

Mérnöki Kar
Rendszermérnöki Intézeti Tanszék
Pannon Egyetem

HABILITÁCIÓS TÉZISEK

Ember-központú gyártási rendszerek



Pannon Egyetem
University of Pannonia

A Pannon Egyetem habilitációs címének megszerzésére.

írta
Ruppert Tamás
Veszprém, Magyarország

Veszprém, 2025. szeptember 30.

Tartalomjegyzék

1	Fő motiváció és célkitűzések	1
2	A dolgozat áttekintése és összefoglalása	3
2.1	I. Téziscsoport	3
2.2	II. Téziscsoport	4
2.3	III. Téziscsoport	4
3	I. téziscsoport:	
	Emberközpontú teljesítményértékelés	6
3.1	Valós idejű helymeghatározó rendszerek használhatósága	6
3.1.1	A kutatás háttere	6
3.1.2	A kidolgozott módszerek	7
3.1.3	Tudományos eredmények és újdonságok	9
3.1.4	A tézis alapjául szolgáló publikációk	10
3.2	Vizuális adat alapú tevékenységfelismerés	10
3.2.1	A kutatás háttere	10
3.2.2	A kidolgozott módszerek	11
3.2.3	Tudományos eredmények és újdonságok	13
3.2.4	A tézis alapjául szolgáló publikációk	13
4	II. téziscsoport: Emberközpontú digitális modellek	15
4.1	Human-Asset Administration Shell	15
4.1.1	A kutatás háttere	15
4.1.2	Alkalmazott módszerek	16
4.1.3	Tudományos eredmények és újdonságok	17
4.1.4	A tézis alapjául szolgáló publikációk	18
4.2	Tudásgráfok az emberközpontú gyártáshoz	18
4.2.1	A kutatás háttere	18
4.2.2	Alkalmazott módszerek	19
4.2.3	Tudományos eredmények és újdonságok	20

4.2.4	A tézis alapjául szolgáló publikációk	21
5	III. téziscsoport: Emberközpontú mutatók és fiziológiai paraméterek	22
5.1	Kognitív terhelés a feladatok végrehajtása során	22
5.1.1	A kutatás háttere	22
5.1.2	Kísérlet tervezése	23
5.1.3	Tudományos eredmények és újdonságok	23
5.1.4	A tézis alapjául szolgáló publikációk	24
5.2	Munkautasítások értékelése	24
5.2.1	A kutatás háttere	24
5.2.2	A kidolgozott módszerek és a kísérlet tervezése	24
5.2.3	Tudományos eredmények és újdonságok	26
5.2.4	A tézis alapjául szolgáló publikációk	27
6	Köszönetnyilvánítás	28

1 Fő motiváció és célkitűzések

Az elmúlt öt évben az emberközpontú gyártási kihívásokra és azok megoldásaira koncentráltam. Miután megszereztem a doktori fokozatom egy kapcsolódó területen, elkezdtem kidolgozni az Ipar 5.0 laboratóriumot és összeállítani egy kutatás-fejlesztési csapatot.

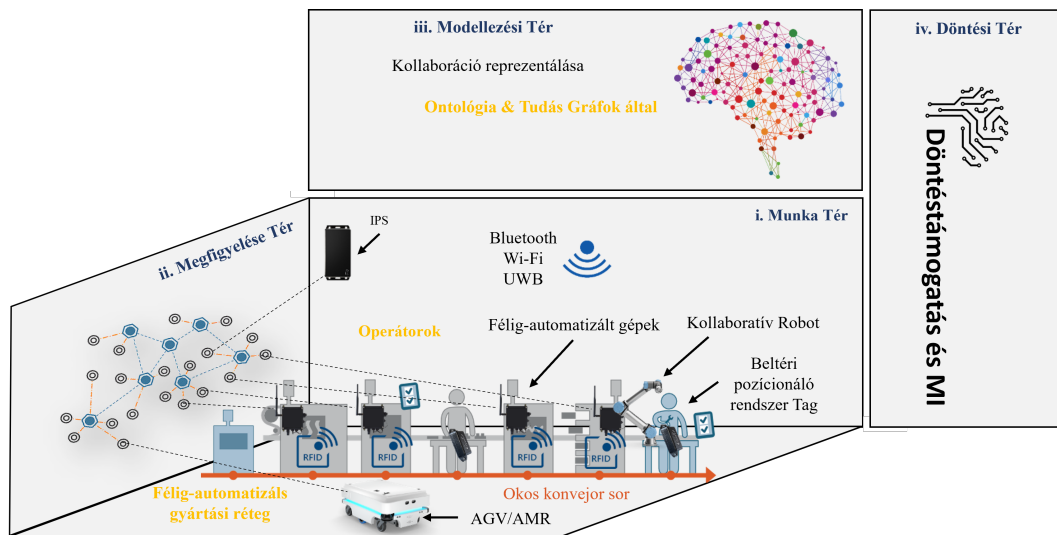
A magyarországi és az európai iparágak munkaerő-kitettsége miatt erősödő probléma a társadalom előregedése és a humán erőforrás-változás szükségessége. Az üzleti területen mindig a teljesítmény és a befektetés megtérülése (ROI) a legfontosabb szempont. Mivel Európa munkaerőhiánnyal küzd, ezek a szempontok az utóbbi években még fontosabbá váltak. A munkaerő teljesítményének csökkenésének fő okainak megértése egyre fontosabb, ezáltal a piac egyre inkább emberközpontú és motivált munkahelyeket teremt és igényel.

Az emberi tevékenységek megértése az első lépés egy támogató rendszer létrehozásában. Ennek érdekében különböző módszereket fejlesztettünk ki az emberközpontú teljesítmény-értékeléshez, ötvözve a hagyományos Lean módszertanokat a legújabb technológiákkal. Jelentős tapasztalatokkal rendelkezem a valós idejű helymeghatározó rendszerek (RTLS), más néven beltéri helymeghatározó rendszerek (IPS) terén. Emellett különböző megoldásokon dolgozunk a vizuális alapú tevékenységfelismerés területén.

Ahhoz, hogy a munkavállalóinkra vonatkozó információkat integráljuk a jelenlegi rendszerünkbe, emberközpontú modellekre és adatstruktúrákra van szükségünk. Kidolgoztunk egy Human-Asset Administration Shell (HAAS) modellt, amely fiziológiai paramétereket és számított emberközpontú tényezőket, például kognitív terhelést és stresszszintet tartalmaz. Bizonyítottuk azt is, hogy az emberközpontú tudásgráfok hasznosak az emberi viselkedés modellezéséhez. Összességében az Intelligens Kollaboratív Gyártási Tér (Intelligent Collaborative Manufacturing Space - ICMS) keretrendszer fejlesztettem ki. A kifejlesztett ICMS keretrendszer alapján megteremttem az emberközpontú rendszerek alapjait. Számos laboratóriumi kísérletet végeztünk, hogy bemutassuk a fiziológiai jelek alkalmazhatóságát a gyártásban hordható érzékelők segítségével. Mivel a munkavégzésre vonatkozó utasítások jelentős szerepet játszanak az iparban, kidolgoztunk egy értékelési módszert azok hatékonyságának felmérésére is.

1 Fő motiváció és célkitűzések

A következőkben röviden bemutatom az ICMS keretrendszert, amely az elmúlt öt évnyi kutatásaim eredményeként alakult ki. Az ICMS célja egy új szintű együttműködési környezet létrehozása, ahol az emberi munkavállalók és az automatizált és félig automatizált termelési eszközök ugyanazon a területen dolgozhatnak együtt, hogy olyan termelékenységi és rugalmassági szintet érjenek el, amelyet egyikük sem tudna egyedül elérni. Ennek megvalósításához intelligens automatizálási rendszerekre van szükség a „ember-automatizálás szimbiózis” eléréséhez. Az ICMS célja egy keretrendszer létrehozása az intelligens érzékelőhálózatok és az adattudományi technikák alapján történő együttműködések támogatására. A 1.1 ábra a javasolt ICMS elemait mutatja be, amelynek célja az automatizált és félig automatizált termelési eszközök valós idejű, megfigyelésen alapuló vezérlésének bemutatása, hogy az emberi munkavállalók és a gépek közötti együttműködés biztonságosabbá és pontosabbá váljon. Négy fő elem vagy altere jellemzi ezt az „intelligens munkaterületet”: (i) a munkaterület, (ii) a megfigyelési terület, (iii) a modellezési terület és (iv) a döntési terület.



1.1. ábra: Az intelligens együttműködésen alapuló gyártási rendszer négy tere

Az ICMS egy olyan keretrendszer, amelynek célja az emberek és az automatizált és félig automatizált termelési eszközök közötti hatékony együttműködés támogatása, tevékenységfelismerés és -előrejelzés, valamint gépi tanulási optimalizáló algoritmusok alapján.

2 A dolgozat áttekintése és összefoglalása

2.1 I. Téziscsoport

Kifejlesztettem egy algoritmus csomagot és módszertani rendszert, amely a valós idejű helymeghatározó rendszer (RTLS) információi és a vizuális megfigyelésen alapú tevékenységfelismerés alapján értékeli ki az emberközpontú teljesítménymutatókat. Ezeket a digitális megoldásokat összekapcsoltuk a hagyományos Lean technikákkal, hogy valós idejű és adatalapú folyamatfejlesztést biztosítsunk.

Bebizonyítottuk, hogy az RTLS nem csak a teljesítményértékeléshez használható, hanem a valós gyártási környezetben dolgozó munkavállalók körülményeinek felméréséhez is. Az eredmények azt mutatják, hogy a beltéri helymeghatározási adatok nemcsak a munkavállalók mozgásának és tevékenységének nyomon követéséhez hasznosak, hanem a tényleges környezeti információkról (pl. zaj, hőmérséklet) is információt nyújtanak, amelyek alapján értékelhető az ember térbeli és időbeli komfort szint változása is.

A hagyományos csontvázadatokon alapuló elemzéseket alkalmaztuk a gyártósoron végzett emberi teljesítmény értékelésére, hogy értékes információkat nyújtsunk a feladatok jobb elosztásához. Az MS Kinect adatokat a hagyományos Lean technikával párosítottuk, hogy értékeljük az emberi teljesítményt egy valós gyártási adatkészleten. Az eredmények megmutatták a csontvázadatok alkalmazhatóságát, és bizonyították azok hasznosságát az emberközpontú teljesítményértékelés esetében.

Összefoglalva, a téziscsoport értékes eszközkészletet biztosít a valós gyártási helyzetekben az operátorok teljesítményének és komfort szintjének felmérésére és kiértékelésére, valamint ezeknek a vizuális és érzékelőalapú információknak a hagyományos Lean technikákkal való összekapcsolására a hatékonyabb folyamatok létrehozása érdekében.

2.2 II. Téziscsoport

A valós idejű teljesítménymérések kezelése érdekében kifejlesztettem egy emberi Asset Administration Shell (HAAS) modellt, amely az emberi digitális iker alapját képezi, és támogatja az emberi tényezők (úgy, mint fiziológiai jelek, képességek, stb.) integrációját. Emellett bizonyítottam a tudásgráf használhatóságát, és kifejlesztettem egy emberközpontú tudásgráfot a gyártási komplex rendszerek modellezésére kifejezetten az emberi munkaerőt előtérbe helyezve.

Kifejlesztettünk egy kiterjesztett HAAS modellt a feladatkiosztással és operátorral kapcsolatos információk kezelésére. Egyrészt a modell képes kezelni a valós idejű fiziológiai mutatók alapján ténylegesen érzékelt kognitív terhelést, másrészt a modell kezeli a feladat követelményeit is, mint például a környezeti feltételeket, a munkavállaló jellemzőit és a feladatspecifikus információkat (például rutin vagy nem rutin, kognitív vagy fizikai igénybevételt jelentő, egyéni vagy csapatmunkát igénylő), hogy a kijelölt feladatokat az operátor képességeihez illessze. A modell a kognitív terheléskezelés alapját képezi, értékes adatsémával a feladatkiosztáshoz.

Mindezen információk a termelési rendszerekkel való hatékony integrálására egy emberközpontú tudásgráfot (HCKG) fejlesztettünk ki, hogy standard ontológiák, adatkinyerési módszerek és lehetséges alkalmazások segítségével tudásgráfot hozva létre az emberrel kapcsolatos folyamatok kezeléséhez. A kifejlesztett gráf értékes megoldás a termelésirányítás számára, ahol különböző eszközöket/szereplőket (robotokat, operátorokat, érzékelőket és aktuátorokat) kell kezelni egy rendszerben.

2.3 III. Téziscsoport

A fizikai aktivitás teljesítményének mérését kiegészítve az emberközpontú információkkal, elkezdtem dolgozni a gyártási környezetben végzett fiziológiai információk mérhetőségén, hogy a teljesítmény megfigyelése, a feladatkiosztás és a folyamatfejlesztés alapján emberközpontúbb és személyre szabottabb megoldásokat tudjunk kidolgozni. Egyszerű, viselhető szenzorokkal bizonyítottam a fiziológiai jelek használhatóságát és alkalmazhatóságát a gyártási folyamatokban, integrálva a valós idejű emberi állapotokat és viselkedéseket a gyártási rendszerekbe.

Elkezdtem a gyártással kapcsolatos kísérleteket, hogy szubjektív és objektív módon mérjem a kognitív terhelést "multitasking" környezetben, ahol a résztvevőknek egy adott másodlagos feladatot kellett elvégezniük az elsődleges feladat végrehajtása közben. Mindkét esetben az eredmények ígéretes összefüggést mutattak az észlelt kognitív terhelés

és a tudatosság szintje, valamint az iparban használható hordható érzékelőkkel mért fiziológiai adatok között. Ezek az "open source" kísérleti adatkészletek értékes információkat nyújtanak a további kutatásokhoz ezeken a területeken, mivel alapul szolgálnak az iparban használható érzékelők alkalmazhatóságához a gyártási folyamatokban az emberi munkavállalók kognitív terhelésének értékelése céljából.

A munkautasítások az egyik leggyakrabban használt felület az emberi munkavállalók támogatására, mivel minden szükséges információt megadnak a tényleges feladatok végrehajtásához. Objektíven mértük a különböző típusú munkavégzési utasítások (például kód- és vizuális alapúak) használhatóságát és hatékonyságát egy laboratóriumi környezetben végzett összeszereléshez hasonló feladat során. A teljesítményt és a minőséget a fiziológiai méréseken és a résztvevők szubjektív értékelésén keresztül mértük. Az eredmények értékes információkat szolgáltatnak a kód- és vizuális alapú munkavégzési utasítások helyes használatáról, valamint a hordható érzékelők alkalmazhatóságáról.

3 I. téziscsoport:

Emberközpontú teljesítményértékelés

Az emberközpontú gyártásban egyre nagyobb jelentőséget kap az operátorok teljesítményének figyelemmel kísérése. Ezt a tendenciát a képzett munkaerő egyre növekvő hiánya, a valós idejű helymeghatározó rendszerek integrálása és a vizuális alapú tevékenységkövető technológiák egyre szélesebbkörű használhatósága ösztönzi. Ezek a fejlesztések pontosabb, rugalmasabb és munkavállaló-orientáltabb megközelítést tesznek lehetővé az ipari folyamatok irányításában, biztosítva mind a működési hatékonyságot, mind az emberek komfort szintjét. Ebben a téziscsoportban bebizonyítom a valós idejű helymeghatározó rendszerek és a vizuális megfigyelési eszközök alkalmazhatóságát az emberi tevékenységek felismerésében.

3.1 Valós idejű helymeghatározó rendszerek használhatósága

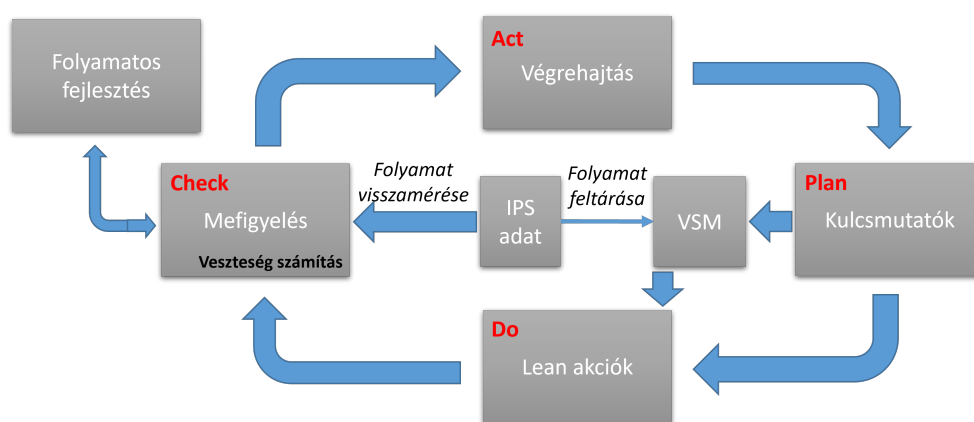
3.1.1 A kutatás háttere

Az emberi munkavállalók értékelése nehéz feladat, mivel mindannyian különbözőek vagyunk, különösen egy komplex gyártási folyamatban. Emberközpontú megoldásként emberorientált és személyre szabott értékelési rendszerre van szükség. Ebből a célból különböző algoritmusokat fejlesztettem ki, hogy az úgynevezett beltéri helymeghatározó rendszer (IPS, más néven valós idejű helymeghatározó rendszer – RTLS) információiból értékes, emberközpontú információkat nyerjek ki, a hagyományos Lean technikákkal párosítva.

A Lean elvek és a digitális technológiák hatékony kombinációja gyorsabbá teszi a veszteségek azonosítását és csökkentését, mint a hagyományos Lean módszerek. Az új Digital Lean (más néven Lean 4.0) megoldások szenzorokat és digitális berendezéseket tartalmaznak, így innovatív megoldásokat kínálnak, amelyek kiterjesztik a hagyományos Lean eszközök hatékonyságát. A kifejlesztett algoritmusok és módszerek nemcsak a teljesítménymutatókat, hanem a munkavállalók tényleges komfort szintjét is képesek értékelni.

3.1.2 A kidolgozott módszerek

A beltéri pozícióadatokat és a Plan–Do–Check–Act (PDCA) ciklus alapján egy keretrendszerben dolgoztunk ki (lásd a 3.1 ábrát) a beltéri környezetben dolgozó operátorok komfortszintjének és teljesítményének értékelésére, ahol az operátorok kényelmi szintje mérhető mutatóként szolgál. Ez egy részletes útmutató arról, hogyan lehet az IPS által nyújtott információkat felhasználni a Lean menedzsmentben. A javasolt módszer a folyamatos fejlesztés koncepciójába ágyazódik. A Six Sigma módszertanban alkalmazott strukturált DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) megközelítés szintén követi a PDCA ciklus koncepcióját, amely hatékonyan bizonyult a nem értéknövelő tevékenységek csökkentésében az ellátási láncokban és a szerelősorokon.

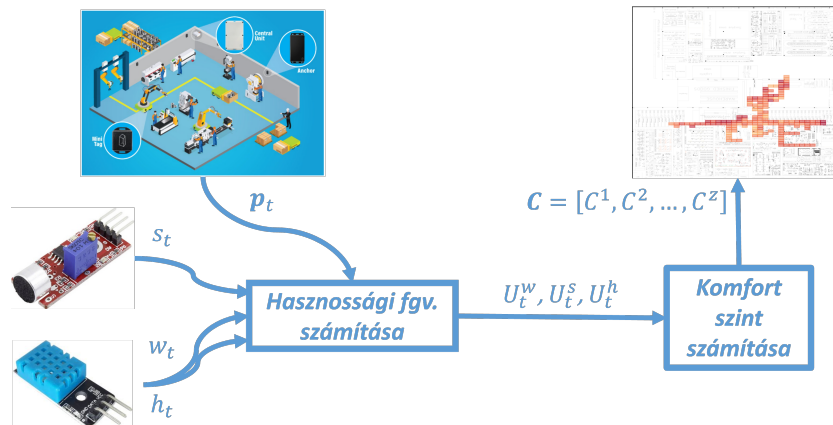


3.1. ábra: Az IPS-adatok a javasolt PDCA-alapú módszertan kulcsfontosságú elemeivel.

A módszer központi eleme a folyamatmodell (a 3.1 ábrán VSM-ként ábrázolva), amely a gyártási folyamatra vonatkozó összes lényeges információt tartalmazza. A javasolt fejlesztési ciklus az IPS-adatok segítségével folyamatosan frissíti a modellt. A cél a gyártás folyamatos és automatikus figyelemmel kísérése. A kifejlesztett keretrendszer a folyamatbányászat eszköztárával az IPS-adatok alapján folyamatosan feltárja a valós folyamatmodellt. Az így kapott modelleket a VSM-ek frissítésére, valamint a folyamat teljesítményének értékelésére használjuk a Lean KPI-k kiszámításával. Gantt-diagramokat alkalmaztunk a műveletek időtartamának elemzésére. A pozíció adatok elemzése alapján a gyártási folyamat további állapotaiban lehet meghatározni és hozzárendelni a termék- és anyagáramlásokat, valamint az erőforrások állapotait (pl. meghatározhatók az időbeli készletek). Az IPS folyamatbányászati algoritmusok által feltárt állapotok és további időbélyegek felhasználhatók a VSM-ek frissítésére. A folyamatáramok valós idejű pozíciójának köszönhetően mozgásalapú anomáliák is felismerhetők.

Fontos megérteni azokat a konkrét területeket és körülményeket, ahol a munkavállalók különböző környezeti tényezőknek vannak kitéve. Az elosztott információk elengedhetetlenek a foglalkozási expozíciók (zajok, hőmérsékleti kitettség, fényviszonyok, stb.) térbeli és kontextusba helyezett eloszlásának megragadásához. A koncentrált paraméterekkel ellentétben ez az expozíció az egyes operátorok és munkahelyek között eltérő. Egyértelmű célkitűzés megfogalmazásához szükséges megfogalmazni a térbeli és időbeli dimenziókat egyaránt magában foglaló részletes információk iránti igényt. Ennek elérése érdekében kontextusba helyezett, a releváns adatokhoz kapcsolódó pozícióalapú információkra van szükség. Beltéri helymeghatározási adatokat építettünk be a helyalapú szenzorinformációk létrehozásához. Az IPS alkalmazása és továbbfejlesztése megoldást jelent ezekre a motivációkra. Az IPS-szenzorok és a kapcsolódó elemzési technikák alkalmazásával pontos, helyalapú információk gyűjthetők. Az IPS-érzékelők és a kapcsolódó technológiák integrálása ígéretes lehetőséget kínál a munkahelyi megfigyelés és tervezés fejlesztésére, végső soron pedig egy biztonságosabb és hatékonyabb munkakörnyezet elősegítésére.

Az szenzor-fúziós módszertant a 3.2 ábra szemlélteti. Ez a keretrendszer leírja az információs folyamatot, amelyben van egy mérési pontunk, amely magában foglalja a páratartalmat (h_t), a hőmérsékletet (w_t), a zajt (s_t) és a tényleges pozícióadatokat (\mathbf{p}_t), ahol t a tényleges időpontot jelöli.



3.2. ábra: Az emberi komfort szint értékelésére kidolgozott keretrendszer információs folyamata.

Ehhez a jellemzéshez meghatároztunk egy úgynevezett komfort szintet. Az érték azt mutatja, hogy az operátorok milyen mértékben képesek kezelni a környezeti terhelést a gyárterület egyes zónáiban, és mennyire érzik magukat kényelmesen ezeken a területeken. Ennek az új mutatószámoknak a mérésére egy mobil érzékelő egységet is kifejlesztettünk, amely a standard IPS-címke kiegészítéseként szolgál, hogy a mérés költséghatékonyabb legyen. Ezzel az ötlettel a gyárterületen található összes mozgó egységet, például az

3.1 Valós idejű helymeghatározó rendszerek használhatósága

AGV-eket (automatizált vezérelt járművek) vagy az AMR-eket (autonóm mobil robotok), sőt még a kifejlesztett szenzorral felszerelt anyagmozgató gépek és kézi szállító kocsik kezelőit is felhasználhatjuk.

Az eredmények alapján az IPS egy folyamatos megfigyelő rendszerként működik, amely hozzájárul a Lean szakemberek mindennapi munkájához. Első lépésként minden munkállomáson riasztórendszert lehet beállítani, amely jelzi, ha az adott állomáson a munka- vagy várakozási idő meghaladja, ill. a komfort szint (zaj, hőmérséklet, stb.) az előre meghatározott határértéket, így a gyártószervező időben megteheti a szükséges támogató intézkedéseket. Az integrált IPS alkalmazás és a folyamatbányászat támogatja a gyártószervező áttekintését, mivel képes felismerni a rejtett állomásokat és a folyamat állapotait. Ezenkívül az eredmények értékes információkat nyújtanak a gyártási elrendezés potenciálisan veszélyes vagy kockázatos területeinek azonosításához, amelyek hatással lehetnek az operátorok komfort szintjére. Az összegyűjtött adatok elemzésével azonosíthatjuk azokat a zónákat, amelyek potenciális kockázatot jelentenek az operátorok kényelmére, és megtehetjük a megfelelő intézkedéseket ezeknek a kockázatoknak a csökkentése érdekében. Továbbá, az időben összesített méréseket figyelembe véve nemcsak az expozíció térbeli eloszlását értékelhetjük, hanem az expozíció időbeli mintáit is egy adott időszak alatt.

3.1.3 Tudományos eredmények és újdonságok

A kutatás eredményeként olyan módszertan született, amely lehetővé teszi:

- az operátorok teljesítményének és komfort szintjének a folyamatos figyelemmel kísérését IPS-adatok felhasználásával,
- a gyártási folyamatokban rejtett állapotok azonosítását és az értéklánc-térképek (VSM) frissítését,
- egy új komfort szintjelző bevezetését, amely azt mutatja, hogy az operátorok milyen mértékben képesek tolerálni a különböző gyártási területeken fellépő környezeti terhelést.

A kifejlesztett IPS-alapú folyamatbányászati algoritmusok olyan további állapotokat és időbélyegeket biztosítottak, amelyeket a MES nem rögzített, így pontosabb Gantt-diagramok és Lean KPI-számítások (pl. ciklusidő, várakozási idő) készülhettek. Ezenkívül az integrált rendszer támogatja az elrendezés áttekintését és a kockázatok azonosítását azáltal, hogy kiemeli a potenciálisan veszélyes vagy a komfort szempontjából kritikus területeket.

3.1.4 A tézis alapjául szolgáló publikációk

- Tran, T. A., Ruppert, T., & Abonyi, J. (2021). Indoor positioning systems can revolutionise digital lean. *Applied Sciences*, 11(11), 5291., GS citation: 42
- Halász, G., Medvegy, T., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2023, September). Indoor positioning-based occupational exposures mapping and operator well-being assessment in manufacturing environment. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 543-555). Cham: Springer Nature Switzerland., GS citation: 1

3.2 Vizuális adat alapú tevékenységfelismerés

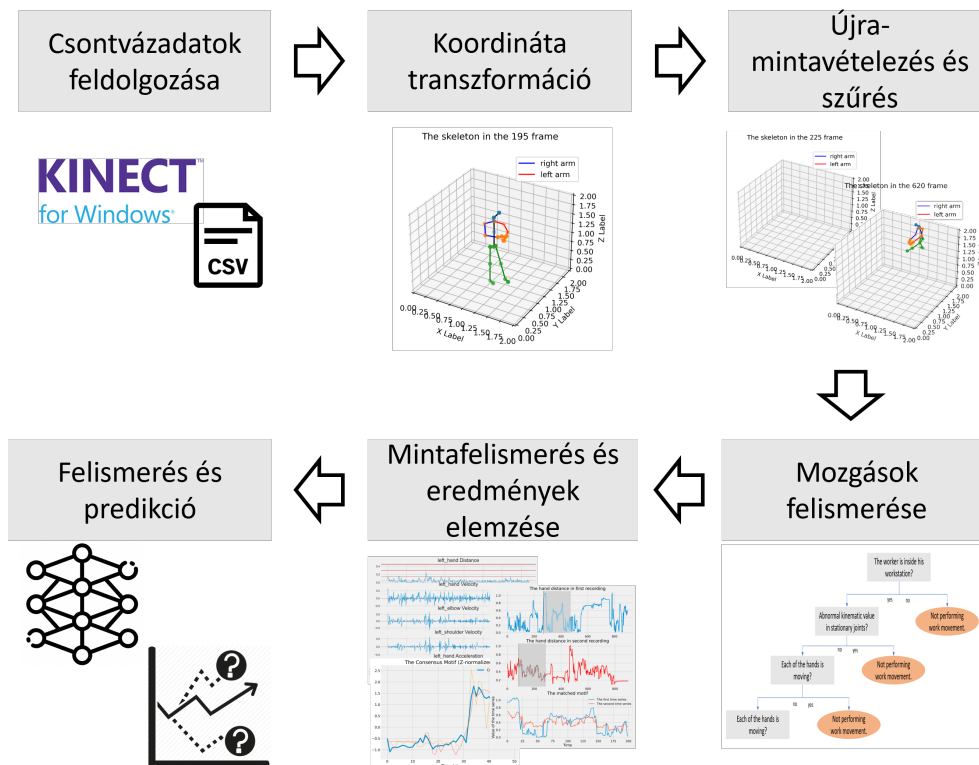
3.2.1 A kutatás háttere

A munkavállalók viselkedésének összetettségét és bizonytalanságát jobban meg lehet érteni, ha közelebbről megvizsgáljuk mozgásuk pályáját. Ez az alap megkönnyíti a részletes elemzést ergonómiai és termelékenység-növelési szempontból. A hagyományos kezdeményezések azonban kimerítő megfigyelést és előzetes ismereteket igényelnek a munkavállalókról, miközben a mozgás legtöbb részletét a szakértők szabad szemmel nem tudják nyomon követni.

A Kinect csontvázadatok alapján mintafelismerést és felügyelt tanulási algoritmusokat dolgoztunk ki a mozgásminták automatikus rögzítésére és mélyebb elemzésére, így automatikus munkaerő-teljesítményértékeléseket biztosítva, mint például az általános munkaerő-hatékonyság (Overall Labour Efficiency - OLE). A legfontosabb eredményeink a több szempontból (pl. termelékenység, ergonómia) történő automatikus értékelés és az értékelési eredmények alapján javasolt, emberközpontú fejlesztések, figyelembe véve az Ipar 5.0 célkitűzéseit. A Kinect nyers adatainak utólagos feldolgozásához Python csomagot fejlesztettünk ki. Az alkalmazást egy valós ipari szerelősoron gyűjtött adatsoron mutattuk be, bizonyítva, hogy az egyes munkaállomásokon az emberi teljesítmény értékelhető, és a gyártósor kiegyensúlyozható az egyes munkaállomásokon végzett mozdulatok optimalizálásával. Folyamatos fejlesztési ötleteket és hosszú távú humánerőforrás-fejlesztési (HRD) terveket javasoltunk. Az újdonság a gépi tanulási (ML) algoritmusok innovatív használatában rejlik, valós idejű működési modellel.

3.2.2 A kidolgozott módszerek

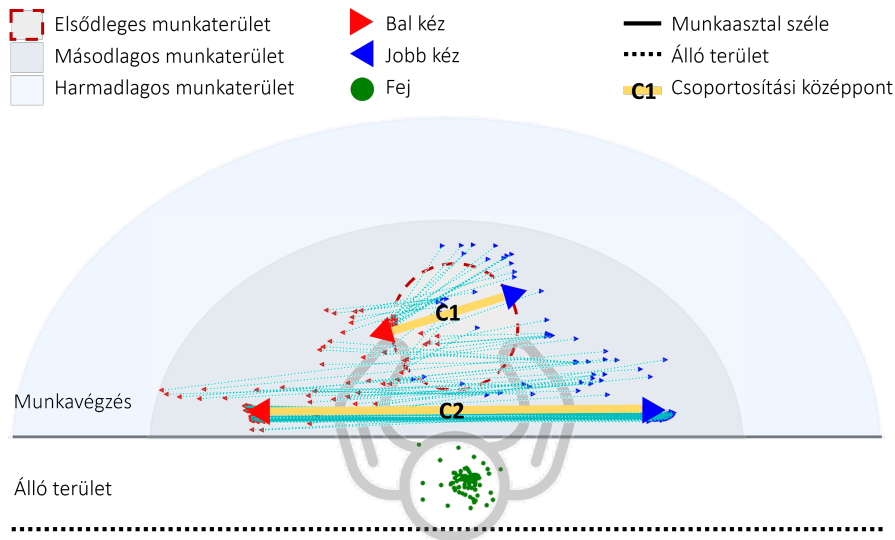
A nyers csontvázadatokat feldolgozása után koordinátaátalakítás, újramintavétel és szűrési lépések következnek. Ezek a lépések a kamera beállításain alapuló matematikai műveletek. Felügyelt tanulási algoritmusokat alkalmaztunk a munkavégzési állapot és a mozgások szegmentálására és felismerésére. Ezután motívumkereső algoritmusokat dolgoztunk ki a feltárt mozgások közötti hasonlóságok megtalálására és a szabványoktól való eltérések észlelésére. A csuklópontok idősorai és kinematikai értékeik voltak az elemzéseink középpontjában. Más munkajellemzők (pl. ciklusidő) is felismerhetők az adatokból. Minden munkával nem kapcsolatos mozgást ki kell zárni (pl. járás, várakozás, pihenés). Ez a megközelítés figyelembe veszi a munkával kapcsolatos mozgások belső jellemzőit, mint például a fej és a kezek pozícióját és kinematikáját. Például a fej mozgása nagyon alacsony sebességű, közel mozdulatlan ízület, a kezek pedig a munkavégzés során a legaktívabb ízületek. A kinematikai értékeket (azaz a sebességet) is felhasználtuk küszöbértékeként a mozgások azonosításához. Figyelembe vettük a munkaállomás egyéb jellemzőit is, például a szállítószalag geometriáját és az ergonómiai munkapozíciót.



3.3. ábra: A Kinect szenzor csontvázadatainak feldolgozására javasolt folyamatábra.

Az azonosított munkaminták alapján statisztikai jellemzők vonhatók le a humán tevékenységfelismerési (HAR) modell felépítéséhez. Az azonosított eredmény felhasználható a munkavállalók mozgásának előrejelzésére valós idejű alkalmazásokban. Az összesített eredmények összefoglalhatók az egyes munkavállalók vagy több munkavállaló teljesítményének értékelésében. Ezen értékelések alapján kidolgozhatók rövid és hosszú távú stratégiák az operátorok teljesítményének javítására, szem előtt tartva az Ipar 5.0 célkitűzéseit. A kidolgozott folyamatábra a 3.3 ábrán látható. A kidolgozott lépések a következőképpen írhatók le:

- Az operátorok a munkaállomásukon vannak-e: Az álló zóna a fej és a kéz ízületeinek pozícióadataira kNN klaszterezés alkalmazásával határozható meg, és a fej pozíciója és alacsony sebessége alapján ellenőrizhető (lásd a 3.4 ábrát).
- A munkavállaló végez-e munkát: Ha a munkavállaló dolgozik, a fejének lassan kell mozognia az álló zónán belül. Ha a munkavállaló sétál, a sebessége sokkal nagyobb, mint a munkavégzés közben.
- A munkavállaló keze mozog-e vagy sem: Az egyes kezek mozgási jellemzői, például a mozgási távolság, a sebesség és a gyorsulás alapján felismerhetők azok a képkockák, amelyeken a munkavállaló munkát végez, és nem áll tétlenül. Ezt a lépést követően létrehozható a munkavégzés idővonalala.
- A fent említett lépéseket követően meghatározhatjuk azokat a releváns képkockákat, amelyeken a munkavállaló munkamozgást végez. Ezekben az időszakokban ergonómiai értékelés alkalmazható. A megadott munkavégzési utasítás felhasználható a mozgás azonosítására, és a motívumkeresési technikák alkalmazásával megtalálható a mozgásminta.



3.4. ábra: A fej és a kéz helyzetének sémája munkapozícióban. Példaadatok egy munkaállomásról.

3.2.3 Tudományos eredmények és újdonságok

A kifejlesztett módszer lehetővé teszi:

- a munka teljesítményének automatikus értékelését több dimenzióban (pl. termelékenység, ergonómia),
- a munkával kapcsolatos mozgások felismerését és osztályozását egyéni és gyártósori szinten egyaránt,
- a gyártósorok kiegyensúlyozásának és a munkaállomások optimalizálásának javítási lehetőségeinek azonosítását.

A javasolt munkafolyamat automatizált folyamatot biztosít a HAR és OLE számításához. Az újdonság abban rejlik, hogy a felügyelt tanulás és a motívumkereső algoritmusokat valós idejű mozgáskövetéssel kombinálja, így folyamatos és objektív értékelési rendszert hoz létre. A módszertan támogatja mind a rövid távú fejlesztési intézkedéseket, mind a hosszú távú HRD stratégiákat az Ipar 5.0 paradigmán belül.

3.2.4 A tézis alapjául szolgáló publikációk

- Tran, T. A., Ruppert, T., Eigner, G., & Abonyi, J. (2023). Assessing human worker performance by pattern mining of Kinect sensor skeleton data. *Journal of Manufacturing Systems*, 70, 538-556., GS citation: 14

- Jeskó, Z., Tran, T. A., Halász, G., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2024, September). Enriching Scene-Graph Generation with Prior Knowledge from Work Instruction. In IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems (pp. 290-302). Cham: Springer Nature Switzerland. GS citation: 0

4 II. téziscsoport: Emberközpontú digitális modellek

A tudásgráfokhoz hasonló információs rendszerekkel összekapcsolt, szigorúan ellenőrzött és elemzett folyamatok fontossága egyre növekszik. Ezenkívül az operátorok integrációja sürgetővé vált a magas költségek és a társadalmi szempontok miatt. Az ember-központú gyártási rendszerek megközelítés megvalósításához megfelelő keret szükséges, amely hatékony adatcserét tesz lehetővé egy rendkívül összetett gyártási hálózatban, az erőforrások és információk kihasználása érdekében. Ezenkívül az emberi és gépi szereplők közötti együttműködés folyamatos fejlesztése alapvető fontosságú az ipari kiberfizikai rendszerek számára, mivel a munkaerő az egyik legrugalmasabb és leginkább alkalmazkodóképes gyártási erőforrás. Az emberi digitális iker szükségessége is felmerül, de ennek megvalósításához gondosan ki kell dolgoznunk azokat az adatmodelleket, amelyek az ipari környezetben emberközpontú módon figyelembe veszik az emberi tényezőket. Az Asset Administration Shell (AAS) egy jól megtervezett megközelítés a digitális iker fejlesztéséhez, amely kiemeli az emberi AAS (HAAS) igényét.

4.1 Human-Asset Administration Shell

4.1.1 A kutatás háttere

Az Ipar 4.0-hoz kapcsolódó technológia gyors fejlődése paradigmaváltást hozott az eszközökkel való interakciók módjában különböző területeken. Ez a fejlődés vezetett az Emberi Digitális Iker (Human Digital Twin - HDT) koncepció megjelenéséhez, amely egy személy kognitív, pszichológiai és viselkedési jellemzőinek virtuális ábrázolása. A HDT stratégiai eszközként bizonyította potenciálját a termelékenység, a biztonság és az együttműködés javításában az ember-központú gyártási rendszereken belül. Kutatásom két fő területre összpontosít, amelyek az ipari digitalizációra való átállás során merülnek fel, és megoldásokat javasol rájuk: „Mekkora kognitív terhelést jelenthet egy adott feladat az operátor számára, és mi az a kognitív határ, amelyet az operátor nem léphet túl, hogy a feladatot a legjobb teljesítmény mellett végezze el?”, figyelembe véve az egyéni

képességeket, valamint „Az első kérdés eredményei alapján szükséges-e szabályozni a feladat kognitív terhelését, és ha igen, hogyan?”.

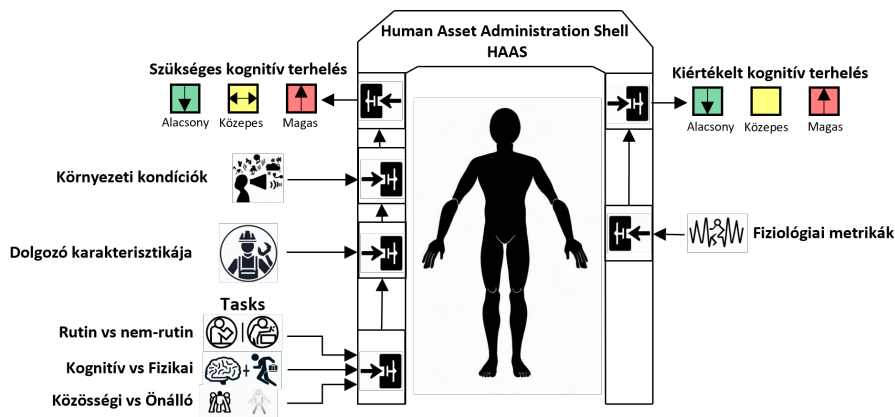
4.1.2 Alkalmazott módszerek

Hét fő modult azonosítottunk: a feladat, a munkavállalói készségek, a környezeti feltételek, a pszichológiai állapot, a kinematikai paraméterek, az antropometriai paraméterek és a fiziológiai mutatók. Kutatásom újdonsága négy modulon alapul: a fiziológiai mutatókon (GSR és HRV) a munkavállaló kognitív terhelésének értékeléséhez és alacsony, közepes vagy magas besorolásához, míg a másik három modul, a feladat, a munkavállaló készségei és a munkavállalót körülvevő környezeti feltételek a szükséges kognitív terhelés becsléséhez és szintén alacsony, közepes vagy magas besorolásához használatosak, hogy összehasonlítsák a munkavállaló értékelte kognitív terhelésével.

A kifejlesztett modell egy olyan folyamatot biztosít, amely a GSR-t fiziológiai markerként használva követi nyomon az emberi kognitív terhelést, és egy újszerű módszert javasol a kognitív terhelés kezelésére a kibővített Human Asset Administration Shell (HAAS) alapján. A javasolt HAAS keretrendszer integrálja a hordható érzékelőkből származó valós idejű adatfolyamokat, a felhasználói készségeket, a kontextus információkat, a feladat sajátosságait, valamint a környezeti és környező feltételeket, hogy átfogó képet adjon az egyén kognitív állapotáról, fizikai jólétéről és készségeiről. A készségek, a fizikai, fiziológiai és pszichológiai változók, valamint a feladatparaméterek beépítésével a kifejlesztett HAAS keretrendszer lehetővé teszi az egyéni képességek azonosítását, kezelését és fejlesztését, ezáltal elősegítve az egyénre szabott képzést és a tudáscserét.

Az általunk javasolt HAAS modell négy alapvető modulra épül, amelyek alapját képezik a modell felépítésének és működésének. Ezek a modulok a fiziológiai paramétereket, a munkavállalók jellemzőit, a feladat típusát és szintjét, valamint a környezeti feltételeket tartalmazzák. Amint az a 4.1 ábra jobb oldalán látható, a fiziológiai mutatók a GSR- és HRV-adatokra koncentrálnak, amelyeket a feladatot végző egyénekre helyezett érzékelőkkel mérnek. Ez a kulcsfontosságú modul rögzíti ezeket a paramétereket, majd értékeli és három mérhető kategóriába sorolja a kognitív terhelést: alacsony, közepes és magas, amint az a jobb felső sarokban, a „Kiértékelt kognitív terhelés” alatt látható.

A 4.1 ábra bal oldalán három modul látható: a munkavállalók jellemzőinek modulja, amelynek célja, hogy hatékonyan rögzítse az egyes munkavállalók egyedi készségeit és jártasságait, és felismerje, hogy az egyéni képességek nagyban eltérhetnek egymástól. Ez a modul az egyes munkavállalók képességeinek előzetes értékelése alapján frissül, mielőtt azok konkrét feladatokba kezdenének. A feladat típusa és szintje a kidolgozott modell



4.1. ábra: A javasolt kiterjesztett HAAS modell

másik modulja. Ez a modul nemcsak a feladat kategóriáját veszi figyelembe, hanem a munkavállaló veleszületett készségeit és képességeit is beépíti az elemzésébe. Például egy kognitív igényeket támasztó feladatot két, eltérő fizikai erővel rendelkező munkavállaló eltérően értelmezhet, ami jól illusztrálja, hogy egy feladat komplexitása sokrétű. Modelünk utolsó modulja a környezeti feltételek, amely kezeli a külső tényezők döntő szerepét a kognitív terhelés meghatározásában. Ez a modul folyamatosan figyelemmel kíséri és kiigazítja a környezet változásait, például a zajt, a hőmérsékletet stb. A bal oldalon található modulok a bevitt adatok alapján három szintre becsülik a szükséges kognitív terhelést: alacsony, közepes és magas, amint az a bal felső sarokban a „Szükséges kognitív terhelés” alatt látható. Ezzel a négy modulal a kibővített HAAS-modell dinamikus kölcsönhatást hoz létre. Az értékelt és a szükséges kognitív terhelés összehasonlításával a feladatok és a környezeti feltételek modulálását célozza, biztosítva az optimális munkavállalói kényelem és a megnövekedett termelékenység közötti egyensúlyt.

4.1.3 Tudományos eredmények és újdonságok

A kifejlesztett HAAS-modell:

- lehetővé teszi az operátor kognitív terhelésének valós idejű értékelését fiziológiai és kontextuális adatok alapján,
- becsüli a feladathoz kapcsolódó kognitív igényeket, és összehasonlítja azokat az egyéni kognitív állapotokkal,
- dinamikusan javasolja a feladat és a környezet módosítását az optimális kognitív terhelés szintjének fenntartása érdekében.

4 II. téziscsoport: Emberközpontú digitális modellek

Az újdonság abban rejlik, hogy a hagyományos AAS koncepciót kiterjesztettük az eszközök közötti interoperabilitáson túl a feladatparaméterek és a környezeti feltételek aktív manipulációjára, lehetővé téve az emberközpontú optimalizálást az ember-központú gyártási rendszerekben. A kognitív, fiziológiai és kontextuális dimenziók integrálásával a modell támogatja az egyénre szabott képzést, a tudáscserét és az emberi képességek folyamatos fejlesztését.

4.1.4 A tézis alapjául szolgáló publikációk

- Eesee, A. K., Jaskó, S., Eigner, G., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2024). Extension of haas for the management of cognitive load. *IEEE Access*, 12, 16559-16572. GS citation: 7
- Cutrona, V., Bonomi, N., Montini, E., Ruppert, T., Delinavelli, G., & Pedrazzoli, P. (2024). Extending factory digital Twins through human characterisation in Asset Administration Shell. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 37(10-11), 1214-1231. GS citation: 25

4.2 Tudásgráfok az emberközpontú gyártáshoz

4.2.1 A kutatás háttere

A kollaboratív robotok gyártási folyamatokba való integrálása, más néven ember-robot kollaboráció (Human-Robot Collaboration - HRC), jelentős előrelépést jelent az Ipar 4.0 területén. A hagyományos ipari robotokkal ellentétben, amelyek izolált cellákra korlátozódnak, a kollaboratív robotok úgy vannak kialakítva, hogy beágyazott interakciós, érzékelő és biztonsági technológiák segítségével emberekkel együtt dolgozhassanak. Ez lehetővé teszi egy hibrid gyártási környezet létrehozását, ahol az emberi és robot erőforrások dinamikusan oszthatók el a termelékenység, a rugalmasság és az átalakíthatóság optimalizálása érdekében. A HRC-környezetek célja a kézi és robotizált szerelősorok korlátainak leküzdése egy újszerű megközelítéssel a feladatok elosztására és végrehajtására, amely javítja a gyártás általános hatékonyságát és alkalmazkodóképességét.

A folyamatinformációk kezeléséhez szemantikus hálózatok és gráf alapú elemzések használata ajánlott, linkelt adatfunkciók alkalmazásával. A tudásgráf technikák képesek adatokat kivonni strukturált, félig strukturált vagy strukturálatlan forrásokból, majd ezeket az információkat beépíteni egy gráf alapú tudásreprezentációba. Az operátorok munkakörülményeinek javítása érdekében különböző monitoring rendszerek, például érzé-

kelőhálózatok használhatók az operátorok mozgásának és fizikai állapotának figyelemmel kísérésére, lehetővé téve a teljesítménymutatók értékelését.

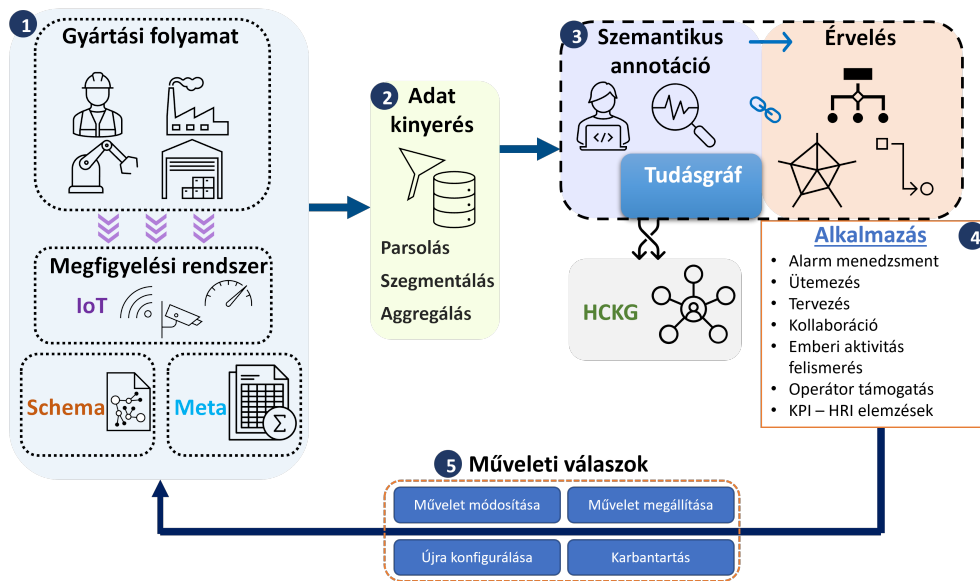
4.2.2 Alkalmazott módszerek

Ontológiák és szabványok adaptálásával kifejlesztettünk egy emberközpontú tudásgráf (Human-centric Knowledge Graph - HCKG) keretrendszert, amely modellezi az operátorral kapcsolatos tényezőket, például a mozgások figyelemmel kísérését, a munkakörülményeket vagy a robotokkal való együttműködést. Emellett egy ipari esettanulmányon keresztül bemutattuk a gráf alapú adatlekérdezést, vizualizációt és elemzést. A munka fő hozzájárulása egy tudásgráf-alapú keretrendszer, amely az operátor által végzett munkára összpontosít, beleértve a mozgások értékelését, a gépekkel való együttműködést, az ergonómiát és egyéb feltételeket. Ezenkívül a keretrendszer használatát egy komplex, gyártósoron alapuló esettanulmányban mutatjuk be, példák az erőforrás-elosztásra és a gyárterületen dolgozók közötti együttműködés szempontjából nyújtott átfogó támogatásra.

Az elsődleges hozzájárulás egy HCKG néven bevezetett keretrendszer, amely ontológiát és szabványokat használva modellezi az emberi operátorral kapcsolatos elemeket, mint például a mozgás figyelése, a munkakörnyezet és a robotokkal való együttműködés. A keretrendszert egy ipari esettanulmányon keresztül szemléltettük, és grafikon alapú adatlekérdezést, vizualizációt és elemzést tartalmaz. Egy komplex kábelköteg-összeszerelési folyamatot bemutató példán keresztül illusztráltuk az erőforrás-elosztás és az ember-gép együttműködés átfogó támogatásának példáit.

A HCKG tervezési koncepció célja egy keretrendszer létrehozása az ember-gép együttműködés figyelemmel kísérésére és irányítására, a rugalmasság javítására, valamint az operátorok munkakörülményeinek javítására. A tudásgráf magában foglalja az operátor tevékenységével, a környezettel, valamint a gyártási térben található összes robottal és berendezéssel kapcsolatos figyelemmel kísért adatokat. A tudásgráfban összegyűjtött adatok elemzésével javítható az együttműködés, testreszabhatók a operátor számára a munkautasítások, és adaptív módon kezelhetők az esetleges módosítások. A 4.2 ábra szemlélteti a HCKG koncepció integrációs megközelítését.

Részletes esettanulmány készült, amely alaposan figyelembe veszi az operátorok által végzett feladatokat, beleértve a mozgásértékelést, a gépekkel való együttműködést, a munkasorrendet és az ergonómiai szempontokat. Hangsúlyozzuk továbbá, hogy az aktivitásfelismerő technológiák integrálása gazdagíthatja a tudásgráfban található értékes adatokat egy intelligens gyár környezetben. Célunk az volt, hogy összefoglaljuk a



4.2. ábra: A HCKG tervezési koncepció integrálása a gyártási folyamattal, öt szegmens felhasználásával

szemantikai fejlesztés jelenlegi módszereit és eszközeit, és bemutassunk egy koncepciót az emberközpontú együttműködés szabványos modelljeinek létrehozására, amelyet egy ipari esettanulmányon keresztül illusztráltunk.

4.2.3 Tudományos eredmények és újdonságok

A legfontosabb eredmények a következők voltak:

- hangsúlyoztuk a humán tényezők kiber-fizikai rendszerekbe való beépítésének fontosságát,
- javasoltuk az automatizálási szabványok (ISA-95, AutomationML, B2MML) kiterjesztését az emberrel kapcsolatos folyamatok beépítésével, és bemutattuk a szemantikai technológiák használatát,
- a koncepciót egy megismételhető ipari esettanulmányon keresztül validáltuk. Különböző típusú gráfok, például normál, irányított vagy hipergráfok felhasználásával különböző gráfolapú elemzéseket végeztünk, beleértve az erőforrás-elosztási elemzést, a KPI értékelést és a DAS integrációját,
- a HCKG-n alapuló alkalmazás megkönnyítette az összeszerelési folyamatban az emberek és a gépek közötti különböző együttműködési formák azonosítását.

4.2.4 A tézis alapjául szolgáló publikációk

- Nagy, L., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2024). Knowledge Graph-Based Framework to Support Human-Centered Collaborative Manufacturing in Industry 5.0. *Applied Sciences*, 14(8), 3398. GS citation: 8
- Tóth, A., Nagy, L., Kennedy, R., Bohuš, B., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2023). The human-centric Industry 5.0 collaboration architecture. *MethodsX*, 11, 102260. GS citation: 72
- Nagy, L., Ruppert, T., & Abonyi, J. (2022, September). Human-centered knowledge graph-based design concept for collaborative manufacturing. In 2022 IEEE 27th international conference on emerging technologies and factory automation (ETFFA) (pp. 1-8). IEEE. GS citation: 18
- Nagy, L., Ruppert, T., Löcklin, A., & Abonyi, J. (2022). Hypergraph-based analysis and design of intelligent collaborative manufacturing space. *Journal of Manufacturing Systems*, 65, 88-103. GS citation: 23

5 III. téziscsoport: Emberközpontú mutatók és fiziológiai paraméterek

A gyártási környezetben végzett fiziológiai adatokra vonatkozó kutatások továbbra is korlátozottak, és szembeűnő a megbízható alapadatok és átfogó adatbázisok hiánya. E hiányosság orvoslására kognitív pszichológusokkal együttműködve több kontrollált kísérletet terveztem és hajtottam végre laboratóriumunkban, amelyek gyártással kapcsolatos helyzeteket szimuláltak. Ezen tanulmányok célja az volt, hogy szilárd alapot teremtsenek a fiziológiai mérések integrálásához az emberközpontú ipari kutatásba.

5.1 Kognitív terhelés a feladatok végrehajtása során

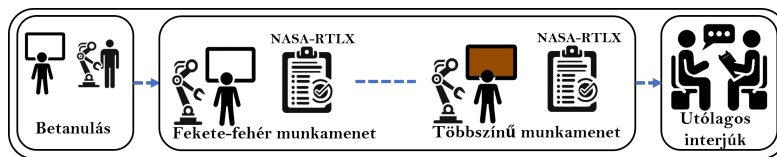
5.1.1 A kutatás háttere

Multitasking környezetben vizsgáltuk a figyelem mérésének a vizsgálhatóságát az ember-robot együttműködésen alapuló összeszerelésben. Kísérleti tanulmányt végeztünk, amelyben a résztvevők egy kobottal végrehajtottak egy vezetékbekötési feladatot, miközben egyidejűleg egy Go/No-Go teszt segítségével egy párhuzamos, figyelmet igénylő feladatot is elvégeztek. A multitasking hatásainak értékeléséhez két nehézségi szintű Go/No-Go tesztet terveztünk a figyelmet igénylő feladatok tekintetében. 16 résztvevővel végeztünk felhasználói tanulmányt, és kvantitatív mutatókat gyűjtöttünk a feladat teljesítéséről és a válaszadási arányokról, valamint kvalitatív visszajelzéseket, hogy értékeljük a másodlagos figyelmet igénylő feladatok elvégzésének képességét.

A multitasking hatásának megfigyelése érdekében a másodlagos feladat nehézségét két szinten változtattuk, és elemeztük annak hatását a munkateljesítményre és a munkaterhelésre. Eredményeink megerősítik a szálakba rendezett kognitív elméletet, amely szerint az ember-robot együttműködés csökkentheti a kognitív kapacitást azáltal, hogy kiterjeszti a figyelemi erőforrásokat, ami több hibához és hosszabb ciklusidőhöz vezet a multitasking során. Ez alátámaszta az ember-robot együttműködés figyelemi tényezőinek részletes megértésének fontosságát.

5.1.2 Kísérlet tervezése

A kísérletet úgy terveztük meg, hogy megossza a résztvevők figyelmét, és egy valóság-hű összeszerelési helyzetet teremtsen, amelyben a résztvevőknek egyensúlyt kellett teremteniük a fő feladat figyelmi terhelése és a másodlagos feladat követelményeinek teljesítése között, hogy szimulálják a multitaskingot. A fő feladat egy UR5e cobot segítségével végzett vezetékköteg-szerelés volt, míg a másodlagos feladat egy Go/No-Go teszt volt, amely megnövelte a figyelemigényt. A kísérleti tanulmányt a Pannon Egyetem Ipar 5.0 laboratóriumában végeztük el. Az 5.1 ábra szemlélteti a kutatásban használt kísérleti folyamatot.



5.1. ábra: A vizsgálat felépítésének és eljárásának áttekintése. A feladatok sorrendje kiegyensúlyozott volt: 8 résztvevő a fekete-fehér feltételekkel kezdte, 8 pedig a többszínű munkamenettel.

5.1.3 Tudományos eredmények és újdonságok

Kísérleteink eredményei arra utalnak, hogy a többfeladatos helyzetek hosszabb ciklusidőket és potenciálisan még több hibát is eredményezhetnek, és az operátorok kénytelenek lehetnek alkalmazkodni a figyelmi terheléshez azáltal, hogy csak az egyik feladatot részesítik előnyben. Bár a HRC-ben a többfeladatos munkavégzést megvalósíthatónak tartjuk, eredményeink felhívják a figyelmet a termelékenységre gyakorolt potenciális hatások miatt, és további kutatásokat szorgalmazunk olyan HRC-alkalmazások tervezésére, amelyek nem merítik ki az operátoroknak figyelmi erőforrásait .

Eredményeink azt is mutatják, hogy a HRC-környezetben végzett multitasking során a résztvevők alkalmazkodhatnak stratégiájukhoz, és prioritást adhatnak az egyik feladatnak a másik rovására, ami több hibához vezethet az adott feladatban. Feltételezzük, hogy ez vagy a figyelem több feladat között való megosztásának nehézségéből, vagy egyszerűen abból adódik, hogy az egyik feladat hatékonyságának maximalizálását részesítik előnyben, miközben a másik feladat hatékonyságát feláldozzák.

5.1.4 A tézis alapjául szolgáló publikációk

- Eese, A. K., Kostolani, D., Kang, T., Schlund, S., Medvey, T., Abonyi, J., & Ruppert, T. (2024). May I Have Your Attention?! Exploring Multitasking in Human-Robot Collaboration. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), 241-246. GS citation: 2
- Eese, A. K., Kostolani, D., Varga, V., Kang, T., Schlund, S., & Ruppert, T. (2025, June). Studying Dual-Task Awareness in Industrial Settings Through Reaction Times and Physiological Signals. In *2025 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)* (pp. 151-156). IEEE. GS citation: 0

5.2 Munkautasítások értékelése

5.2.1 A kutatás háttere

Az ipari környezetben a rosszul megtervezett munkautasítások jelentősen ronthatják a termelékenységet, növelhetik a hibák valószínűségét és csökkenthetik az általános munkával való elégedettséget. Ezenkívül a rossz utasítások káros gazdasági és társadalmi következményeit széles körben dokumentálták, amelyek az felhasználó-elégedettség csökkenéséhez, a működési költségek növekedéséhez és a döntéshozatali folyamatok hatékonyságának romlásához vezetnek. Bár számos tanulmány vizsgálta az egyszerűsített vagy digitális munkautasítások – például szöveges útmutatók vagy kiterjesztett valóság (AR) alapú megoldások – előnyeit, ezek a megközelítések gyakran nem validálják szisztematikusan az objektív mutatókat a munkavállalók szubjektív tapasztalataival az alkalmazott utasítások alapján. A szubjektív kérdőíveket és objektív fiziológiai mutatókat integráló kutatások, amelyek átfogóan értékelik a munkavállalók kognitív terhelését és hatékonyságát a munkautasítások alapján, továbbra is korlátozottak. Ez a hiányosság különösen sürgető a modern összeszerelő környezetben, ahol a feladatok növekvő komplexitása olyan munkautasítások kidolgozását igényli, amelyek mind kognitív szempontból átgondoltak, mind pedig működési szempontból hatékonyak.

5.2.2 A kidolgozott módszerek és a kísérlet tervezése

Szisztematikusan összehasonlítottunk két különböző utasítás-megközelítést – a kódalapút és a vizuális alapút – egy szerelés jellegű forgatókönyvben. Konkrétan azt a hipotézist állítottuk fel, hogy a kódalapú utasítások, amelyek alfanumerikus kódokra támaszkodnak a szerelési folyamat irányításához, nagyobb szubjektív kognitív terhelést jelentenek, mivel

a kódok dekódolásához nagyobb mentális erőfeszítésre van szükség. Ezzel szemben a vizuális alapú utasítások várhatóan csökkentik a kognitív terhelést, mivel ugyanazokat a feladatokat intuitívabb, grafikus ábrázolással mutatják be. Ez az egyszerűsített megközelítés azonban gyakrabban igényel kézmozdulatokat és ismételt feladatciklusokat, ami a megnövekedett fizikai aktivitás miatt potenciálisan jelentősebb változásokat eredményezhet a fiziológiai jelekben (galvanikus bőrreakció, GSR és fotopletizmogram, PPG). Ezeknek a hipotéziseknek az értékelése során mind a szubjektív kognitív terhelést (a NASA Task Load Index „NASA_TLX” és a rövid Dundee Stress State Questionnaire „short DSSQ” segítségével), mind az objektív mutatókat (fiziológiai jelek és feladatvégzési mutatók) mérjük, hogy átfogó képet kapjunk arról, hogyan befolyásolják a munkautasítások az operátorok jólétét és hatékonyságát. Ezért a következő kutatási kérdést tettük fel: *Hogyan illeszkednek a kognitív terhelés és a teljesítmény szubjektív észlelései a kognitív terhelés és a teljesítmény objektíven mért változásaihoz, amikor különböző utasítási módszereket alkalmaznak?*

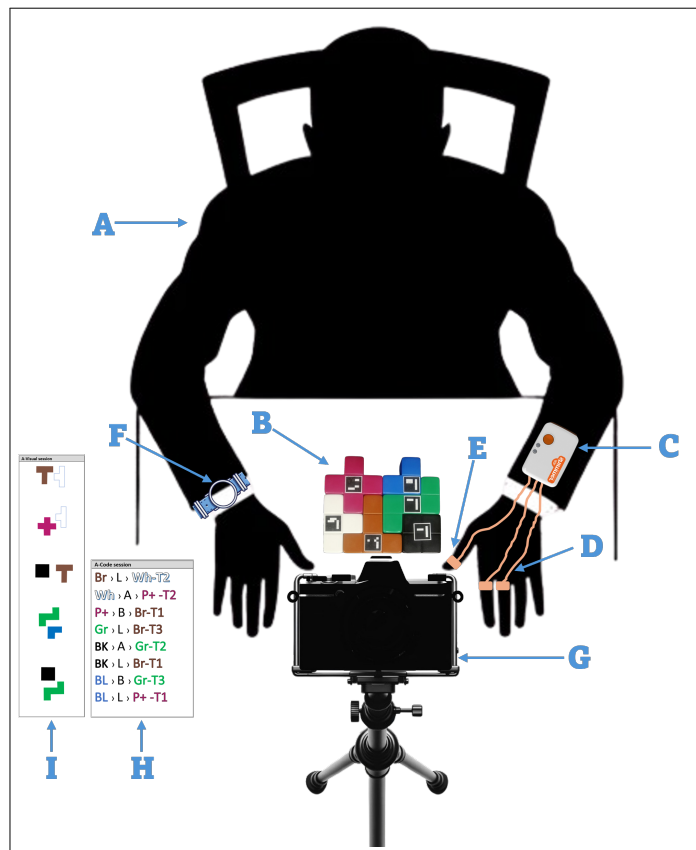
A szakirodalomban azonosított hiányosságok miatt olyan kontrollált kísérletet terveztünk, amelyben a résztvevők kétféle utasítási módszerrel – kódalapú és vizuális utasításokkal – szerelték össze a „Make »N« Break Extreme” építőelemeket. Ezt a protokollt kifejezetten azért választottuk, hogy elkülönítsük a külső terhelést, miközben a feladatok során konzisztens belső terhelést tartunk fenn. A munkánk célja volt, hogy kontrollált, összeszereléshez hasonló helyzetben vizsgáljuk a munkautasítások hatását az operátorok kognitív terhelésére és teljesítményére.

A tanulmány két különböző utasítási megközelítést alkalmazott: *Vizuális* utasításokat az alacsony kognitív terhelés és *Kódalapú* utasításokat a magas kognitív terhelésű mérésen. A vizuális alapú munkamenetben a résztvevők egy sor lépésről lépésre bemutató képet láttak, amelyek pontosan ábrázolták, hogyan kell összekapcsolni az egyes blokkokat. Más szavakkal, minden kép egyértelműen megmutatta, hogy a darabok melyik oldala érintkezzen, lehetővé téve a résztvevők számára, hogy vizuálisan igazítsák a blokkokat, amíg azok meg nem felelnek az ábrázolt mintának. Az ebben a kontextusban bemutatott vizuális utasítások egyértelműségükkel jellemezhetők, mivel egyszerű és egyértelműen ábrázolják a végső célt. Ez a megközelítés célja, hogy minimálisra csökkentsék a résztvevők értelmezési erőfeszítéseit.

A másik esetben színelapú kódrendszert használtunk az összeszerelési utasításokhoz, hogy növeljük a kódalapú nehéz feladat nehézségi szintjét. Egy kód, amely általában a szín első két betűjéből áll, hivatkozik az egyes darabokra. Például a „Re” a piros darabot jelöli, és piros szöveggel jelenik meg, míg a „Gr” a zöld darabot jelöli, és zöld szöveggel jelenik meg. A munkautasítás ezeket a kódokat biztosítja a résztvevőknek, amelyeket

5 III. téziscsoport: Emberközpontú mutatók és fiziológiai paraméterek

felhasználva meg kell határozniuk a darabok pozícióját és érintkezési pontjait. A darabok közötti térbeli viszonyokat „A” jelöli a „fölött”, „B” az „alatt”, „L” a „balra” és „R” a „jobbra” jelentéssel. A két szomszédos darab közötti érintkezés mértékét „T1”-gyel jelöljük egy érintkezési terület esetén, és fokozatosan növeljük „T4”-ig négy érintkezési terület esetén. A kódok megkövetelik a résztvevőktől, hogy az absztrakt utasításokat a blokkok összeállításának konkrét feladatává alakítsák át, ami tükrözi a valós életben gyakran előforduló kognitív terhelést, amikor az ilyen utasítások értelmezése kihívás lehet. Az 5.2 ábra bemutatja a kutatásban végzett kísérlet felépítését.



5.2. ábra: Ez az ábra szemlélteti a kísérletünkben használt átfogó felépítést.

5.2.3 Tudományos eredmények és újdonságok

Kutatásunk új betekintést nyújt a munkautasítások kialakítása és az operátorok kognitív terhelése közötti kapcsolatba ipari jellegű összeszerelési helyzetekben. A legfontosabb tudományos hozzájárulások és újdonságok a következők:

1. **Integrált értékelési megközelítés:** Szisztematikusan kombináltuk a szubjektív munkaterhelés-értékelő eszközöket (NASA-TLX és rövid DSSQ) az objektív fiziológiai mérőeszközökkel (galvanikus bőrreakció és fotopletizmogram) és a feladatvégzési mutatókkal, hogy átfogó képet kapjunk a szerelési feladatok során fellépő kognitív terhelésről.
2. **Kísérleti bizonyítékok az utasítások típusairól:** Két különböző utasítástípust – a vizuális és a kódalapú módszert – összehasonlító kontrollált kísérletet terveztünk és hajtottunk végre. Eredményeink azt mutatják, hogy a vizuális utasítások jelentősen csökkentik a szubjektív kognitív terhelést, míg a kódalapú utasítások magasabb mentális igénybevételt jelentenek, mivel az absztrakt kódokat konkrét cselekvésekre kell dekódolni és lefordítani.
3. **A kognitív és fizikai terhelés közötti kompromisszumok feltárása:** Bár a vizuális alapú utasítások csökkentették a kognitív terhelést, azok a kézmozdulatok számának növekedésével és a feladatciklusok ismétlésével jártak, ami a fiziológiai jelekben is megmutatkozott. Ez rávilágít a munkaterhelés kognitív és fizikai dimenziói közötti kompromisszumra, amelyet a szakirodalom nem tárgyal kellőképpen.
4. **Gyakorlati következmények az utasítások tervezése szempontjából:** Eredményeink megvalósítható bizonyítékot nyújtanak a kognitív szempontokat figyelembe vevő és működési szempontból hatékony munkautasítások kidolgozásához a modern ipari környezetben, különösen ott, ahol a feladatok összetettsége növekszik.

E munka újdonsága a holisztikus módszertani megközelítésében, a munkautasítások által kiváltott munkaterhelés-különbségek empirikus validálásában, valamint a kognitív terhelés szubjektív és objektív mutatói közötti interakciós hatások azonosításában rejlik.

5.2.4 A tézis alapjául szolgáló publikációk

- Eesee, A. K., Varga, V., Eigner, G., & Ruppert, T. (2025). Impact of work instruction difficulty on cognitive load and operational efficiency. *Scientific Reports*, 15(1), 11028. GS citation: 0
- Gugolya, M., Varga, V., Medvegy, T., & Ruppert, T. (2025, August). The Impact of Work Instruction Simplification on Operator Performance and Learning Curve Efficiency. In *IFIP International Conference on Advances in Production Management Systems* (pp. 148-162). Cham: Springer Nature Switzerland. GS citation: 0

6 Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Abonyi Jánosnak, hogy évtizedekkel ezelőtt bátorított arra, hogy elinduljak ezen az úton. Kedves Ipar 5.0 Labor, nagyon köszönöm mindenkinek.