

Válasz a bírálói véleményre

Bakon Krisztián Attila

„Solving Industry 4.0 scheduling tasks” című PhD értekezéséhez

Bíráló: Dr. Csendes Tibor, professor emeritus

Dátum: Nagykanizsa, 2026. április 27.

Tisztelettel köszönöm Dr. Csendes Tibor professzor úrnak az értekezésem alapos, támogató és konstruktív bírálatát. Külön köszönöm, hogy a bírálatban kiemelte a kutatási téma gyakorlati és tudományos relevanciáját, a publikációs teljesítményt, az értekezés gondos kivitelezését, valamint azt, hogy a megfogalmazott téziseket elfogadja és támogatja a nyilvános védés megtartását.

Az alábbiakban először a bírálat általános szakmai észrevételeire reagálok, majd válaszolok a védésre feltett kérdésekre.

Válasz az általános észrevételekre

1. Az irodalmi áttekintés terjedelme

Köszönöm a megjegyzést, hogy az irodalmi áttekintés terjedelme az értekezés érdemi, új eredményeket bemutató részeihez képest arányaiban nagyobb. A dolgozat összeállításakor az volt a célom, hogy a gyártásütemezési feladatok tágabb környezetét, különösen a reaktív ütemezés, a bizonytalanságkezelés, a többcélú ütemezés, a közbülső tárolás (intermediate storage) kezelése és az S-gráf alapú módszerek kapcsolatát egységes háttérként mutassam be.

Ezt azért tartottam fontosnak, mert az értekezés több, egymással összefüggő, de eltérő aspektusú problémát kapcsol össze: dinamikusan érkező rendelések kezelését, a már megkezdett ütemezés részleges megőrzését, a határidőktől való eltérés minimalizálását, valamint a köztes tárolási idők figyelembevételét. Az irodalmi áttekintés ezért nem kizárólag előzménybemutatóként, hanem a későbbi modellezési döntések motivációjaként is szolgál.

Elfogadom ugyanakkor a bíráló észrevételét, hogy a terjedelem aránya lehetne tömörebb. A dolgozat végleges szerkezetében az irodalmi áttekintés célja az volt, hogy megfelelően megalapozza a három téziscsoportot, és megmutassa, hogy az értekezésben tárgyalt módszerek hol helyezkednek el a gyártásütemezési és optimalizálási szakirodalomban.

2. Explicit elméleti eredmények hiánya

Köszönöm a bíráló megjegyzését, hogy a dolgozat nem tartalmaz a klasszikus értelemben vett explicit elméleti eredményt. Az értekezés fő célkitűzése elsősorban módszertani és algoritmikus jellegű volt: olyan S-gráf alapú modellezési és megoldási eljárások kidolgozása, amelyek reaktív gyártásütemezési helyzetekben képesek a meglévő ütemezés részleges megőrzésére, az új rendelések beillesztésére, a határidőktől való eltérések csökkentésére és a köztes tárolási idők kezelésére.

A dolgozat tudományos hozzájárulása ezért nem tétel-bizonyítás formájában jelenik meg, hanem új modellezési konstrukciókban, algoritmikus módosításokban és ezek kísérleti igazolásában. Ilyen hozzájárulás például a reaktív ütemezési politikák S-gráf reprezentációja, a már megkezdett műveletek rögzítése zero-wait és release-node típusú gráfmódosításokkal, valamint a due-date és intermediate storage szempontok együttes kezelése.

Egyetértek azzal, hogy a téma lehetőséget adna további formális elméleti eredmények megfogalmazására is, például a keresési tér monoton szűkülésére a különböző reaktív politikák mellett, az alsó korlátok elfogadhatóságára, vagy az S-gráf transzformációk megvalósíthatóságot megőrző tulajdonságaira vonatkozóan. Ezek a kérdések a kutatás természetes folytatási irányát jelentik.

3. A 6. fejezet szerepe

Köszönöm a 6. fejezetre vonatkozó észrevételt. A 6. fejezet valóban eltér az értekezés korábbi részeitől abban az értelemben, hogy nem egy teljeskörűen implementált és tesztelt algoritmust mutat be, hanem egy összetettebb, integrált reaktív ütemezési keretrendszer algoritmikus felépítését és koncepcionális megfontolásait.

A fejezet célja az volt, hogy megmutassa, hogyan kapcsolható össze egyetlen S-gráf alapú keretben a reaktív rendeléskezelés, a due-date optimalizálás, valamint az NIS/UIS típusú intermediate storage kezelés. Ez a rész tehát nem ugyanabban az értelemben kísérleti fejezet, mint a korábbiak, hanem egy következő kutatási lépés algoritmikus alapozása. A 6. fejezetben szereplő eljárások ezért formális algoritmustervek és modellezési elvek, amelyek az értekezés korábbi eredményeire építve jelölik ki az integrált módszer továbbfejlesztési irányát.

Egyetértek a bírálóval abban, hogy ennek a keretnek a teljes implementációja, numerikus tesztelése és elméleti vizsgálata további kutatást igényel. A fejezetet ezért úgy tekintem, mint az értekezésben kidolgozott részproblémák szintézisét és a jövőbeli kutatási irány egyik alapját.

Válaszok a bíráló kérdéseire

1. kérdés

A gyakorlati gyártásütemezési feladatok nagy számításigényét meg lehet-e oldani kvantumszámítással?

A rövid válaszom az, hogy jelenleg a kvantumszámítás önmagában még nem tekinthető általános, ipari méretű gyártásütemezési problémák megoldására kész technológiának, de ígéretes kiegészítő eszköz lehet bizonyos optimalizálási részfeladatokban.

A gyártásütemezési feladatok jelentős része kombinatorikus optimalizálási probléma, ezért természetes módon merül fel a kvantumszámítás, különösen a kvantumos

annealing és a hibrid kvantum-klasszikus megközelítések alkalmazása. Ezek elvileg alkalmasak lehetnek bizonyos diszkrét döntési változókkal rendelkező részproblémák, például gép-hozzárendelési, sorrendezési vagy erőforrás-allokációs részfeladatok kezelésére.

Ugyanakkor a gyakorlati gyártásütemezésben a feladatok általában sok korlátozást tartalmaznak: precedenciafeltételeket, gépkapacitásokat, határidőket, technológiai útvonalakat, tárolási korlátokat, reaktív eseményeket és stabilitási követelményeket. Ezek közvetlen kvantumos leképezése nem triviális. A legtöbb jelenlegi kvantum vagy kvantum-inspirált optimalizálási megközelítés akkor alkalmazható hatékonyabban, ha a problémát speciális bináris vagy kvadratikus formára lehet átalakítani. Ez az átalakítás gyakran jelentős modellnövekedéssel és információvesztéssel járhat.

Ezért a reális irányt jelenleg nem a teljes gyártásütemezési probléma kizárólag kvantumszámítógépen történő megoldásában látom, hanem hibrid módszerekben. Ilyen esetben a klasszikus algoritmus kezeli a gyártási modell szerkezetét, a megvalósíthatósági feltételeket és a reaktív döntéseket, míg egy kvantum vagy kvantum-inspirált komponens bizonyos részproblémák gyorsítására szolgálhat. Például egy branch-and-bound eljárásban elképzelhető, hogy a gép-hozzárendelési vagy sorrendezési döntések egy részét ilyen segédeszközzel vizsgáljuk.

Összességében tehát a kvantumszámítás hosszabb távon ígéretes lehet a gyártásütemezési feladatok bizonyos részproblémáiban, de jelenleg nem váltja ki a klasszikus, problémaszpecifikus ütemezési algoritmusokat. Az értekezésemben vizsgált S-gráf alapú módszerek előnye éppen az, hogy közvetlenül kihasználják a gyártási feladat szerkezetét, a precedenciaviszonyokat és a reaktív politikákat. Egy jövőbeli kutatási irány lehetne ezek hibrid összekapcsolása kvantum-inspirált vagy kvantum-klasszikus optimalizálási komponensekkel.

2. kérdés

Az eddigi ütemezés megszakítása okozhat-e kaotikus hatást? Tehát lehetségesek-e olyan kis változást jelentő véletlen események, amelyek a lehetséges ütemezések nagy részét optimálissá teszik?

A gyártásütemezésben a „kaotikus hatás” kifejezést nem a dinamikus rendszerek matematikai értelemben vett káoszaként használnám, hanem inkább erős érzékenységgként vagy instabilitásként. Ilyen értelemben igen, az ütemezési problémákban előfordulhat, hogy egy kis változás — például egy új rendelés, egy géphiba, egy rövid késés vagy egy határidő módosulása — jelentősen megváltoztatja az optimálisnak tekintett ütemezést.

Ennek oka, hogy az ütemezési feladatok diszkrét, kombinatorikus problémák. Egy-egy kis esemény megváltoztathatja a szűk keresztmetszetet, az aktív korlátokat vagy a gépek közötti terheléeloszlást. Emiatt előfordulhat, hogy az eredetileg optimális ütemezés helyett egy egészen más sorrend vagy gép-hozzárendelés válik

kedvezőbbé. Ez különösen akkor jellemző, ha több ütemezés hasonló célfüggvényértékkel rendelkezik, vagy ha a célfüggvény viszonylag lapos egy nagyobb megoldáshalmazon.

Az is lehetséges, hogy kis véletlen események hatására sok ütemezés közel azonos, vagy akár azonos célfüggvényértéket kap. Ez például akkor fordulhat elő, ha a célfüggvény csak durvább teljesítménymutatót mér, például a makespan értékét, és több eltérő sorrend is ugyanazt a maximális befejezési időt eredményezi. Ilyenkor nem feltétlenül egyetlen optimális ütemezés van, hanem sok alternatív optimum vagy közel optimális megoldás.

Az értekezésben tárgyalt reaktív ütemezési politikák részben éppen ezt a jelenséget kezelik. Az append-only, partial insertion és full rescheduling politikák különböző mértékben engedik meg az eredeti ütemezés megváltoztatását. Az append-only politika például csökkenti az ütemezés instabilitását, mert megőrzi a korábbi sorrendet, míg a full rescheduling nagyobb optimalizálási szabadságot ad, de nagyobb változást okozhat az eredeti tervhez képest.

Ezért a gyakorlati ütemezésben nemcsak az objektív optimum keresése fontos, hanem az ütemezés stabilitása is. Egy ipari környezetben gyakran nem az a legjobb döntés, amely néhány százalékos célfüggvény-javulást ad, ha közben teljesen átrendezi a gyártási tervet. A reaktív politikák célja éppen az, hogy szabályozható kompromisszumot adjanak az optimalitás és a stabilitás között.

3. kérdés

A kutatás mennyiben fed át az olyan vállalatirányítási rendszerek nyújtotta optimalizálással, mint az AIMMS?

Az AIMMS-hez hasonló rendszerek és az értekezésemben bemutatott kutatás között van átfedés, de a céljuk és a szerepük eltérő. Az AIMMS elsősorban általános optimalizálási modellező és döntéstámogató környezet, amelyben különböző matematikai programozási modellek megfogalmazhatók, megoldhatók és vállalati alkalmazásként telepíthetők. Az értekezésem ezzel szemben nem egy általános modellezési platformot mutat be, hanem gyártásütemezési problémákra kidolgozott speciális S-gráf alapú modellezési és algoritmikus módszereket.

Az átfedés abban áll, hogy mindkét megközelítés optimalizálási feladatokat kezel, és mindkettő alkalmazható gyártási, logisztikai vagy erőforrás-allokációs döntések támogatására. Egy AIMMS típusú rendszerben például megfogalmazható lehet egy MILP, CP vagy más matematikai programozási modell egy ütemezési feladatra.

A különbség azonban az, hogy az S-gráf alapú megközelítés közvetlenül a gyártásütemezés szerkezeti sajátosságaira épít. A gráf reprezentálja a technológiai sorrendet, a gép-hozzárendeléseket, az ütemezési íveket és a megvalósíthatósági kapcsolatokat. Az értekezésben bemutatott módszerek emellett reaktív ütemezési politikákat is tartalmaznak: kezelik az új rendelések érkezését, a már megkezdett

műveletek rögzítését, valamint a részleges vagy teljes újraütemezés különböző szintjeit.

Így az AIMMS inkább egy általános implementációs és modellezési környezetként értelmezhető, míg az értekezésemben bemutatott eredmények problémaszpecifikus algoritmikus hozzájárulások. Elvileg elképzelhető, hogy a dolgozatban javasolt modellek vagy azok egyes komponensei egy AIMMS-szerű környezetben is implementálhatók legyenek, de a kutatás újdonsága nem a szoftverkörnyezetben, hanem az S-gráf alapú reaktív ütemezési logikában, a policy-alapú keresési térszűkítésben, valamint a due-date és intermediate storage célok integrált kezelésében található.

4. kérdés

A BMW helikoptert küldött a pár eurós gumicsövekért a makói Continental gyárba, mert a gyártósor állásideje 200 000 euró költséget jelentett volna óránként. A tárgyalta ütemezési számítási idő eltérések a módszerek között mennyire kritikusak ilyen szempontból?

Ilyen ipari környezetben a számítási idő eltérései rendkívül kritikusak lehetnek. Ha egy gyártósor állásideje óránként 200 000 euró veszteséget okoz, akkor ez körülbelül 55,6 euró másodpercenként. Ebben az esetben már néhány perc késedelem is több ezer eurós veszteséget jelenthet. Ez jól mutatja, hogy az ütemezési módszerek gyakorlati értékét nemcsak az általuk előállított célfüggvényérték, hanem a döntéshez szükséges számítási idő is meghatározza.

A reaktív gyártásütemezésben ezért a számítási időnek illeszkednie kell a döntési helyzet időskálájához. Ha egy új rendelés, géphiba vagy ellátási zavar azonnali döntést igényel, akkor nem feltétlenül a globálisan optimális ütemezés megtalálása a legfontosabb, hanem egy gyorsan előállítható, megvalósítható és gazdaságilag elfogadható ütemezés. Ilyen helyzetben a módszernek képesnek kell lennie arra, hogy rövid idő alatt adjon jó minőségű megoldást, majd ha marad számítási idő, ezt tovább javítsa.

Ezért a dolgozatban tárgyalta ütemezési politikák gyakorlati szempontból fontosak. Az append-only politika például gyorsabb és stabilabb választ adhat, mert kevés döntést nyit újra. A partial insertion nagyobb rugalmasságot ad, de még korlátozza a keresési teret. A full rescheduling adhat jobb célfüggvényértéket, de számítási ideje nagyobb lehet, ezért kritikus ipari helyzetben nem mindig ez a legjobb operatív választás.

A konkrét példához kapcsolódva: ha a gyártósor állásideje rendkívül drága, akkor az ütemezési algoritmusok közötti másodperces vagy perces számítási idő-különbségek is gazdaságilag jelentősek lehetnek. Ezért egy ipari alkalmazásban célszerű többfokozatú döntési logikát használni: először gyorsan előállítani egy megvalósítható és stabil ütemezést, majd a rendelkezésre álló idő függvényében javítani azt. Ebben az értekezésben bemutatott reaktív S-gráf alapú megközelítés

előnye, hogy a policy-k révén szabályozható a számítási idő, a stabilitás és az optimalizálási szabadság közötti kompromisszum.

5. kérdés

A 6. fejezet tervezett algoritmusá becslés alapján dönt a keresési tér végleges szűkítéséről. Lehetne-e ezt javítani megbízható számítással?

Igen, a 6. fejezetben bemutatott tervezett algoritmus továbbfejleszhető lenne megbízható számítási módszerekkel. Fontos ugyanakkor megkülönböztetni két esetet. Ha a becslés valóban csak heurisztikus, akkor fennáll annak veszélye, hogy a branch-and-bound algoritmus olyan ágat is levág, amely később optimális vagy jó megoldást adhatna. Ha viszont a becslés matematikailag érvényes alsó korlát, akkor a levágás biztonságos: az adott ág nem vezethet jobb megoldáshoz, mint az aktuálisan ismert legjobb.

A megbízható számítás ebben a kontextusban elsősorban azt jelenti, hogy az alsó és felső korlátokat garantált módon számítjuk. Például intervallumaritmetika, irányított kerekítés vagy validált lineáris programozási korlátok alkalmazásával biztosítható lenne, hogy a számított alsó korlát valóban ne haladja meg az adott részproblémában elérhető legjobb objektívértéket. Ezzel elkerülhető lenne a hibás pruning, vagyis az optimális megoldást tartalmazó keresési ág véletlen levágása.

Az ütemezési feladatok esetében sok adat eleve diszkrét vagy racionális számokkal leírható, például feldolgozási idők, kezdési idők, befejezési idők és határidők. Ilyen esetben akár egzakt aritmetika vagy egészértékű időreprezentáció is használható a numerikus bizonytalanság csökkentésére. Ha az algoritmus LP-alapú alsó korlátot használ, akkor a megoldás dualitási információi vagy intervallumos ellenőrzése is segíthetnek annak igazolásában, hogy a kapott korlát megbízható.

A megbízható számítás ugyanakkor nem szünteti meg a gyártásütemezési probléma kombinatorikus nehézségét. Elsősorban a levágási döntések biztonságát javítja: azt garantálja, hogy az algoritmus ne zárjon ki tévesen olyan megoldásokat, amelyek potenciálisan optimálisak lehetnek. A gyakorlati ára a nagyobb számítási költség és az összetettebb implementáció.

Összefoglalva: igen, a 6. fejezetben vázolt becslésalapú keresésitér-szűkítés javítható lenne megbízható számítással. A legcélszerűbb irány egy olyan branch-and-bound keret lenne, amelyben a heurisztikus becslések csak a keresés irányítására szolgálnak, míg a végleges áglevágási döntések kizárólag igazolt alsó korlátokon alapulnak. Ez növelné az algoritmus elméleti megbízhatóságát anélkül, hogy megváltoztatná az értekezésben javasolt integrált S-gráf alapú keretrendszer alap gondolatát.

Záró gondolat

Ismételten köszönöm a bíráló alapos és támogató véleményét, valamint a feltett kérdéseket. A kérdések különösen hasznosak abból a szempontból, hogy rámutatnak

a kutatás további lehetséges irányaira: a kvantum- vagy hibrid optimalizálási módszerek vizsgálatára, a reaktív ütemezések stabilitásának elméleti elemzésére, az ipari döntéstámogató rendszerekkel való kapcsolat pontosítására, valamint a 6. fejezetben vázolt integrált algoritmikus keret megbízható számítási módszerekkel történő továbbfejlesztésére.

Nagykanizsa, 2026. április 27.


Bakon Krisztián Attila