

OPPONENSI BÍRÁLAT

BOLERACZKI MIKLÓS

Ipari mobil robotok kiválasztási módszerének szakértői rendszer alapú támogatása

című doktori értekezéséhez

Bíró: Dr. Jacsó Ádám, adjunktus, BME Gyártástudomány és -technológia Tanszék

1. Általános értékelés és kritikai észrevételek

Az „Ipari mobil robotok kiválasztási módszerének szakértői rendszer alapú támogatása” című disszertáció aktuális és releváns kutatási területet érint, amely szorosan illeszkedik a digitalizálódó Ipar 4.0-s környezet igényeihez. A mobil robotok alkalmazása rohamosan terjed a rugalmas gyártórendszerekben, és a megfelelő eszköz kiválasztása egyre összetettebb döntési problémát jelent. A Jelölt által bemutatott szakértői rendszer alapú megközelítés nemcsak a döntéstámogatás hatékonyságát növeli, hanem jól illeszthető a jövő intelligens gyártási rendszereinek igényeihez is. A dolgozatban szereplő eredmények alkalmazhatóak mind az ipari gyakorlatban, mind további kutatások kiindulási pontjaként. A téma interdiszciplináris jellege és jövőbe mutató megközelítése miatt a választott kutatási irány különösen értékesnek tekinthető.

A dolgozat nyelvezete alapvetően megfelelő, azonban néhány helyen keverednek a szaknyelvi és köznyelvi kifejezések, valamint a szakmai terminológiát tekintve nagyobb következetességre és szabotosságra kellett volna törekedni. Bár elütésekre és megfogalmazási hibákra is akadnak példák, illetve egyes betűszavak és rövidítések nincsenek kifejtve az első megjelenésüknél, ezzel együtt a szöveg jól érthető és követhető. A disszertáció 27 ábrát és 31 táblázatot tartalmaz, amelyek segítik a megértést. A dolgozat struktúrája logikus, viszont érdemes lett volna több fő fejezetre és kevesebb alfejezetre tagolni a dolgozatot. Ezen felül hiányoltam a disszertációk esetében szokásos bevezető fejezetet, ahol röviden bemutatásra kerül a vizsgált téma és a kontextus, a problémafelvetések, a kutatási célok és kérdések, a kutatás jelentősége, valamint a dolgozat felépítése.

Az 1. fejezet a szakirodalmi áttekintést foglalja magában. Az irodalomkutatás széles körű, színvonala megfelelő. Tartalmazza a témával kapcsolatos fontosabb előzményeket, definíciókat, és felveti a szükséges kérdéseket. A Jelölt tehát elemző módon, kritikailag dolgozta fel a szakirodalmat a célkitűzések megfogalmazásához, az új eredmények bemutatásánál viszont érdemes lett volna jobban összemérni a kidolgozott algoritmusokat a tudomány jelenlegi állásával. Továbbá az irodalomkutatásban néhány példa túlzott részletességgel, kevésbé indokolt számpéldákkal került bemutatásra, ami helyett érdekesebb lett volna a módszerek általános működésére fókuszálni. Az irodalomjegyzék 83 számozott forrást tartalmaz. Dicsérendő, hogy ezek szinte kivétel nélkül angol nyelvű szakcikkek és az elmúlt 10 évből származnak. Érdemes lett volna azonban az új kutatási eredményekhez kapcsolódó témakörök esetében az elmúlt 3-5 évet még alaposabban áttekinteni. Kritikaként fogalmazható meg, hogy a források jelölése nem mindenhol egységes, helyenként zárójelben szerepel a webes források URL címe. Érdemes volna ezeket is áttenni az irodalomjegyzékbe. Emellett a néhány ábránál hiányzik a források megjelölése.

A 2. fejezetben kezdődik az elért eredmények ismertetése egy minta gyártórendszer sematikus modellezésének bemutatásán keresztül. Ebben a fejezetben kapott helyet a mobil robotot fókuszba helyező gyártórendszer modell kidolgozása is, ami az első tézisponthoz kapcsolódik. Három módszer kerül említésre ehhez kapcsolódóan: a diszkrét esemény alapú szimulátorok, a véges állapotú automaták, illetve a Petri-hálók. Érdeemes lett volna részletesebben kifejteni, hogy a három modell közül miért a Petri-hálókra esett a választás. A fejezet második felében a kifejlesztett gyártórendszer modellezési technikához kerülnek bemutatásra különböző esettanulmányok. Ezeknél érdemes lett volna bemutatni, hogy a szállítási idők hogyan határozhatóak meg a robot paramétereiből, és hogy az egyszerűsített modell lehetővé teszi-e a gyorsulások, lassulások, irányváltások okozta időtöbblet figyelembevételét. Továbbá a bemutatott esettanulmányban csak egy fix ciklust jár végig a robot; ilyen esetben talán egyszerű képletek segítségével is kiszámolható volna a ciklusidő. Emellett a mintapéldában a robot kihasználtsága elég alacsony, de nem derül ki, hogy a töltések vagy a szállítási feladatokra való várakozások miatt. A 2.9. fejezetnél a leírásból nem derül ki egyértelműen a genetikus algoritmus szerepe, illetve a kifejlesztett mobil központú gyártórendszer modellel való kapcsolata. A 2. fejezet végén megfogalmazásra került egy újabb tézisponthoz a mobil robot központú gyártórendszer modell alkalmazási lehetőségeivel kapcsolatosan.

A 3. fejezetben kerül bemutatásra a mobil robotok kiválasztásának támogatására kidolgozott szakértői rendszer. Ismertetésre került a robotok kiválasztásához használt követelményjegyzék, amit súlyok alkalmazásával hierarchikus prioritással is el lehet látni. A teszteredmények elemzésénél említésre kerül, hogy „minden egyes új szabály a duplájára növeli a kiértékelés idejét”, ami a számítási komplexitást tekintve rendkívül kritikus, nagyméretű problémák esetén gyakorlatilag használhatatlanná teszi a módszert. Érdeemes lett volna megvizsgálni, hogy ennél az adatbázis megadási módszernél egy döntési fa vagy egy korlátozás programozás alapú megoldás kedvezőbb lehetett-e volna. A 3.6. fejezet esettanulmánya rendkívül vázlatos, ez a rész több részletezést igényelt volna. A 3.8. fejezetben a tulajdonságok két csoportba kerültek besorolásra (haszon, illetve költség jellegű), de bizonyos mutatóknál ez nem fejezi ki feltétlenül a felhasználói igényeket (pl. a szükséges terhelhetőség fellett csak túlméretes lesz a kiválasztott robot).

A 4. fejezetben a kutatás folytatására vonatkozó jövőbeni tervek kerültek összesítésre, míg a disszertáció végén az összefoglalás olvasható. Érdeemes lett volna ezt az utolsó fejezetet is megszámozni.

A kutatás során alkalmazott kísérleti módszerek helyességét a Jelölt igazolta, a levezetések és esettanulmányok alapján ezek mind alkalmasak voltak a megfogalmazott célok eléréséhez. A választott megoldások korszerűek, jól illeszkednek a digitális gyártás és a mesterséges intelligencia gyártásba történő integrálásának trendjeihez. A kidolgozott módszerek konkurens megoldásokkal való összemérésén azonban lehetett volna még erősíteni.

2. Konkrét kérdések és észrevételek

A következőkben néhány kérdést és észrevételt szeretnék a disszertációval kapcsolatosan megfogalmazni.

- 13. oldal: „A kutatásom szempontjából ez a három lépés emelhető ki:” – ezután csak két pont került felsorolásra.
- A (7)-es képlet csak akkor lesz helytálló, ha a minden darab azonos ciklusidővel készül, ezért általában a jó termékek az összes legyártott termék darabszámának arányát szokás figyelembe venni az OEE számításánál.

- A (15) és (16)-os képletek kontextusa zavaros, illetve hiányoznak a mértékegységek.
- A 11-14. ábrák értelmezéséhez érdemes lett volna részletesebb magyarázatot közölni a szövegben.
- Néhány ábra (pl. 15.) nehezen olvasható.
- 65. oldal: „Ezáltal a robotok tulajdonságai megnevezhetők és kezelhetők. Néhány robot tulajdonság: robot maximális sebessége, teherbírása, méretei, elforduláshoz szükséges helye, akkumulátor kapacitás.” – a robot sebesség- és gyorsulásképeit, valamint az elforduláshoz szükséges területet hogyan lehet figyelembe venni a kidolgozott modellkörnyezetben?
- A 66. oldalon felsorolásra kerülnek a lehetséges célfüggvények, de nem kerül említésre talán a legfontosabb, a termelékenység maximalizálása. A gyártórendszer egyébként is a maga teljességében érdemes elemezni, mert pl. a robot kihasználtságát maximalizálni önmagában akár kontraproduktív is lehet, illetve a leggyorsabb robot kiválasztása is csak plusz költségekhez vezethet, ha nem tudja kihasználni ezt a képességét az adott környezetben.
- A vizsgált mobilrobotok a valóságban is csak egymásra merőleges tengelyek mentén tudnak mozogni? Ha nem, akkor hogyan befolyásolja ez a mozgási idők számítását?
- Bizonyos terminológiáknál a nagy kezdőbetű a megszokott (pl. Python, Ipar 4.0, stb.).
- A 71. oldalon külön változóként szerepel az „A pont távolsága a B-től” és a „B pont távolsága az A-tól”. Ha ezek eltérő útvonalakat jelölnek, azt érdemes lett volna részletezni. Továbbá a mozgási idők számításánál sem világos, hogy milyen útvonalak és milyen sebességfüggvények kerültek figyelembevételre.
- 21. ábra: nehezen áttekinthető, érdemesebb lett volna más diagramtípust választani az oszlopdiagram helyett, és a táblázattal való összekapcsolása is nehezíti a megértést. Továbbá a nagy kapacitású akkumulátorok rendre rosszul teljesítettek alacsony termékszám esetén, vélhetően azért, mert töltéssel indult a szimuláció. Ez mennyire tekinthető életszerűnek?
- 75. oldal: „Szintén leolvasható, hogy a 10000-es kapacitás esetén alacsony csomagszám mellett a magas töltési idő miatt túl alacsony a kihasználtság, viszont magasabb csomagszámok esetén is csak minimális növekedés érhető el az akku 10x-es méretének ellenére is.” – a magas töltési idő mellett a kiállások száma is csökken, ezért a töltési és az aktív idő arányát volna érdemes vizsgálni.
- 75. oldal: „Az időegységet úgy értelmezzük, hogy 5 másodperc lesz 1 időegység. Ez pont elég arra, hogy valami egyszerűbb folyamat végbe menjen (pl.: dokkolás, munkadarab felvétel, 2D kód olvasás stb.), ugyanakkor jellemzően ennek többszöröseivel számolhatunk az egyes folyamatok idejére.” - A diszkrét esemény szimulációban (Discrete Event Simulation, DES) az idő nem folyamatosan, hanem ugrásszerűen halad előre – csak akkor „mozdul előre” az idő, amikor egy esemény bekövetkezik. Nem lett volna kedvezőbb ebben az esetben is ezt a megközelítést alkalmazni?
- 76. oldal: „Amennyiben az akkumulátorkapacitás egy küszöb érték alatt van, akkor szükséges a töltés, és a robot a töltő pontra megy, ahonnan töltés után visszatér az alapanyag raktárba. Ha nem szükséges a töltés akkor az alapanyag raktárba megy a robot.” – nem érdemes megfontolni a rövidebb töltési ciklusok alkalmazását? A végrehajtandó feladatok függvényében így optimalizálni lehetne a robot kiállításait is.

- 77. oldal: az optimalizálási feladatot jobban kellett volna specifikálni, hiányoznak ugyanis az optimalizálási korlátok, ami nélkül az gépek egymástól való távolságának optimuma nulla lenne.
- 77. oldal: „Ezekből megállapítható, hogy a CD termék gyártása nem érzékeny az RS-A távolság változására” – ez triviális, a vizsgált változó nem szerepel a célfüggvényben.
- A 24. ábra nehezen áttekinthető, érdemesebb lett volna más diagramtípust választani.
- 78. oldal: „Harmadik esettanulmányként írtam egy programot, amivel az ABCD távolságokat lehet genetikusan algoritmusmal kiszámoltatni” – nem összetévesztendő a „kiszámoltatás” és az „optimalizálás”.
- A 2.9. fejezetben zavaros a genetikusan algoritmus szerepe és alkalmazásának célja. További kérdés, ha a két program csak a „kiértékelő függvényben tér el”, akkor miért volt ekkora eltérés a GA eredményeinél. A két kiértékelő függvény megfelelőségét és konzisztenciáját előzetesen igazolni kellett volna. Ezen túlmenően a GA 3-4 generációt követő leállása korai konvergenciát feltételez, ami a GA paraméterek és operátorok újragondolását szükségelteti.
- 79. oldal: „Nagyobb egyedszámot és kisebb populáció nagyságot választva” – az egyedszám és a populáció mérete ugyanazt a fogalmat jelöli.
- 81. oldal: „a mobil robot központú gyártórendszer modellel felírt kiértékelő függvény 10 generáció alatt eljuttatta a genetikusan algoritmus egyedét az optimális megoldáshoz” – a generációk száma függ a problémától és a véletlentől is, általános érvényű kijelentést ebből nehezen lehet megfogalmazni.
- 81. oldal: „Harmadszor: a szimulációba később be lehet vinni a valós körülményeket jobban közelítő elemeket is. Ezeket valószínűségi változókkal lehet kezelni, ami által lehetővé válik pl.: egyes robot típusok meghibásodásának valószínűségét a modell részévé tenni. Akár az elakadásokat, operátori segítséget is be lehet így vinni.” – a szimulációs megközelítés erősségét épp ezen változók figyelembevétele jelenti. Enélkül elegendő volna egyetlen periódusra analitikusan kiszámítani az időket, ami utána ciklikusan ismétlődik.
- 81. oldal: „A futási idők egyes gyártott darabszám esetében, rendre: 100.020 darab/23,9 másodperc; 1.000.020 darab /228,3 másodperc; 20.020 darab /4,59 másodperc; 504.020 darab /47,16 másodperc; 5.040.020 darab /533,54 másodperc.” – mi okozza az egy darabra eső szimulációs idők ilyen mértékű szórását?
- 89. oldal: „Másik lehetőségként mivel a számértékekhez logikai értékeket kell rendelni, megfelelően csoportosítani lehet az egyes értékeket, jelen esetben három csoportba.” – ez mennyire befolyásolhatja a kiválasztás optimalitását?
- 91. oldal: „Minden egyes új szabály a duplájára növeli a kiértékelés idejét, amit a programmal elvégzett mérési eredmények vissza is igazolnak, így 24 szabály esetén 31,55 sec míg 23 esetén 15,66.” – az exponenciális számítási komplexitás rendkívül kritikus, ez a gyakorlatban szinte használhatatlanná teszi az algoritmus alkalmazását közepes méretű feladatok esetén is.
- 91. oldal: „A tesztek a kiértékelési módszer egyszerűsége miatt viszonylag kevés szabállyal történtek.” – az $O(2^n)$ számítási komplexitás épp az ellenkezőjét sugallja.
- 23. táblázat: érdemes lett volna a mértékegységeket is feltüntetni.

- 100. oldal: Az adatbázis bővítése megváltoztatta a korábbi elemek megfelelőségének sorrendjét is. Ez alapvetően kerülendő tulajdonság hiszen az adatbázis monotonitásának hiánya megkérdőjelezi a lokális döntések végrehajthatóságát.

3. Tézisek értékelése

A jelölt három tézispontban foglalta össze az elért új tudományos eredményeket:

- **1. Tézis:** Alkottam egy új modellezési módszert, amely a mobil robotot a gyártórendszerrel leválasztva képes kezelni. Ez a modell egy 10 állapottal és 8 átmenettel felrajzolt Petri-háló, amelyben a mobil robot szempontjából a gyártórendszer szükséges részei vannak megragadva, amelyek a következők: honnan, mit (fizikai méretek, súly, darabszám) és hova kell szállítani, milyen útvonalon, mekkora távolságra, hogyan tudja felvenni és lerakni a robot, és mekkora az akkumulátor töltés csökkenése a szállítási feladat hatására. A Petrihálós modellt az akkumulátor kapacitás teszi korlátossá, minden állapot elérhető, és holtponmentes. Az új módszer neve a mobil robot központú gyártórendszer modell.

A Jelölt egy újfajta modellezési módszert dolgozott ki a mobilrobotokat alkalmazó gyártórendszerek leírására, amelynek létjogosultságát alkalmazási példákkal is tudta igazolni, ezért a tézis új tudományos eredmények értékelhető. Megjegyzések: a „milyen útvonalon” paraméter definiálása után a „mekkora távolságra” már redundánsnak tűnik, továbbá a „hogyan tudja felvenni és lerakni” tulajdonság nincs specifikálva.

- **2. Tézis:**

A) A mobil robot központú gyártórendszer szemléletét felhasználva igazoltam, hogy egy egyirányú, két pont közötti szállítási feladatra a robot akkumulátor kapacitása két nagyságrendet is átölelő elméleti határok között vizsgálható, és az ideális méret a feladat függvényében erőforráshatékonyan meghatározható, tehát a módszer jól skálázható

B) Igazoltam, hogy a mobil robot központú gyártórendszer modellel felírható olyan számítási modell, amely magasabb szintű optimálási algoritmusok kiértékelő függvényeként használható. Az elvégzett esettanulmányban a genetikus algoritmus egyedeit kiértékelő fitness függvényként való felhasználás a valós gyártási folyamatokat veszi figyelembe és így ad jellemző paramétert, ami emiatt a kísérletek alapján 10 generáció alatt elérte az optimális értéket.

A tézisben a kidolgozott új gyártórendszer gyakorlati alkalmazásának fontos alkalmazásai kerültek megfogalmazásra, ezért ez a pont is elfogadható új tudományos eredményként. Megjegyzések: a „valós gyártási folyamatokat veszi figyelembe” megfogalmazás nehezen értelmezhető, hiszen az összes számítás a kifejlesztett modellen alapult, nem a valós gyártási folyamatból közvetlen származtatott adatokon, illetve a genetikus algoritmusoknál a 10 generáció utáni leállás korainak tűnik, és ez egyébként is erősen függ a vizsgált probléma adottságaitól.

- **3. Tézis:** Kidolgoztam egy szakértői rendszeren alapuló döntéstámogató keretrendszert ipari mobil robotok gyártórendszerbe történő integrálására. A módszer elsőként egyesíti a robotok adatlapjából származó formális paramétereket, a humán szakértők gyakorlati tudását és a korábbi gyártórendszerekből származó működési jellemzőket. A módszer újdonsága, hogy a mobil robot kiválasztása nem kizárólag technikai specifikációkra, hanem tapasztalati tudásra és a gyártási környezet szakértői ismeretére is épül.

A) Létrehoztam egy tudásbázis-építési módszertant, amely logikai reprezentáció (ítéletlogika, fuzzy megközelítés, CLIPS keretrendszer) segítségével teszi lehetővé a mobil robotok jellemzőinek és a gyártórendszerek igényeinek összehangolását. Az eljárás bizonyítottan skálázható: nagyszámú (100 feletti) robot és több tucat jellemző együttes kezelésére is alkalmas, miközben a szakértői tudást integrált formában képes reprezentálni és feldolgozni.

B) A szakértői rendszer döntési eredményeit többcélú optimalizációval (VIKOR módszer) egészítettem ki, amely rangsorolást biztosít az előszűrés során kiválasztott alternatívák között. A kutatás igazolta, hogy a kombinált módszer képes a mobil robotok közül objektív és megalapozott sorrendet kialakítani, miközben lehetőséget ad a szakértői korrekcióra is. Ezáltal a rendszer a gyártórendszerekben történő robotintegrációhoz megbízható és gyakorlati döntéstámogatást nyújt.

A tézis a disszertáció fő eredményét, a kifejlesztett döntéstámogató szakértői rendszert ismerteti. A szakértői rendszer egy olyan területen kínál intelligens támogatást, amire korábban még nem létezett megoldás, így a tézis új tudományos eredménynek tekinthető. Megjegyzések: a fuzzy megközelítés csak említés szintjén jelent meg a dolgozatban, ennek vizsgálata még további munkát igényel, továbbá a vizsgált esettanulmányban 101 robot és 19 jellemző került megadásra, így a „nagyszámú (100 feletti) robot” peremfeltétel épphogy teljesül, a „több tucat jellemző” peremfeltétel pedig egyelőre nem került igazolásra.

4. Kérdések

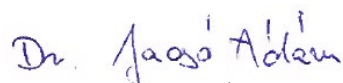
A munkahelyi vitán az alábbi kérdéseket javaslom feltenni a Jelöltnek:

- Hogyan vehető figyelembe a kifejlesztett Petri-hálós gyártórendszer modellnél a több robot mozgása közötti interferencia, valamint a meghibásodások és karbantartások miatti leállások hatása?
- Milyen megoldásokat tudna javasolni a kifejlesztett szakértői rendszer számítási komplexitásának csökkentésére?

5. Összefoglalás

A dolgozat témája megfelelő, a disszertáció a terjedelmi és formai követelményeket egyaránt kielégíti. Kidolgozásának színvonala megfelel az elvárásoknak. A munkahelyi vitát megelőzően szintén bírálóként vettem részt, és az akkor általam kifogásolt részeket a jelölt lelkiismeretesen átdolgozta és javította. Véleményem szerint a tézispontok új tudományos eredményeknek tekinthetők. Oponensi bírálatom összefoglalásaként megállapítom, hogy **az Értekezést elfogadásra javaslom!**

Budapest, 2025. 11. 03.



Dr. Jászó Ádám
adjunktus, BME – GTT