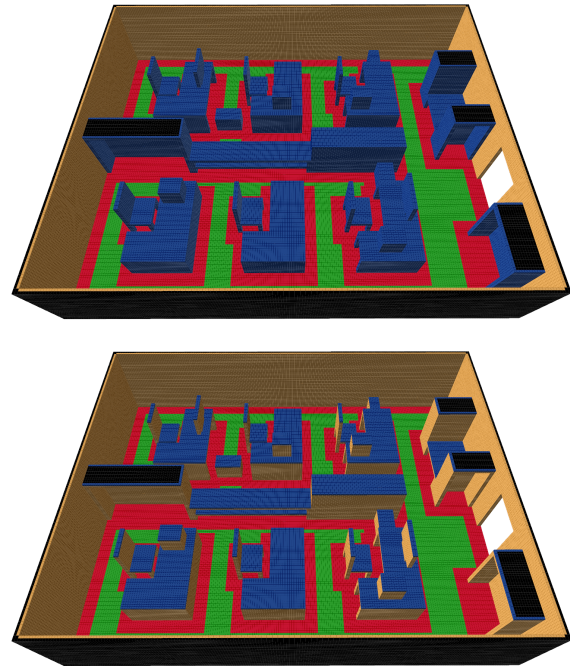
A megfelelően fertőtlenített 3D elemek arányát a fényforrás pozíciók számának függvényeként három különböző szintetikus környezetben is vizsgáltuk. Amint az feltételezhető volt, több pozíció kiválasztása általában nagyobb fertőtlenítési lefedettséget eredményez, amennyiben a rendelkezésre álló idő állandó. Megfigyeltük azonban, hogy bizonyos számú besugárzási pozíció után (ami környezetenként eltérő lehet), a lefedettség növekedésének üteme jelentősen lecsökken. Bár a vizsgált célkörnyezetek 3D modelljei mind méretükben, mind struktúrájukban különböznek egymástól, a fertőtlenítési szint növekedése tizenkét pozíció után mindegyiknél tartósan 1% alatt marad. Következésképpen sok esetben a szükséges lefedettséget már néhány besugárzási pozíció kiválasztásával is elérni lehet, ami egyszerűbb fertőtlenítési terveket eredményez.

### 4.3. Objektum fókuszú fitness függvény

A 3.1. fejezetben leírtak szerint a 3D modellek elemei osztályozhatók, és így megkülönböztethetők a tárgyak a padlótól és a falaktól. Ennek a funkciónak a teszteléséhez egy kávézó szintetikus modelljét használtuk, ami többféle objektumot is tartalmaz, ahogy az a 3. ábrán látható. Két esetet vizsgáltunk, az elsőben minden olyan elemet egy tárgy részének tekintettünk, amelyik nem tartozik a padlóhoz vagy falakhoz. Ezzel szemben a második esetben csak a tárgyak felső felületeit különböztettük meg, mivel ezek azok a részek, amelyeket az emberek leggyakrabban megérintenek. A két osztályozási mód az 5. ábrán van megjelenítve.

Bár a 3D elem osztályok súlyai sokféleképpen megadhatók, ahogyan azt a 3.3. szakaszban említettük, úgy találtuk, hogy a rendszer ilyen szempontból való alkalmazhatóságának bemutatásához elegendő csak a tárgyakhoz tartozó, megfelelően fertőtlenített elemek arányát figyelembe venni. Ezért az optimalizálást az ezen elv alapján módosított és a 3. egyenlet által leírt fitness függvénnyel futtattuk le, miközben az összes többi paraméter állandó volt. A teljesítmény mérőszámaként a megfelelően besugárzott tárgy elemek arányát használtuk.

A kísérletek során azt állapítottuk meg, hogy az első esetben az általános és a tárgyra összpontosító optimalizációnál a tárgy elemek besugárzottsági szintje nagyjából azonos ütemben növekszik a fényforrás pozíciók számának növelésével, azonban az utóbbi módszer átlagosan 8,54%-kal felülmúlja az előbbit. A második esetben még jelentősebb a különbség, mivel itt a módosított fitness függvény átlagosan 23,36%-kal nagyobb lefedettséget eredményez az eredeti megközelítéshez képest a tárgy elemekre vonatkozóan. Megfigyeltük továbbá, hogy a célterületen lévő objektumok megkülönböztetése nélkül azok



**Figure 5:** A tárgyakhoz tartozó 3D elemek első (fent) és második (lent) osztályozási módja. A zöld szín jelöli a szabad zónát, a piros a padló többi részét, a narancssárga az általános 3D elemeket, a kék a tárgyakhoz tartozókat, míg a fekete a nem elérhető részeket.

lefedettsége nem feltétlenül javul a besugárzási pozíciók számának növekedésével. Összefoglalva, az eredeti fitness függvény módosításával a prioritizált elemek besugárzottsága növelhető, azonban a javulás mértéke függ az objektumok pontos meghatározásától.

### 5. Következtetések

Egy olyan besugárzásbecslő rendszert terveztünk, amely képes genetikai algoritmus segítségével optimalizált fertőtlenítési terveket készíteni. A javasolt módszer kiszámítja, hogy a fényforrást melyik pozíciókba és mennyi ideig kell elhelyezni ahhoz, hogy a szükséges UV fertőtlenítési szint biztosítva legyen. Rendszerünket különböző szintetikus beltéri környezetekben teszteltük, és más módszereknél jobb fertőtlenítési eredményeket értünk el úgy, hogy egyben a besugárzási pozíciók számát is minimalizáltuk, ami egyszerűbb működést tesz lehetővé alacsonyabb költségek mellett.

A javasolt rendszer sokoldalúságát különböző besugárzás számítási stratégiákkal és fitness függvényekkel kapcsolatos kísérletekkel bizonyítottuk. Megmutattuk, hogy a lehetséges megoldások terének szűkítése a fertőtlenítési lefedettség és

a futási idő szempontjából előnyösebb, mint a besugárzás számítási módszer egyszerűsítése. Azt is bizonyítottuk, hogy rendszerünk képes különböző objektumokat előnyben részesíteni a tervoptimalizálás során, és ennek kapcsán a jövőben egy még kifinomultabb szemantikai szegmentálási módszer beépítésén fogunk dolgozni.

### Acknowledgements

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-3-I-BME-329 és ÚNKP-23-5-BME-463 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A kutatás az Európai Unió támogatásával valósult meg, az RRF-2.3.1-21-2022-00004 azonosítójú, Mesterséges Intelligencia Nemzeti Laboratórium projekt keretében, valamint a TKP2021-NVA-01 azonosítószámú projekt támogatásával.

### References

1. Mehta, Ishaan and Hsueh, Hao-Ya and Taghipour, Sharareh and Li, Wenbin and Saeedi, Sajad, "UV disinfection robots: A review", *Robotics and Autonomous Systems*, p. 104332, 2022.
2. Bolton, James R and Cotton, Christine Anne, "The ultraviolet disinfection handbook", *American Water Works Association*, 2011.
3. Cutler, Timothy D and Zimmerman, Jeffrey J, "Ultraviolet irradiation and the mechanisms underlying its inactivation of infectious agents", *Animal Health Research Reviews*, vol. 12, no. 1, pp. 15-23, 2011.
4. Conroy, Jonathan and Thierauf, Christopher and Rule, Parker and Krause, Evan and Akitaya, Hugo and Gonczi, Andrei and Korman, Matias and Scheutz, Matthias, "Robot development and path planning for indoor ultraviolet light disinfection", *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 7795-7801, 2021.
5. Conte, Dean and Leamy, Spencer and Furukawa, Tomonari, "Design and map-based teleoperation of a robot for disinfection of COVID-19 in complex indoor environments", *2020 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*, pp. 276-282, 2020.
6. Kurniawan, Irfan Tito and Adiprawita, Widyawardana, "A method of ultraviolet-C surface irradiation simulation and evaluation", *2021 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, pp. 1-5, 2021.
7. Marques, Joao Marcos Correia and Ramalingam, Ramya and Pan, Zherong and Hauser, Kris, "Optimized coverage planning for UV surface disinfection", *2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 9731-9737, 2021.
8. Pierson, Alyssa and Romanishin, John W and Hansen, Hunter and Yañez, Leonardo Zamora and Rus, Daniela, "Designing and deploying a mobile UVC disinfection robot", *2021 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 6700-6707, 2021.
9. Tiseni, Luca and Chiaradia, Domenico and Gabardi, Massimiliano and Solazzi, Massimiliano and Leonardis, Daniele and Frisoli, Antonio, "UV-C mobile robots with optimized path planning: algorithm design and on-field measurements to improve surface disinfection against SARS-CoV-2", *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 28, no. 1, pp. 59-70, 2021.
10. Guettari, Moez and Gharbi, Ines and Hamza, Samir, "UVC disinfection robot", *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp. 40394-40399, 2021.
11. Bugar-Meszáros, Barnabás and Majdik, András and Rozsa, Zoltán and Sziranyi, Tamás, "Method and system for generating a radiation plan", *International patent application*, WO2022248898A1, 2022.
12. Chanprakon, Pacharawan and Sae-Oung, Tapparatt and Treebupachatsakul, Treesukon and Hannanta-Anan, Pimkhuan and Piyawattanametha, Wibool, "An Ultraviolet sterilization robot for disinfection", *2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST)*, pp. 1-4, 2019.
13. Qiu, Ri-Zhao and Sun, Yixiao and Marques, Joao Marcos Correia and Hauser, Kris, "Real-time Semantic 3D Reconstruction for High-Touch Surface Recognition for Robotic Disinfection", *2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 9919-9925, 2022.
14. Hornung, Armin and Wurm, Kai M and Bennewitz, Maren and Stachniss, Cyrill and Burgard, Wolfram, "OctoMap: An efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees", *Autonomous robots*, vol. 34, pp. 189-206, 2013.
15. Labbé, Mathieu and Michaud, François, "RTAB-Map as an open-source lidar and visual simultaneous localization and mapping library for large-scale and long-term online operation", *Journal of Field Robotics*, vol. 36, no. 2, pp. 416-446, 2019.