

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**IPAR 4.0 ÉS 5.0 MEGOLDÁSOK FEJLESZTÉSE
ONTOLÓGIÁK ALAPJÁN - MODELLEZÉS ÉS
OPTIMALIZÁLÁS**

Nagy László

Pannon Egyetem
Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok
Doktori Iskola

Témavezetők:
Dr. Abonyi János
Dr. Ruppert Tamás



Folyamatmérnöki Intézeti Tanszék
Veszprém
2023

1. Bevezetés és célkitűzések

A kutatás célja hatékony elemzési és optimalizálási módszerek fejlesztése előzetesen strukturált, gráf alapú adatok felhasználásával, az Ipar 4.0 és Ipar 5.0 megoldások számára. Az Ipar 4.0 főképp a széles körű digitalizációt célozza, míg egy Ipar 5.0 környezetben az innovatív technológiák és az emberi szereplők integrálása a cél, ami előrébb helyezi az értékközpontú megközelítést, mint technológia-központút. További cél a horizontális és vertikális integráció támogatása az iparban, mely során az ERP (Enterprise Resource Planning) és MES (Manufacturing Execution System) rendszerek átláthatósága és szabványosítása, valamint az adatokhoz való könnyebb hozzáférés a cél.

A megfelelő információkezelés kritikus fontosságú a gyártási folyamatok fejlesztése szempontjából. Ezen motivációt követve a disszertáció kiemeli, hogy a szemantikus technológiák lehetővé teszik a hálózat alapú folyamatmodellek adaptációját az ipari szabványokkal, valamint a folyamatadatok gráf alapú ábrázolással történő kontextualizálását. Ezzel lehetővé téve az interoperabilitást és újrafelhasználhatóságot, illetve segíti a különböző folyamatelemzési és optimalizálási módszereket. Továbbá, bemutatásra kerül egy ontológiaalapú keretrendszer az Ipar 4.0 és 5.0 megoldások fejlesztéséhez.

A disszertáció első pillére a folyamatmodellezés, mellyel egy komplex termelési vagy Ipar 4.0 alkalmazásból hálózat alapú reprezentáció hozható létre, ontológiák és szabványok felhasználásával. Valamint a második, a termelési folyamat céljainak és korlátainak teljesítése, többretegű elemzéssel az optimális allokáció érdekében, valamint optimalizációs algoritmusok fejlesztése a többszemponutú termelési optimalizáláshoz.

Megvizsgáltam, hogy a szemantikus technológiák és ontológiák hogyan alkalmazhatók a modern iparban, és hogy egy ontológia alapú rendszerreprezentáció hogyan szolgálhat alapjául a termelési folyamatok hatékony, strukturált elemzésének. Továbbá azt is tanulmányoztam, hogy a tudásgráfok hogyan alkalmazhatók az emberközpontú gyártás támogatásában. Létrehoztam egy emberközpontú tudásgráf keretrendszert, ami ontológiákat és szabványokat adaptál, és képes modellezni az operátorral kapcsolatos tényezőket, például a mozgások megfigyelését, a munkakörülményeket vagy a robotokkal való kollaborációt.

Az optimalizálás terén három különböző aspektust tanulmányoztam. Először a gráf alapú folyamatmodellezés és a többcélú optimalizálás integrálásának lehetőségét vizsgáltam, a gyártósor kiegyenlítési probléma megoldására. A részben kézi összeszerelő sorok szekvenciája és sorkiegyenlítése kihívást jelentő feladat, tekintve a folyamat összetettségét és bizonytalanságát. Ezek mellett azt is megvizsgáltam, hogy a közösségek detektálása és klasztere-

zése hogyan végezhető hatékonyan nagyméretű, gráf alapú adathalmazok, például tudásgráfok esetében, amelyek megfelelő klaszterező algoritmusokat igényelnek. A bemutatott módszer a gráf alapú modellek és a hatékony szegmentálási és optimalizálási algoritmusok kombinálásán alapszik, így egy olyan eszköztár fejleszthető, ami képes támogatni az Ipar 4.0 megoldásokat. Végül azt vizsgáltam, hogy a hipergráf alapú modellek hogyan használhatók fel a kollaboratív gyártás elemzésére. A hipergráfok hatékony eszközt nyújtanak az összetett gyártási folyamatok leírására és a támogató vagy egyidejű ember-gép együttműködés eseteinek elemzésére. Mivel egy gyártócella identifikálható egy hipergráf részeként, az intelligens gyártásban a cella kialakítás területén is alkalmazható, többdimenziós elrendezési diagramok létrehozására és a belső mechanizmus elemzésére.

2. Kísérleti eszközök és módszerek

Kutatásom során új szemantika alapú modellezési és elemzési módszereket dolgoztam ki, egy ontológiát egy komplex gyártási folyamathoz, valamint egy tudásgráfot az emberközpontú, kollaboratív gyártáshoz. Emellett gráfhálózat-alapú optimalizálási módszereket dolgoztam ki, a gyártósort kiegyenlítési probléma megoldására, a hálózatokban történő közösségek detektálására és a kollaboratív gyártás vizsgálatára, hipergráfok felhasználásával. A módszerek reprodukálhatóságának és szisztematikus hasznosításának biztosítása érdekében:

- a szemantikus modellezéshez és az adatlekérdezéshez nyílt forráskódú eszközöket használtam, mint a Protégé és a GraphDB;
- a gyártási folyamat elemzések egy összetett kábelkorbács gyártási példán alapszanak;
- az algoritmusok Matlab-, illetve Python-környezetben kerültek implementálva.

3. Tézisek

1. **Kiemeltem és igazoltam egy kábelkorbács összeszerelési folyamaton, hogy az ontológia alapú modellezés felhasználható strukturált és kontextusba helyezett modellek létrehozására, amelyek támogatják a gyártási folyamatok fejlesztését.**

- 1.1. Kidolgoztam egy ontológia alapú keretrendszert az ipari folyamatok elemzésére, RDF gráf adatlekérdezések segítségével. A javasolt keretrendszer hatékonyan integrálja az ipari szabványokon és folyamatadatokon alapuló információkat, ami előnyös az adatok feltérképezése és rendszerelemzés szempontjából.
- 1.2. Az ontológia-alapú folyamatmodellezés és adatelemzés alkalmazhatóságát egy kábelkorbács-összeszerelésen alapuló esettanulmányon mutattam be, ahol szemantikus modellezést és adatlekérés-elemzést végeztem.

Vonatkozó publikáció: Nagy László, Ruppert Tamás, Abonyi János: *On-tology-Based Analysis of Manufacturing Processes: Lessons Learned from the Case Study of Wire Harness Production*, 2021, Hindawi, Complexity [1]

2. **Demonstráltam, hogy egy tudásgráf alapú keretrendszer képes támogatni az emberközpontú, kollaboratív és ergonomikus gyártás fejlesztését az Ipar 5.0 megoldásokban.**

- 2.1. Kidolgoztam egy emberközpontú tudásgráf (HCKG) keretrendszert, amely ontológiákat és szabványokat adaptál, és képes modellezni az operátorral kapcsolatos tényezőket, például a mozgások megfigyelését, a munkakörülményeket vagy a robotokkal való kollaborációt. Az operátor által végzett munka kerül fókuszba, beleértve a mozgások, a gépekkel való együttműködés, az ergonómia és egyéb feltételek értékelését.
- 2.2. A keretrendszer egy komplex összeszerelősor-alapú esettanulmányon mutattam be, alkalmazási példákkal az erőforrás-elosztásra és az üzemi dolgozók átfogó támogatására együttműködési és ergonómiai szempontok szerinti. Igazoltam, hogy a tudásgráfok és az ontológia alapú modellek képesek támogatni az emberközpontú gyártást, számos gráf alapú adatlekérés, vizualizáció és adatelemzés bemutatásával.

Vonatkozó publikáció: Nagy László, Ruppert Tamás, Abonyi János: *Human-centered knowledge graph-based design concept for collaborative manufacturing*, 2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA) [2]

3. Egy új, kombinált módszert dolgoztam ki a gyártósor kiegyenlítési probléma megoldására, ami ötvözi az analitikus hierarchikus folyamatot és a többretegű hálózatokat.

- 3.1. A gyártósor kiegyenlítési probléma ábrázolásához bemutattam egy többretegű hálózat alapú módszert, ahol a hálózat rétegei az operátorok készségeit, a tevékenységükhöz szükséges eszközöket, valamint a tevékenységek prioritási korlátjait reprezentálják. A tevékenység-operátor hálózati réteget egy többcélú optimalizációs algoritmus-sal számítottam, ahol a képzettség és eszközöltségeket, valamint a tevékenységek prioritását vettem figyelembe.
- 3.2. A költségek értékelésére és a kritériumok fontosságának számszerűsítésére az analitikus hierarchiafolyamat technikáját alkalmaztam. Ellenőriztem, hogy az optimalizálási probléma megoldható egy többszintű szimulált hűtés típusú algoritmussal, amely hatékonyan kezeli a sorrendiségi korlátozásokat.
- 3.3. A módszer hatékonyságát egy kábelkorbács összeszerelési esettanulmányon mutattam be. Az eredmény alkalmazhatósága összetettebb szerelősorokon alapszik, ahol több tényezőt kell optimalizálni, és megtalálni a feladatok optimális kiosztását az operátorokhoz, törekedve a gyártórendszerek hatékonyságának javítására.

Vonatkozó publikáció: Nagy László, Ruppert Tamás, Abonyi János: *Analytic Hierarchy Process and Multilayer Network-Based Method for Assembly Line Balancing*, 2020, Applied Sciences [3]

4. Kidolgoztam egy hatékony, keresztező gráf él minimalizáláson és szegmentáláson alapuló hálózati közösségetektáló algoritmust, ami megkönnyítheti a gráf alapú elemzést.

- 4.1. Integráltam a baricentrikus szerializáción alapuló klaszterezési és a bottom-up szegmentációs módszereket, hogy hatékony algoritmust kapjak a gráf-hálózatokban található közösségek detektálására. Ezáltal a csomópontok hatékonyan előrendezésre kerülnek a szomszédai alapján a baricentrikus szerializációval. A szegmentáló algoritmus számításigény szempontjából hatékonyabb módon detektál modulokat, mint a leggyakrabban használt Louvain-típusú közösségetektáló algoritmusok.

- 4.2. A fejlesztett módszert más közösségetektáló algoritmusokkal összehasonlítva, benchmark-problémák segítségével ellenőriztem. Az eredmények azt mutatták, hogy a közösségetektálás és a klaszterezés nagyobb, gráf alapú adathalmazok esetén hatékonyabb lehet a kombinált módszerrel, amely képes támogatni az okos gyárak ontológia alapú fejlesztését.

5. Validáltam egy hipergráf alapú módszert a kollaboratív gyártás elemzésére.

- 5.1. Kidolgoztam egy hipergráf alapú elemzési módszert az Ipar 5.0 megoldások tervezéséhez, melynek kritériuma a gyártórendszerek, az operátorok képességeinek és állapotainak, valamint az intelligens térben elhelyezett szenzorok problémaszpecifikus leírása a kollaboratív munka egyidejű megfigyelése érdekében. Kiemeltem, hogy a javasolt módszer képes az emberi és a robot szereplők közötti kollaboráció típusainak felismerésére, és a kollaboratív gyártás során az együttműködő felek kritikus halmazainak szisztematikus elemzésére.
- 5.2. Több alkalmazási példán bemutattam, hogy az így kapott hipergráfok centralitásának és modularitásának vizsgálata képes támogatni az együttműködési és interakciós sémák létrehozását és a gyártási cellák kialakítását. Az eredmények bizonyították, hogy a hipergráf alapú módszer alkalmazható a kollaboratív gyártás vizsgálatára, és támogatja a robusztusság elemzését.

Vonatkozó publikáció: Nagy László, Ruppert Tamás, Löcklin Andreas, Abonyi János: *Hypergraph-based analysis and design of intelligent collaborative manufacturing space*, 2022, Journal of Manufacturing Systems [4]

4. Az eredmények gyakorlati hasznosítása

Az értekezés szisztematikus áttekintést nyújt az Ipar 4.0 alkalmazásokban felhasználható ontológiákról, és kiemeli, hogy az ontológiák alkalmasak a gyártási adatok kezelésére. Az Ipar 5.0 koncepciót követve bemutatásra került, hogy az operátorok monitorozása beépíthető egy komplex tudásgráfba, ami képes támogatni az ergonómikus és kollaboratív gyártást. A kidolgozott módszertanok alkalmazhatóságának alátámasztása érdekében teljeskörűen dokumentált példák kerültek bemutatásra egy kábelkorbács összeszerelés

gyártási folyamatairól. Továbbá, mindhárom gráf alapú optimalizálási módszer széleskörben felhasználható a gyártási problémák kezelésére, köszönhetően a generalizált algoritmusoknak. A folyamatelemzés és az optimalizációs algoritmusok reprodukálható fejlesztésének támogatása érdekében kidolgoztam egy moduláris kábelkorbácsgyártó rendszer ontológia modelljét, valamint egy emberközpontú gyártási környezet tudásgráf reprezentációját.

Nagy László publikációi

2023, Március

Jelenlegi h-index: **2**

Jelenlegi i10-index: **1**

Jelenlegi hivatkozások száma: **17**

Tézisekhez kapcsolódó publikációk

1. L. Nagy, T. Ruppert, and J. Abonyi, „Analytic hierarchy process and multi-layer network-based method for assembly line balancing,” *Applied Sciences*, vol. 10, no. 11, p. 3932, 2020
2. L. Nagy, T. Ruppert, and J. Abonyi, „Ontology-based analysis of manufacturing processes: Lessons learned from the case study of wire harness production,” *Complexity*, vol. 2021, 2021
3. L. Nagy, T. Ruppert, A. Löcklin, and J. Abonyi, „Hypergraph-based analysis and design of intelligent collaborative manufacturing space,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 65, pp. 88–103, 2022
4. L. Nagy, T. Ruppert, and J. Abonyi, „Human-centered knowledge graph-based design concept for collaborative manufacturing,” in *2022 IEEE 27th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pp. 1–8, 2022