



Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet

## **Integrált, korlátozás- és geometriai következtetés-alapú számítógépes eljárás mechanikai szerelés tervezésére**

Tézisfüzet

**Kardos Csaba**

Témavezető:  
Dr. Váncza József

Budapest, 2020

## 1. Motiváció

A mechanikai szerelési műveletek célja különálló alkatrészek összeállításával a késztermék végső formájának létrehozása. Ez a folyamat nem tekinthető elkülönülő tevékenységnek, mivel a szerelés nagyban támaszkodik a terméktervezés, valamint a gyártási és a logisztikai folyamatok eredményeire [13]. A vevőspecifikus termékek iránti növekvő igény kiszolgálása szempontjából is meghatározó a szerelés szerepe, mivel segítségével az elvárt nagyszámú termékfészeség költséghatékonyan állítható elő [15]. A szerelési folyamatok eme központi szerepe a modern termelésben kiemelten fontosá teszi az ezeknek otthont adó gyártórendszerek tervezését, konfigurációját, működtetését és az ezekkel kapcsolatos kutatásokat.

Bár a szereléstervezés számos részfeladatot tartalmaz, gyártócellákat vizsgálva azonban hagyományosan a szerelési sorrendtervezés (Assembly Sequence Planning – ASP) és a szerelési pályatervezés (Assembly Path Planning – APP) feladata kapja a legtöbb figyelmet. Mindazonáltal ezek csak egy részét teszik ki a gyártócella tervezése és konfigurációja során felmerülő problémáknak. A termékmodell folyamat-orientált értelmezése; a technológiai, geometriai és fizikai korlátozások formális megfogalmazása; az eredmények szerelési utasítások formájában való bemutatása mind a szereléstervezéshez szorosan kötődő kihívások. Ezen feladatok megoldására számos eszköz és reprezentáció létezik, melyek általában egy-egy problémára fókuszálnak. Közös reprezentáció és munkafolyamat nélkül azonban ezek a megoldások egymástól elkülönülnek, annak ellenére, hogy ugyanannak a nagyobb problémának a részei és az alapvető célok mind-egyik részfeladat számára azonosak.

Ennek megfelelően a disszertáció fő motivációját is a terület töredezettsége, illetve ebből következően a szereléstervezés teljes folyamatát támogató megoldások hiánya jelenti. Ennek jelentősége nem csupán kényelmi szempont: a különböző részfeladatok közötti visszacsatolások elmaradása könnyen információhiányhoz vezethet, amiben egy részfeladat megoldáshoz szükséges információ nem áll rendelkezésre. Ennek egy tipikus példája a szerelési sorrendterv és annak a geometriai ellenőrzése közötti integráció hiánya.

## 2. Irodalmi áttekintés

A szereléstervezés feladatát [14] a következőképpen definiálja: ”a szereléstervezés során létrejövő részletes szerelési terv határozza meg, hogy a különálló alkatrészek hogyan építik fel a készterméket, figyelembe véve annak geometriáját, a rendelkezésre álló erőforrásokat, készülékeket, adagoló berendezéseket és szerszámokat”.

Az irodalom hagyományosan három fő szereléstervezési részfeladatot különít el, melyek név szerint a következők: szerelési sorkiegyenlítés (Assembly Line Balancing – ALB), szerelési pályatervezés és a szerelési sorrendtervezés. Mivel a részfeladatok céljai különbözőek, ennek megfelelően az alkalmazott reprezentáció is tipikusan eltérő [14]. Általánosságban véve kimondható, hogy, bár számos kutatás foglalkozik az egyes részfeladatok megoldásával, viszonylag kevés az ezek integrált megoldását célzó eredmény.

Önálló gyártócellákat vizsgálva, a sorkiegyenlítési feladat kizárható, így a legtöbb kutatás a sorrendtervezés és a pályatervezés feladatával foglalkozik. A

sorrendtervezés tipikusan egy kombinatorikus optimalizálási feladatként fogalmazható meg, míg a pályatervezés a leggyakrabban részletes geometriai modellek elemzésével foglalkozik [17]. A szerelési sorrendtervezés megoldása egy NP-nehéz feladat és ennek megfelelően számos heurisztikus és lágy számítási modellt alkalmazó eljárás található az irodalomban, de a klasszikus optimalizálási eszközök használata is gyakori [16, 19, 20]. A sorrendtervezés során leggyakrabban alkalmazott célfüggvényei között megtalálható a szerszám- és készülékátállások, a szerelési irányok vagy a folyamat ciklusidejének minimalizálása [16, 18].

A sorrendtervezési feladat megoldásához a legtöbbször a keresési tér valamilyen gráf alapú reprezentációjának segítségével végzik a sorrend meghatározását [17]. Az ún. AND/OR gráf és a precedencia gráf célja, hogy a tervező-algoritmus számára az összes sorrendi korlátozást egy előre kódolt formában tárolja, ennek létrehozása azonban jelentős ráfordítást igényel [19]. A Non-Directional Blocking Graph (NDBG) [23] és annak későbbi változatai geometriai információt is tartalmaznak, azonban általában csak egy lokális környezetben értelmezve, és a gyártócella elemeit nem veszik figyelembe. Az ún. alaksajátosságokat, vagy általánosabb felfogás szerint szerelési *feature*-öket használó modellek által nyújtott dekompozíció meghatározza a *mikro*- és a *makro*-szintű tervezési feladatot [21, 22]. Ezekben a modellekben lehetséges a szerelési terv adott lépéseire jellemző részletes geometriai információ reprezentációja, azonban a makro és a mikro szint kombinációja nem megoldott. Hasonló a kép, a pályatervezésen alapuló sorrendezési eljárások esetében is, ahol a pályatervezés számításgényes művelete általában csak korlátozottan alkalmazható a kombinatorikus optimalizálásban.

A szereléstervezés automatizálása nem tekinthető befejezettnek automatikus instrukció generálás nélkül [26]. Ezen felül, a megnövekedett szellemi terhelés következtében, a szerelést végző dolgozók számára kiemelten fontos a megfelelő információs rendszer (Worker Information System – WIS) biztosítása, amely a szerelési folyamathoz és környezethez illeszkedő egyértelmű utasításokat továbbít; valamint a hagyományos szöveges üzeneteken felül, képeket, videókat, 3D animációt és audio instrukciókat is kezel [24, 25].

A szereléstervezéssel foglalkozó szakirodalmi áttekintés eredményeként az alábbi fő megállapítások tehetőek:

- Számos népszerű eljárás létezik, de nincs egységes általánosan elfogadott sztenderd reprezentáció a szereléstervezésre, és a legtöbb reprezentáció egy adott részfeladatra koncentrál.
- Ennek egyenes következménye, hogy nem létezik teljes (a geometriai modellektől az instrukció generálásig tartó), integrált megoldás a szereléstervezésre és az elérhető megoldások csak az egyes részfeladatokat képesek megoldani, annak ellenére, hogy azok egymáshoz szorosan kapcsolódnak.
- Ennek jellemző példája a mikro- és a makro-szintű tervezés elkülönülése, ami gyakran vezet az optimális sorrend és a geometriai megfelelés közötti konfliktushoz. Ez pedig csökkenti mind a mikro- mind a makro-szintű tervezés hatékonyságát.
- Az integrált eljárások általában feltételezik, hogy a tervezés megkezdésekor minden információ rendelkezésre áll (pl. előzési korlátozások, ún. precedenciák, formájában) és emiatt nincs lehetőség a tervezési folyamat során a modell további bővítésére egy részletesebb elemzés eredményeivel.

- A tervezési modellek megfelelő használatában kulcsszerepe van a hatékony feladat specifikációnak. Ebben kiemelten fontos a generikus CAD reprezentációk támogatása, mivel számos alkalmazás csak zárt formátumokat kezel.
- Számos tervezési modell nem tartalmazza a szerszámokat, készülékeket és egyéb erőforrásokat.
- A szerelési tervekhez tartozó automatikus instrukció generálás fontos, viszont kevés eljárás támogatja a szerelési tervek információs rendszerbe való illesztését.

### 3. Célkitűzés

A disszertáció egy olyan új modellt és tervezési munkafolyamatot támogató keretrendszert mutat be, ami vegyes kezdeményezésű döntéstámogatást nyújt mechanikus összeszerelési folyamatok tervezéséhez. Egy ilyen eszköz felhasználója a szerelési folyamatot tervező mérnök, akinek a feladata egy termék számára a végrehajtható szerelési terv és az annak megfelelő szerelési utasítások előállítása.

A keretrendszer megalkotásakor az alábbi feltevések kerültek meghatározásra:

- A bemenet egy merev, toleranciát nélkülöző alkatrészekből álló termék.
- A szerelési műveleteket egy adott gyártócellában egy operátor hajtja végre.
- A szerelési műveletek kétkezes, monoton folyamatok és a részegységek stabilnak tekintendők.
- Minden szerelési művelet elvégzéséhez szükséges egy készülék és egy szerszám, egy-egy előre megadott halmazból történő kiválasztása.

A keretrendszer három fő szakaszra bontja a tervezési folyamatot:

1. Feladat specifikáció.
2. Terv optimalizáció és a validáció.
3. Utófeldolgozás.

A disszertáció bemutat egy, a fenti három szakaszt integráló, munkafolyamatot. A munkafolyamat az összeállítás geometriai modelljeivel kezdődik és tartalmaz egy eljárást a termék szerelésstervezés-orientált, a fizikai kapcsolatok páronkénti elemzésén alapuló, interpretációjára. Ennek eredménye a szerelési feladatok megadása. A munkafolyamat egy szerelési feature-alapú reprezentációt használ, továbbá az ezekhez tartozó generikus CAD modellek használatát támogató eljárásokat.

A tervezést és optimalizálást végző modell optimális megoldást ad a szerelési feature sorrendezés és a készülék, valamint szerszám hozzárendelés feladataira. Az optimalizálás egy iteratív eljárás része, ami összeköti a makro- és a mikro-szintű szerelésstervezést: a makro-szintű megoldás validációja a mikro szinten automatikusan megtörténik és ez egy visszacsatoláson keresztül biztosítja a feladat iteratív bővítésén keresztüli megoldását. Ezáltal a feladat specifikáció egyszerűsödik, mivel – az irodalomban fellelhető legtöbb eljárással szemben – nem

szükséges a teljes precedencia- vagy blokk-gráfok előre történő elkészítése. Továbbá ezzel elkerülhető a kiinduláskor a feladat túlhatározottsága is.

A szerelési terv utófeldolgozásához bemutatásra kerül egy automatikus instrukció generáló eljárás, amivel vizuális munkautasítások hozhatóak létre. A szerelést végző dolgozó számára a létrehozott tartalom megjelenítését egy alkalmas digitális dolgozói információs rendszer végzi, amely automatikusan feltölthető a generált tartalommal.

A disszertációban az eredmények a fenti fő szakaszoknak megfelelően külön kerülnek bemutatásra, viszont, mivel a szakaszok szorosan kötődnek egymáshoz, ezért a disszertáció hangsúlya is az integráción van, valamint ez jelentette a tervezési és implementációs döntések mögötti fő motivációt is.

## 4. Új tudományos eredmények

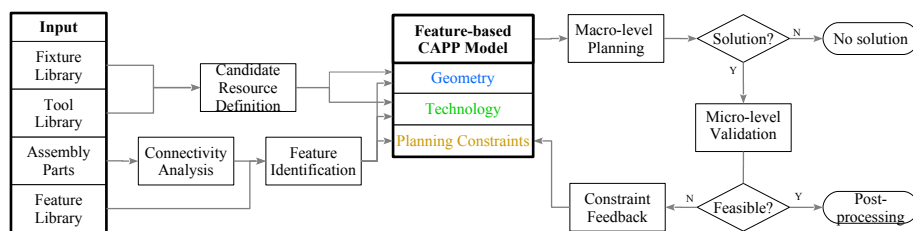
### 4.1. Integrált, hierarchikus, iteratív munkafolyamat feature-alapú szereléstervezéshez

A szereléstervezés kiindulási pontja a késztermék specifikációja, a vége pedig a működő termelés. A probléma összetettsége miatt azonban, a legtöbb tervezési eljárás csak a folyamat egy részét fedi le. Ugyanez a bonyolultság erős motivációt jelent a számítógéppel támogatott eszközök alkalmazására. Ehhez elsődlegesen szükséges egy teljes, integrált munkafolyamat kidolgozása, ami meghatározza a szükséges lépéseket és pozicionálja az alkalmazott eszközöket. A munkafolyamat számára kulcsfontosságú a megfelelő reprezentáció alkalmazása, ami képes biztosítani a tervezési lépések számára releváns információt. Ez tartalmazza a termékre, a folyamatokra és az erőforrásokra vonatkozó geometriai, technológiai és gazdasági korlátozásokat, melyek közül sok előre adott, azonban sok esetben a komplex korlátozások (elsősorban a precedenciák) nem adhatóak meg előzetesen. A korlátozások sokszínűsége, a feladat összetett jellege, valamint a bemenő információk esetleges hiányosságai a feladat sikeres megoldásához az iteratív, dekompozíción alapuló hierarchikus problémamegoldás klasszikus mérnöki alapelveinek alkalmazását teszik szükségessé. Ezen felül, az emberi döntéshozó számára a beavatkozás és ezáltal a feladatspecifikus ismeretek bevonása mindegyik fázisban adott kell legyen.

**1. Tézis** Egy gyártócellán belül a szereléstervezés teljes folyamata, ami az alkatrészek és az erőforrások modelljeinek megadásával kezdődik és a szerelési instrukciók előállításával végződik, megoldható egy integrált munkafolyamat alkalmazásával, ami (1) a kapcsolódó alkatrészpárok elemzésével egy feature-alapú feladatmodellt hoz létre, (2) korlátozás visszacsatolás segítségével kombinálja a makro- és mikro-szintű tervezést és (3) az utófeldolgozás során munkautasításokat hoz létre.

#### 4.1.1. Alkalmazás

A kifejlesztett szerelési feature-alapú reprezentáció segítségével a definiált munkafolyamat (2. ábra) meghatározza a szereléstervezés egyes lépéseinek szerepét



2. ábra. Integrált, iteratív tervezési munkafolyamat merev alkatrészekből álló mechanikai szerelési feladatokhoz.

valamint az azok közötti interfészeket, ezáltal lehetővé téve a számítógéppel segített tervezőeszközök alkalmazását, valamint az emberi beavatkozást. A probléma makro és mikro szintre való dekompozíciójával, illetve ezek visszacsatoláson keresztüli összekapcsolásával lehetséges a probléma iteratív bővítése és megoldása, valamint az új korlátozások beillesztésével a szükséges input egyszerűsíthető. Ez az óvatos megközelítés (vagyis a valószínűsíthetően alulkorlátozott kezdeti modell) segít elkerülni a túlhatározott és megoldhatatlan feladatok létrehozását.

A munkafolyamat előfutára már megjelent egy, a lézeres távhegesztést (Remote Laser Welding – RLW) alkalmazó gyártócellák tervezését és konfigurációját célzó projektben<sup>1</sup>. A jelenlegi verzió sikeresen bemutatásra került három különböző valós szerelés-tervezési feladatban és az eredmények hasznosítása nemzetközi és hazai kutatási projektekből eredményesen megtörtént.

#### 4.1.2. Kapcsolódó publikációk

A tézis a disszertáció 4. fejezetén, valamint az alábbi publikációkon alapul: [C7, J1, C8, J2, J3]

### 4.2. Korlátozás alapú modell a makro-szintű szerelés-tervezéshez

A tervezési munkafolyamatban alkalmazott dekompozíció a makro-szintű tervezést egy kombinatorikus feladatként határozza meg, aminek az eredménye egy kétfézes, mechanikai szerelési szekvencia, melynek utolsó lépése után az alkatrészek a végső, összeszerelt állapotukba kerülnek. Minden lépés tartalmaz egy szerelési feature-t, ami meghatároz két összeszerelendő alkatrészt, és a hozzárendelt készüléket és szerszámot. A probléma bemenete ennek megfelelően a feature-ök, készülékek és szerszámok halmazai. Az irodalomban általánosan megjelenő feltevés szerint a szerelés befejezéséhez minden megadott feature kiválasztásra kell kerülni. A legtöbb esetben azonban az összeállítás technológiai interpretációja a minimálisan szükséges felül, több alternatív feature-t eredményez. Megmutatható, hogy ezáltal a feladat specifikáció során elvégzendő feature kiválasztás könnyen egy előre nem látható, megoldhatatlan makro-szintű feladatot eredményezhet. Ennek elkerülése érdekében a makro-szintű feladatnak szükséges tartalmaznia a feature-kiválasztást is, és úgy fogalmazható meg, mint a feature-ök kiválasztása és sorrendezése valamint ezekhez a szerszámok és készülékek halmazából kiválasztott erőforrások hozzárendelése.

<sup>1</sup><http://www.rlw-navigator.eu>

Alapvető elvárás a makro-szintű terv megfelelősége, amihez a mikro-szintű validációból érkező technológiai korlátozások érvényesítése szükséges. Ez megköveteli a makro-szinten a korlátozások megfelelő modelljének definícióját. Ezen felül, a gyártócella konfigurációjakor megfogalmazott gazdaságossági elvárásokhoz igazodva a makro-szintű feladat idő-optimális megoldása is szükséges.

**2. Tézis** A feature-alapú szereléstervezés makro-szintű feladata, ami a kétkezes szerelési feature-ök kiválasztását és sorrendezését, valamint a készülék és szerszám hozzárendelést tartalmazza, megfogalmazható egy korlátozás programozási modellben, ami (1) minimalizálja a – feature végrehajtási, valamint a készülék és szerszám-átállási idők összegeként definiált – szerelési időt, továbbá (2) érvényesíti a technológiai és végrehajthatósági korlátozásokat.

#### 4.2.1. Alkalmazás

A makro-szintű modell megvalósítása a MiniZinc korlátozás programozási nyelv használatával történt, mivel a magas szintű deklaratív leírás jó kifejező erővel rendelkezik az összetett technológiai és a mikro szintről visszavezetett korlátok leírására.

A modell bemenete a következő:

- A készülékek halmaza és minden egyes készülékhez egy tömegkorlát és egy átállási idő.
- A szerszámok halmaza és minden egyes szerszámhoz egy átállási idő.
- A kétkezes szerelési feature-ök halmaza és minden egyes feature-höz két összeszerelendő alkatrész és egy végrehajtási idő.
- Az alkalmazható szerszámok halmaza minden egyes feature-höz.
- Az alkalmazható készülékek halmaza minden egyes feature-höz.
- A szekvenciára, készülékezésre és szerszámozásra vonatkozó diszjunktív korlátok halmaza.

A modell minimalizálja az összeszereléshez szükséges időt, ami a kiválasztott feature-ök végrehajtási idejének, illetve a készülék- és szerszámátállásokhoz szükséges idő összege, az alábbiak szerint:

- A létrejövő szerelési terv  $K$  alkatrész esetén  $K - 1$  lépésből áll és az utolsó lépés után az összeállítás elkészült.
- Minden kiválasztott feature egy a feature-höz megadott alkalmas készülékben és alkalmas szerszámmal kerül végrehajtásra.
- Minden lépésben a két összeszerelendő alkatrészhez tartoznak a már korábban velük összeszerelt alkatrészek.
- Minden lépésben a készülék által megfogott alkatrész a feature által meghatározott alkatrész vagy egy azzal korábban összeépült alkatrész.
- Minden lépésben a megfogott alkatrész és az azzal összeépült alkatrészek együttes tömege kisebb vagy egyenlő, mint a készülék tömegkorlátja.

- A diszjunktív korlátozások érvényesek.

A diszjunktív korlátozások használatával a modell minden megoldási ciklusban a mikro szintről szerzett információval bővül, amik lépésről-lépésre szűkítik a megoldási teret, végül csak a valóban érvényes megoldásokat meghagyva. Az erőforrás hozzárendelés, a feature kiválasztás és a sorrendezés egy modellben való kezelésével a megoldás implicit megvalósítja a részegységek definiálását, amikor is a választott készülék meghatározza, hogy mely műveletek kerülnek egy befogásba végrehajtásra.

A korlátozás alapú modell sikeresen alkalmazásra került valós ipari feladatokon, demonstrálva a modell kifejező erejét és hatékonyságát. A modell alkalmazásával mindegyik esetben elfogadható számítási időn belül igazolt optimum került meghatározásra, ami ezáltal minimalizálja a tervhez szükséges végrehajtási és átállási időt.

#### 4.2.2. Kapcsolódó publikációk

A tézis a disszertáció 5. fejezetén, valamint az alábbi publikációkon alapul: [J2, J5].

### 4.3. Geometriai következtetés szerelési tervek mikro-szintű validációjához

A makro-szintű terv megfelelésének biztosításához annak részletes validációja szükséges. Ennek egyik módja, hogy a mikro szintű validációt a különböző szempontok szerint ún. szakértő modulok végzik. Egy ilyen modul feladata, hogy a validáció eredményeit a makro szint által specifikált vágásoknak megfelelő formátumban adja vissza. Az egyik alapvető kiértékelési kritérium a szerelési terv mozgásainak geometriai ellenőrzése. A szerelési feature és a hozzárendelt erőforrások a terv minden lépésében meghatározzák a mozgatott és a megfogott komponenseket és ezek mozgásait. Ütközésvizsgálat segítségével a szerelési terv egyes lépéseiről eldönthető, hogy a keletkezik-e geometriai konfliktus a végrehajtás során. Az ellenőrzés során generikus, poligon geometriai reprezentáció használata a modellekhez való jobb hozzáférést, valamint a hatékony ütközésvizsgáló algoritmusok használatát teszi lehetővé. Az ilyen modellek azonban gyakran tesszelációs hibákat valamint átmetszéseket tartalmaznak, ami az ütközésvizsgálatot megnehezíti. Ennek elkerülésére támogató algoritmusok alkalmazása szükséges.

**3. Tézis A feature-alapú szerelési feladatok mikro-szintű – az alkatrészek, készülékek és szerszámok poligon modelljeit használó – geometriai ellenőrzése a makro-szintű tervezés számára a feladat-specifikus kapcsolati gráfon (TLG) értelmezett általános korlátozásokat biztosít, melyeket a lokális mozgás és a megközelítés során végzett ütközésvizsgálat kombinált alkalmazása állít elő.**

#### 4.3.1. Alkalmazás

A szerelés minden lépésénél az ütközésvizsgálat eredménye általános makro-szintű korlátozássá alakítható a TLG segítségével. A TLG csomópontjai az



adott lépésben és az azt megelőzően összeszerelt alkatrészek illetve az adott lépésben használt készülék és szerszám. A készülék csomópontja a megfogott alkatrészhöz kapcsolódik, a szerszám csomópontja az adott lépésben mozgatott alkatrészhöz, az alkatrészek közötti kapcsolatok az adott lépésben vagy azt megelőzően direkt realizált feature-öket jelenítik meg. A validáció során észlelt ütközések a TLG-ban érvénytelen utakat jelölnek, melyek a makro-szint számára az alábbi formátumban csatolhatóak vissza:  $\{\alpha, \{\beta_1, \dots, \beta_e\}, \gamma, \delta\}$ . Itt  $\alpha$  a végrehajtandó feature,  $\{\beta_1, \dots, \beta_e\}$  az ütközést okozó lehetséges feature-ök (kivéve  $\alpha$ ),  $\gamma$  szerszám és  $\delta$  készülék az adott lépéshez rendelt erőforrások (ha megjelennek az ütközésben). A fenti vágás a makro szinten megköveteli, hogy a szerelési tervben  $\alpha$  nem szerepel *vagy* legalább egy feature-t megelőz a  $\{\beta_1, \dots, \beta_e\}$  halmazból *vagy* nem  $\gamma$  szerszámmal *vagy* nem  $\delta$  készülékkel kerül végrehajtásra.

A mikro szinten alkalmazott lokális mozgás validációja támogatja a nem hibátlan poligon modellek kezelését is, a poligon modellpárok közötti lineáris mozgás kiértékelésére kifejlesztett új metrika (Disassembly Direction Metric – DDM) használatával. Ez a feladat specifikációt is segíti az illesztési műveletekhez tartozó lineáris tengely és mélység meghatározásával. Az eljárások sikeres tesztelése absztrakt geometriai példákon és többféle valós ipari feladaton is megtörtént. Az ütközésvizsgálat segítségével előállított vágások hatékonyak bizonyultak a makro-szintű feladat megoldásában. A lokális mozgás és a pályatervezésen alapuló megközelítés kombinációja az instrukció generálás során is felhasználásra került.

#### 4.3.2. Kapcsolódó publikációk

A tézis a disszertáció 6. fejezetén, valamint az alábbi publikációkon alapul: [C8, J3, C9, C11].

### 4.4. Munkautasítások automatikus létrehozása és megjelenítése

A szereléstervezés záró lépése a terv emberi, robotos vagy kollaboratív módon történő végrehajtása. Mindegyik esetben szükség van a megfelelő utasítások előállítására vagyis a terv pontos, formális reprezentációjára. Az emberi munkaerő, aminek alkalmazása a mechanikai szerelés területén még mindig elsődleges, számára ez könnyen értelmezhető munkautasításokat jelent. A modern dolgozói információs rendszerek (Worker Information System – WIS) lehetőséget nyújtanak dinamikus, multi-modális instrukciók alkalmazására, azonban a rugalmas termelés támogatása érdekében egyre jelentősebb igény a képesség- és a kontextusfüggő működés is. A szerelési tervhez szorosan kapcsolódva, a bemutatott munkafolyamat utolsó lépéseként, az automatikus instrukció létrehozás került megvalósításra. Ehhez egy olyan eljárás kidolgozása szükséges, ami elvégzi a feature-alapú szerelési terv átalakítását, valamint támogatja a multi-médiás, képesség- és kontextusfüggő instrukciók létrehozását.

**4. Tézis** A feature-alapú szerelési terv automatikus utófeldolgozásával létrehozhatók (1) több-szintű szöveges munkautasítások, a feature típusokhoz, valamint az átállás és az anyagmozgatás típusú műveletekhez kapcsolódó sablonok alkalmazásával, továbbá (2) három di-

**menziós, interaktív, animált munkautasítások, (3) amelyekkel együttesen egy dolgozói munkavégzést támogató információs rendszer adatbázisa automatikusan feltölthető.**

#### **4.4.1. Alkalmazás**

A kifejlesztett algoritmusok alkalmazásával vizuális (szöveges és 3D) instrukciók automatikusan létrehozhatóak a feature-alapú szerelési tervből. A feature típusokhoz valamint az átállítás és anyagmozgatás típusú műveletekhez tartozó utasításminták segítségével az operátor által végzett tevékenység formalizálható. A létrehozott instrukciók megjelenítésére egy erre a célra tervezett és implementált multimodális, képesség- és kontextusfüggő dolgozói információs rendszerben került sor. A valós ipari környezetben a demonstráció egy nemzetközi, ember-robot kollaborációval foglalkozó, kutatási projekt<sup>2</sup> keretein belül történt, ami- ben egy autóiipari összeszerelési feladathoz automatikusan generált instrukciókat jelenített meg a megvalósított dolgozói információs rendszer.

#### **4.4.2. Kapcsolódó publikációk**

A tézis a disszertáció 8. fejezetén, valamint az alábbi publikációkon alapul: [C6, C7, O12, C10, C11, J4].

## **5. Az eredmények hasznosítása**

### **5.1. SYMBIO-TIC**

A SYMBIO-TIC project (részletesen a disszertáció 2.6.2. fejezetében bemutatva) több lehetőséget is kínált a kutatási eredmények alkalmazására. Az autóiipari esettanulmányban alkalmazott turbófeltöltő (részletesen a disszertáció 7.2. fejezetében) a Volvo Car Company konzorciumi partner hozzájárulásának köszönhetően demonstrátorként használható volt. Ez volt az első tesztje a megvalósított szereléstervezési eljárásnak, és ez biztosította az instrukció generáláshoz szükséges tartalmat is.

Mivel a projekt elsődleges célja az ember-robot kollaboráció támogatása volt, ezért a dolgozói instrukciók megjelenítése kulcsfontosságú volt, és így a projekt a kifejlesztett automatikus instrukció generáló eljárás számára is megfelelő tesztelési lehetőséget biztosított. A Human Machine Interface Controller (HMIC) instrukció megjelenítő rendszer sikeresen megvalósításra került a projekt során és demonstrátorként üzemel a Skövde-i egyetem laboratóriumában. A rendszer integrációja a cellavezérlővel és az ütemező eszközzel eredményes volt és ezáltal létrejött a projekt által célul kitűzött szimbiotikus környezet. A HMIC rendszer egy spanyol légiipari vállalat telephelyén is üzembe lett helyezve, ahol egy repülőgépszárnyakat összeszerelő rugalmas gyártócellában nyújt információt a dolgozóknak.

### **5.2. Belföldi kutatási projekt**

Az eredmények további hasznosítása egy magyarországi kutatási projektben történt („Ipar 4.0 kiválósági központ”, GINOP-2.3.2-15-2016-00002). A szereléster-

<sup>2</sup><http://www.symbio-tic.eu>

vezés az egyik fő kutatási területe volt a projektnek és ez biztosította a pneumatikus munkahenger és a gömbcsap összeállításokat is. Mindkét esetben a teljes szereléstervezési munkafolyamat sikeresen alkalmazásra került, és a létrehozott instrukciók a HMIC rendszerbe automatikusan feltöltésre kerültek.

A projekt célja volt a fizikai demonstrátorok felépítése is a SZTAKI ún. okos gyár laboratóriumaiban Győrben és Budapesten. Ezekben a helyszíneken az eredmények több alkalommal, nyilvános eseményeken (pl. Kutatók éjszakája rendezvény) sikerrel kerültek bemutatásra.

## Hivatkozások

---

### Publikációk nemzetközi folyóiratokban

---

- [J1] Gábor Erdős, Csaba Kardos, Zsolt Kemény, András Kovács, and József Váncza. Process planning and offline programming for robotic remote laser welding systems. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 29(12):1287–1306, 2016.
- [J2] Csaba Kardos, András Kovács, and József Váncza. Decomposition approach to optimal feature-based assembly planning. *CIRP Annals*, 66(1):417–420, 2017.
- [J3] Csaba Kardos and József Váncza. Mixed-initiative assembly planning combining geometric reasoning and constrained optimization. *CIRP Annals*, 67(1):463–466, 2018.
- [J4] Gergely Horváth, Csaba Kardos, Zsolt Kemény, András Kovács, Balázs E Pataki, and József Váncza. Multi-modal interfaces for human–robot communication in collaborative assembly. *ERCIM NEWS*, (114):15–16, 2018.
- [J5] Csaba Kardos, András Kovács, and József Váncza. A constraint model for assembly planning. *Journal of Manufacturing Systems*, 54:196–203, January 2020.

---

### Publikációk konferenciakiadványokban

---

- [C6] Gábor Erdős, Csaba Kardos, Zsolt Kemény, András Kovács, and József Váncza. Workstation configuration and process planning for RLW operations. *Procedia CIRP*, 17:783–788, 2014.
- [C7] Gábor Erdős, Csaba Kardos, Zsolt Kemény, András Kovács, and József Váncza. Planning and off-line robot programming system for remote laser welding. In *25th International Conference on Automated Planning and Scheduling (ICAPS 2015)*, page 1, Yerusalem, 2015.
- [C8] Csaba Kardos, András Kovács, and József Váncza. Towards feature-based human-robot assembly process planning. *Procedia CIRP*, 57:516–521, 2016.

- [C9] Csaba Kardos and József Váncza. Application of generic CAD models for supporting feature based assembly process planning. *Procedia CIRP*, 67:446–451, 2018.
- [C10] Csaba Kardos, Zsolt Kemény, András Kovács, Balázs E. Pataki, and József Váncza. Context-dependent multimodal communication in human-robot collaboration. *Procedia CIRP*, 72:15–20, January 2018.
- [C11] Csaba Kardos, András Kovács, Balázs E Pataki, and József Váncza. Generating human work instructions from assembly plans. In *UISP 2018: Proceedings of the 2nd Workshop on User Interfaces and Scheduling and Planning*, pages 31–40, Delft, the Netherlands, 2018.

---

## Magyar nyelvű publikációk

---

- [O12] Csaba Kardos and József Váncza. Industry 4.0: a digitális technológiák alkalmazásának új kihívásai és lehetőségei. *Gépgyártás*, 55(2):40–45, 2015.

---

## Irodalomjegyzék

---

- [13] Daniel E. Whitney. *Mechanical assemblies: their design, manufacture, and role in product development*. Oxford University Press, New York, 2004.
- [14] Somayé Ghandi and Ellips Masehian. Review and taxonomies of assembly and disassembly path planning problems and approaches. *Computer-Aided Design*, 67-68:58–86, October 2015.
- [15] Mitchell M. Tseng, Jianxin Jiao, and M. Eugene Merchant. Design for mass customization. *CIRP Annals*, 45(1):153–156, 1996.
- [16] Mohd Fadzil Faisae Rashid, Windo Hutabarat, and Ashutosh Tiwari. A review on assembly sequence planning and assembly line balancing optimisation using soft computing approaches. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(1):335–349, 2012.
- [17] P. Jiménez. Survey on assembly sequencing: a combinatorial and geometrical perspective. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24(2):235–250, April 2013.
- [18] Alexander Neb. Review on approaches to generate assembly sequences by extraction of assembly features from 3D models. *Procedia CIRP*, 81:856–861, 2019.
- [19] MVA Raju Bahubalendruni and Bibhuti Bhusan Biswal. A review on assembly sequence generation and its automation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 230(5):824–838, March 2016.

- [20] Daisuke Tsutsumi, Dávid Gyulai, András Kovács, Bence Tipary, Yumiko Ueno, Youichi Nonaka, and László Monostori. Towards joint optimization of product design, process planning and production planning in multi-product assembly. *CIRP Annals*, 67(1):441–446, 2018.
- [21] Winfried Van Holland and Willem F. Bronsvoort. Assembly features in modeling and planning. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 16(4):277–294, 2000.
- [22] Youichi Nonaka, Gábor Erdős, Tamás Kis, András Kovács, László Monostori, Takahiro Nakano, and József Váncza. Generating alternative process plans for complex parts. *CIRP Annals*, 62(1):453–458, 2013.
- [23] Randall H. Wilson and Jean-Claude Latombe. Geometric reasoning about mechanical assembly. *Artificial Intelligence*, 71(2):371–396, December 1994.
- [24] M. Morioka and S. Sakakibara. A new cell production assembly system with human–robot cooperation. *CIRP Annals*, 59(1):9–12, January 2010.
- [25] Susanne Vernim and Gunther Reinhart. Usage frequency and user-friendliness of mobile devices in assembly. *Procedia CIRP*, 57(Supplement C):510–515, January 2016.
- [26] Krishnanand Kaipa, Carlos Morato, Boxuan Zhao, and Satyandra K. Gupta. Instruction generation for assembly operations performed by humans. In *32nd Computers and Information in Engineering Conference, Parts A and B*, volume 2, pages 1121–1130. ASME, August 2012.

