

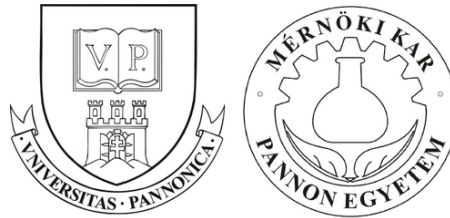
A PhD értekezés tézisei

**Gépi tanulás alapú Ipar 4.0 megoldások fejlesztése
szerszámmenedzsment támogatása érdekében**

Darányi András Pál

Pannon Egyetem
Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola

Témavezetők
Ruppert Tamás PhD., Abonyi János DSc.



Rendszermérnöki Intézeti Tanszék

Veszprém

2025

Téma bemutatása

A rugalmas gyártási rendszerek többfunkciós gépeket és különféle szerszámokat használnak, hogy biztosítsák a termelésre vonatkozó rugalmasságukat. Szerszámok sokaságát igénylik, melyek elhelyezkedése folyamatosan változik. Ezért jelentős kihívást jelent biztosítani, hogy a megfelelő szerszám a megfelelő időben a megfelelő helyen legyen. A szerszámkezelés összetett feladat, amelynek számos kölcsönös függőséget, korlátozást és sztochasztikus folyamatot kell kezelnie. Ide tartozik a szerszámok elosztása a különböző gépek vagy feladatok között. A szerszámok működőképességének fenntartásához megfelelő karbantartási tervet kell kidolgozni. A gyártási folyamatok megértésének érdekében a szerszámokat nyomon kell követni és történetüket dokumentálni kell. A hagyományos szerszámgazdálkodás nagymértékben támaszkodik a kézi folyamatokra, és nem kellően dokumentált, ami hatékonyságtalansághoz és költségnövekedéshez vezet. Az Ipar 4.0 megjelenése új lehetőségeket teremtett az adatvezérelt döntéshozatal számára, lehetővé téve a gyártók számára, hogy a gépi tanulást és a digitalizációt kihasználva minimalizálják az állásidőt, optimalizálják az erőforrás-elosztást és növeljék a termelékenységet. A hatékony szerszámgazdálkodás olyan összetett matematikai algoritmusokat foglal magában, amelyek modellezik a gépek, szerszámok és feladatok közötti bonyolult függőségeket. A gyártási folyamatok sztochasztikus jellege, a szerszámok elhasználódása és a folyamatosan változó termelési igények miatt a tervezés és a tervezés rendkívül nehéz, és az optimális megoldások biztosítása olyan kihívást jelentő feladat, amelyben az egyszerű, adatszegény módszerek gyakran alulmaradnak. A fejlett és adatvezérelt valószínűségi modellezés, valamint a heurisztikus és metaheurisztikus optimalizálási technikák lehetővé teszik a robusztus, skálázható megoldások létrehozását, amelyek alkalmazkodnak a valós idejű termelési korlátokhoz. Ezek a matematikai keretek elengedhetetlenek a hatékony működéshez, az erőforrások elosztásának optimalizálásához és a működési kockázatok minimalizálásához, biztosítva, hogy a modern gyártórendszerek versenyképesek maradjanak az Ipar 4.0 környezetben.

Célkitűzések

A kutatás elsődleges célja a hatékonyságot növelő és a működési költségeket csökkentő, adatvezérelt Ipar 4.0 megoldások kidolgozása a szerszámgazdálkodáshoz. A konkrét célok a következők:

- Egy hatékony és skálázható szerszámkiosztás-optimalizálási módszer kifejlesztése a szerszámcsere miatti állásidő csökkentése érdekében.
- Olyan komplex felügyeleti eljárás kifejlesztése, amely képes megbízható információkat kinyerni a szerszámkihasználtságról és feltárni a gyártási terület releváns helyeit egy bizonytalan gyártási területről származó zajos adatokból.
- Olyan prediktív, kockázatalapú karbantartás-optimalizálási módszer kifejlesztése, amely a karbantartási feladatokat az ingadozó termelésnek megfelelően ütemezi és összehangolja.

-
- E módszertanok alkalmazhatóságának bemutatása ipari esettanulmányokon vagy ésszerű, reális, szintetizált példákon keresztül.

Módszertan

A kutatási módszertan három fő részkutatás köré épül, amelyek mindegyike az eszközkezelés egy-egy kritikus aspektusával foglalkozik:

Szerszám allokáció

A javasolt szerszám allokációs módszertan a csoportosítási technológián alapul. A termékeket a szerszámigényük hasonlósága alapján kerülnek csoportosításra, figyelembe véve a szerszámtárolók kapacitását is. Ezt a csoportosítási problémát hierarchikus klaszterezési eljárásként van formalizálva és megoldva, ahol a két célkitűzést - a csoportok szerszámigénye a lehető legjobban hasonlítson egymáshoz, hogy csökkentsük az átállásokat, és a csoportok mérete a lehető legkisebb legyen, hogy elkerüljük a kapacitás túllépését - könnyen értelmezhető heurisztikus szabályok segítségével vesszük figyelembe. Ez a heurisztikus termékcsoportosítási technika az optimumot megközelítő, fizibilis megoldást nyújt, miközben számítási igénye alacsony, ami alkalmassá teszi ipari alkalmazásokra. Alkalmazhatóságának bizonyítására a javasolt többcélú hierarchikus módszert a kapott megoldás jósága és a számítási igény szempontjából összehasonlítottuk egy ugyanezt a problémát megoldó lineáris programozási módszerrel.

Szerszám kihasználtság monitoring

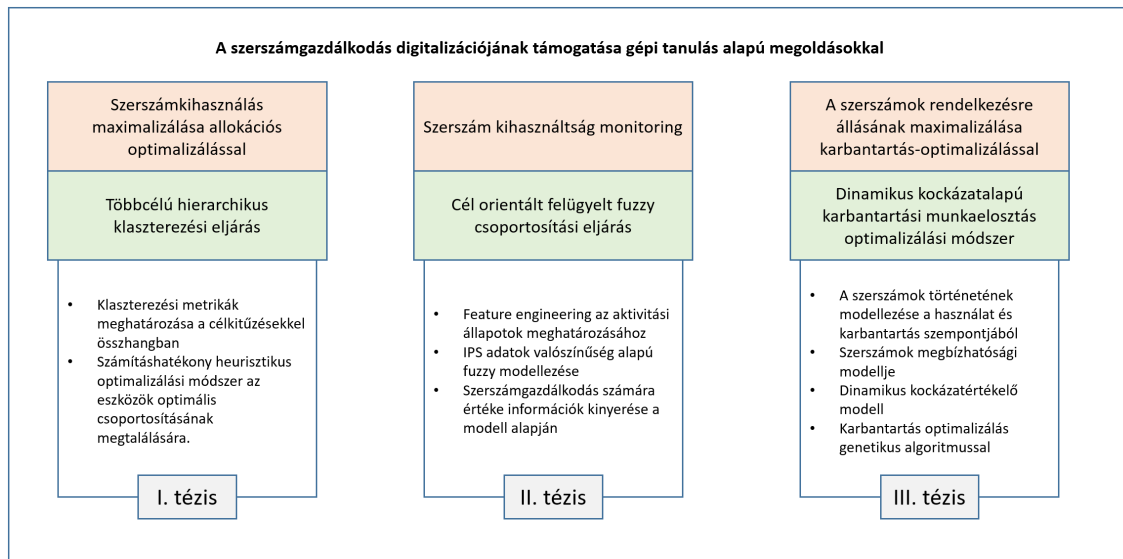
A javasolt kihasználtság monitoring módszer felügyelt fuzzy klaszterezési technikát használ, mellyel a szerszámok zajos pozíció adataira épít valószínűségi modellt. A nyers adatok feldolgozásával informatív jellemzők nyerhetők a szerszámok térbeli eloszlására és aktivitására vonatkozóan. A módszer alapja egy valószínűségi modell, nevezetesen a Gauss-keverék modell, ahol elemi normális eloszlásokat illesztünk a szerszámadatakra. A térbeli és aktivitási jellemzők felhasználásával a kapott elemi normális eloszlások olyan adatklasztereket képviselnek, ahol a térbeli közelség és a funkcionális hasonlóság valószínűsége maximalizálódik. A modell fő érdeme, hogy azt a valószínűséget mondja meg, hogy egy adott szerszámot egy adott helyen, egy adott aktivitási állapotban találunk, amely értelmezhető az adott eszköz adott helyen vett kihasználtságaként. A mögöttes valószínűségi modellt fuzzy logikával kombináltam, hogy könnyen értelmezhető szabályokat legyenek képezhetők a paraméter identifikáció során. A módszer ipari adatokon van demonstrálva.

Kockázatalapú szerszámkarbantartás

A kifejlesztett kockázatalapú szerszámkarbantartás-optimalizálási módszer célja, hogy a különböző szerszámokat úgy rendelje az alkalmi karbantartási ablakokhoz, hogy a rendszert érintő kockázatok a teljes tervezési horizonton minimálisak legyenek. Egy effektív üzemidő-képletet dolgoztam ki, amely figyelembe veszi a szerszámok üzemidejének előzményeit és a karbantartási tevékenységek hatását. A meghibásodás valószínűségét a Weibull Gyorsított Meghibásodási Idő modellel modellezem, amely a szerszám megbízhatóságát az üzemidő és a változó üzemelési körülmények függvényében írja le. A meghibásodások és a karbantartási tevékenységek következményeinek

számszerűsítéséhez különböző költségeket és termelési értékeket is figyelembe vesz a modell. Ezek a valószínűségek és pénzügyi értékek képezik a kockázatértékelési modell bemenetét, amely tartalmaz elégtelen és a túlzott karbantartás kockázatára vonatkozó tagokat is, így a túl- és alul-karbantartás közötti egyensúly megtalálására törekszik. A genetikus algoritmus segítségével meg lehet találni azt a karbantartási tervet, amely a legkisebb kockázattal jár a rendszerre nézve. A kockázati modellt és az azon alapuló karbantartás-optimalizálást egy szintetikus példán keresztül mutatom be.

Grafikus összefoglalásként a 1. ábra mutatja a kutatásom tárgyalt elméleti és gyakorlati részeit.



1. ábra. A szakdolgozat eredményeinek grafikus összefoglalása. A narancssárga dobozok a problémás területeket, a zöld dobozok pedig az ezekre kidolgozott megoldásokat jelölik. A szürke dobozok jelzik, hogy melyik tézis (lásd alább) melyik területhez tartozik.

Az értekezés felépítése

Az értekezés öt fejezetre tagolódik. Az első fejezet bemutatja a szerszámkezelés témakörét. Tárgyalja a szerszámkezelés kihívásait és digitális átalakulását, illetve a javasolt keretrendszert. A következő három fejezet a szerszámgyártás három fent említett aspektusával, nevezetesen a szerszám allokációval, a szerszámhasználat nyomon követésével és a szerszámkarbantartással kapcsolatos kutatásokat ismerteti. Ezek a fejezetek ugyanúgy épülnek fel: egy rövid bevezető után a módszer matematikai megfogalmazása kerül bemutatásra, majd egy demonstrációs tanulmány következik. Az utolsó fejezet összefoglalja az eredményeket, és néhány záró megjegyzést tesz.

Eredmények

A kutatásom tudományos megállapításai három tézispontban foglalhatók össze:

Tézis I.

Heurisztikus, többcélú optimalizáláson alapuló csoportosítási módszert dolgoztam ki szerszám allokációs problémára, mely segítségével fizibilis megoldás található, mely teljes optimalizációs algoritmus megoldását közelítő eredményt ad, alacsonyabb számítási igény mellett [1].

A gépek korlátozott szerszámtároló kapacitása miatt az időigényes szerszámcserek a berendezések nem hatékony kihasználását eredményezik. A szerszámok gépekhez történő kiosztásának optimalizálásával egy olyan módszert fejlesztettem ki, amely minimalizálja a szerszámcserek számát. A javasolt algoritmus hatékony, mivel a szerszámkiosztási feladatot többcélú hierarchikus klaszterezési problémaként közelíti meg, ahol a termékek a szerszámigények hasonlósága alapján kerülnek csoportosításra. Az agglomeratív klaszterezési folyamat során két célt követünk: az eredményül kapott termékcsoporthoz mérete a lehető legkisebb legyen, és a csoporttagok szerszámigénye közötti átfedés a lehető legnagyobb legyen. A célorientált agglomeratív klaszterezési algoritmus újdonsága, hogy az egyesített klaszterek Pareto-optimalis kiválasztásán alapul. A szerszámkiosztási problémát egy binpacking optimalizálási feladatot optimalizálási problémaként is megfogalmaztam, és a kapcsolódó lineáris programozás eredményeit használtuk referenciaértékként. Az összehasonlítás rávilágított arra, hogy a javasolt módszer alacsony számítási igény mellett fizibilis megoldást nyújt nagyméretű ipari problémákra.

Tézis II.

Kimutattam, hogy pozíció adatokra támaszkodva, csoportosító algoritmusok segítségével feltárt információk alapján helyalapú teljesítmény- és kihasználtság monitoring valósítható meg [2].

A beltéri helymeghatározó rendszerek lehetővé teszik a szerszámok helyének valós idejű nyomon követését. A szerszámok kihasználtsága a raktározási és gyártási területek pozícióadatai alapján kiszámítható. A helyzetmérések bizonytalansága miatt a szerszámok állapotának becslése problémás, ha a vizsgált zónák közötti távolság kisebb, mint a becslési hiba. Ennek kezelésére egy célorientált felügyelt fuzzy klaszterező algoritmust javasoltam, amely a szerszámok aktivitási állapotát is felhasználja, amely segítségével az algoritmus egyszerre maximalizálja a térbeli eloszlás valószínűségét és egy adott aktivitási állapot klaszterben való előfordulásának valószínűségét. Az adatpontok súlyozásával a kapcsolódó állapotokban és pozíciókban eltöltött idő alapján értékes információk nyerhetők ki. Az így kapott klaszterek a gyár releváns helyszíneit reprezentálják. A klaszterek kategorizálása is lehetővé válik különböző aktivitási állapotok időbeli valószínűségei alapján. Annak a valószínűsége, hogy egy szerszámot aktív állapotban találunk, értelmezhető annak kihasználtságaként, amely általánosságban és adott helyre vonatkozóan is kiszámítható.

Tézis III.

Karbantartás-optimalizálási módszertant dolgoztam ki, amely változó gyártási körülmények között képes optimalizálni a karbantartást egy olyan kockázatértékelési modellel, amely figyelembe veszi a dinamikus meghibásodási valószínűséget és a kritikusságot.

A rugalmas gyártórendszerek olyan gyorsan változó környezetet jelentenek, amelyben a gyártáshoz számos gyártószerszámot alkalmaznak, amelyek között többszörös kölcsönös függőség van. Ennek eredményeként bármelyik eszköz nem megfelelő állapota jelentős kockázatot jelenthet a rendszer teljesítményére és rendelkezésre állására. A kockázatalapú karbantartási megközelítések mind a túl-, mind az alulkarbantartás kockázatainak minimalizálására törekszenek. A hagyományos módszerek feltételezik, hogy a felmért kockázatok állandóak, ami sok esetben nem tükrözi a rugalmas gyártórendszerek dinamikus jellegét. Egyrészt a kedvezőtlen események valószínűsége nő a szerszámok elhasználódása miatt, amely az üzemidő és a működési körülmények függvénye, másrészt ezen események következményeinek súlyossága az aktuális gyártási ütemtervtől függ. Egy optimalizációs algoritmust javaslok a karbantartási munkák optimális kiválasztására és elosztására, amely minimalizálja a teljes kockázatot. A célfüggvény tartalmazza a kedvezőtlen események valószínűségét, amelyet szerszámmegbízhatósági modellekből származtatok, valamint az ezen események következtében kieső termelés, túlkarbantartás és alulkarbantartás költségeit, figyelembe véve a rendszerre és az aktuális gyártási megbízásokra vonatkozó információkat. A legjobb megoldás megtalálására genetikus algoritmust használnak, ahol a fitnessfüggvény a kockázatértékelési függvényen alapul.

Hivatkozások

- [1] A. Darányi, T. Czvetkó, A. Kummer, T. Ruppert, J. Abonyi, Multi-objective hierarchical clustering for tool assignment, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 42 (2023) 47–54.
- [2] A. Darányi, G. Dörgő, T. Ruppert, J. Abonyi, Processing indoor positioning data by goal-oriented supervised fuzzy clustering for tool management, *Journal of Manufacturing Systems* 63 (2022) 15–22.