



MTA  
SZTAKI



## **New solutions in Incremental Sheet Forming**

## **Új módszerek az inkrementális lemezalakításban**

Tézisfüzet

**Paniti Imre**

okleveles gépészmérnök

Témavezetők:

Ábrahám György, DSc (BME MOGI)

Haidegger Géza, PhD (MTA SZTAKI)

Budapest, 2014.

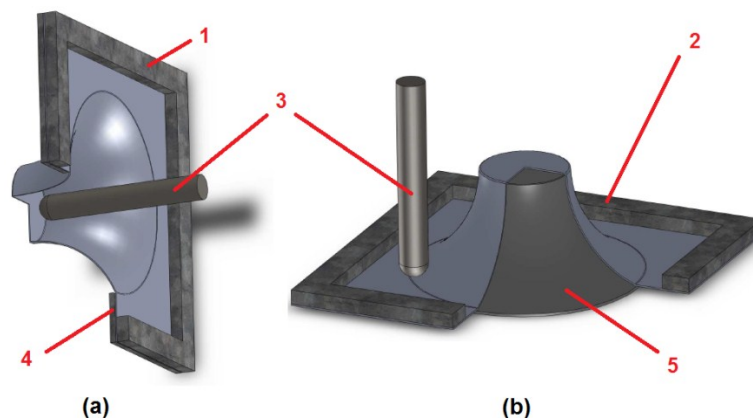
## Bevezetés

Az elmúlt években egy újfajta képlékenyalakítási eljárás, az úgynevezett inkrementális lemezalakítás (Incremental Sheet Forming - ISF) kapott egyre nagyobb visszhangot a fémek képlékenységével foglalkozók körében.

Az inkrementális lemezalakítás egy, a fémnyomáshoz hasonló eljárás, eredete egy 1967-es szabadalomra vezethető vissza, ugyanakkor a megvalósítását (a technológia feltételek hiányában) csak az 1990-es években kezdték el. Fémnyomással ellentétben, ahol a fémlemez egy esztergagéppel forgatva és egy szerszámmal folyamatosan nyomva alakul át egy axiálisan szimmetrikus tárggyá, az inkrementális lemezalakításnál a terítéket egy ráncgátlóval leszorítják és az alakítást általában egy gömbfejű alakítóbélyeggel végzik.

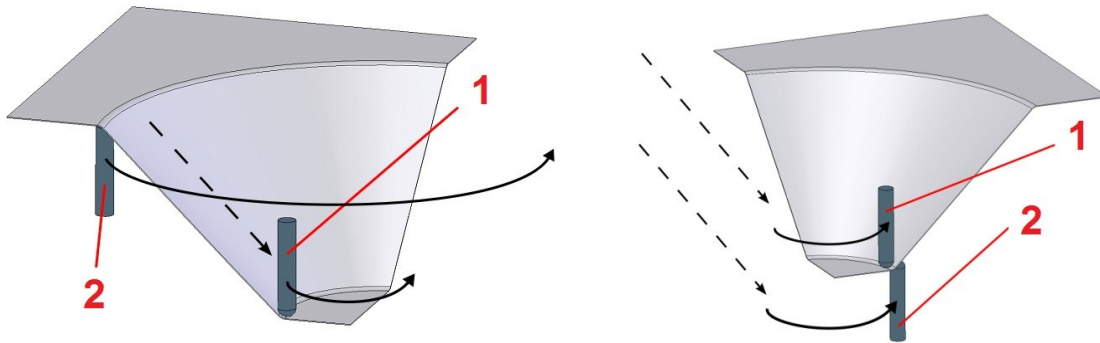
A szokványos képlékenyalakítási eljárásokkal ellentétben a munkadarab végleges alakját nem egy specifikus matrica határozza meg, hanem az "univerzális" alakítóbélyeg három-dimenzióban történő mozgatása, amihez egy, a munkadarab geometriájának megfelelő szerszámpályát kell létrehozni. Ez a mozgatás történhet CNC vezérlésű marógéppel, vagy ipari robottal. Míg a hagyományos sajtolószerszám tervezése, annak legyártása, később a főlöslegessé vált szerszám tárolása/megsemmisítése komoly költségeket jelent, addig az inkrementális lemezalakítás olcsóbb, nagyobb alakváltozást tesz lehetővé és környezetbarát.

Természetesen csak kis sorozatszámú termékek esetén, vagy gyors prototípusgyártásnál kifizetődő ez a relatív lassú eljárás, de lehetséges alkalmazása széleskörű az autóipar, a légi ipar, az építészet és a gyógyászati segédeszközök gyártásának területén. Az elmúlt években az inkrementális lemezalakítással kapcsolatos kutatások középpontjában az eljárás határainak megismerése, modellezése, a munkadarabok geometriai pontosságának növelése, további anyagok alkalmazhatósági vizsgálata és a szerszámpályák optimalizálása volt. Az eljárás alapváltozatait az 1. ábra szemlélteti.



**1. ábra:** (a) egyponos -, (b) kétponos ISF, ahol 1: álló ráncgátló, 2: mozgó ráncgátló, 3: alakító bélyeg, 4: alátámasztó lemez, 5: álló/mozgó teljes/részleges alátámasztás

A kétpontos inkrementális lemezalakítás egy speciális továbbfejlesztése a mozgatott ellenbélyeggel történő inkrementális lemezalakítás, amelynél két alapvető megmunkálási stratégia ismert („A és B típusú” – 2. ábra). Az „A típus” esetében az ellenbélyeg a támasztó lap szerepét tölti be, együtt mozog az alakítóbélyeggel, de nem hagyja el a szerszámhály kezdő síkját. „B típus” esetében az ellenbélyeg együtt mozog az alakítóbélyeggel, biztosítva a folyamatos alátámasztást.



2. ábra: „A” és „B” típusú megmunkálási stratégia illusztrációja, ahol  
1: alakítóbélyeg, 2: ellenbélyeg

## A kutatás célja

Kutatási munkám az inkrementális lemezalakítás technológiai szempontú fejlesztésére irányul. Célom olyan új inkrementális lemezalakítási eljárások és mérési módszerek kifejlesztése, modellezése és megvalósítása, amelyek pontosabbá és hatékonyabbá tehetik az ilyen jellegű lemez megmunkálást.

Ennél az eljárásnál fontos a lemeztvékonyodás közvetett, vagy közvetlen meghatározása a lemez elszakadásának elkerülése céljából. Anizotróp, inhomogenitásokkal, anyaghibákkal rendelkező lemezek esetén a közvetlen mérési módszer a célravezető.

Kérdés, hogy milyen módszerrel mérhető közvetlenül a lemeztvékonyodás és miként lehet beavatkozni a megmunkálási folyamatba.

További megválaszolandó kérdés a munkadarab minősége szempontjából megfelelő szerszámhály meghatározása és alkalmazása, illetve az adaptív vezérlés megvalósítása.

Mivel az eddigi eljárások numerikus szimulációja a szakirodalom és a tapasztalatok alapján időigényes, ezért főleg alakítási kísérletekkel szeretném az új megmunkálási stratégiákat tesztelni és összehasonlítani.

Továbbá célom a meleg légárammal segített inkrementális lemezalakítás kidolgozása hőre lágyuló polimer lemezek megmunkálására.

## **A vizsgált anyagok és vizsgálati módszerek**

Kutatásaimhoz alumínium (Al1050), PVC és PE-HWST lemezeket használtam.

Egyes lemezek mechanikai tulajdonságainak meghatározására szakítóvizsgálatokat végeztem.

Kísérlettervezés és ANOVA analízis egyaránt jellemzik dolgozatomat.

Kísérleteimet a Spanyol Tecnalia (régábbi nevén FATRONIK) központjában, a BME Mechatronika Optika és Gépészeti Informatika Tanszékén és a Magyar Tudományos Akadémia Számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézetének Számítógéppel Integrált Gyártás Kutatólaboratóriumában végeztem.

### **Kísérleteim a következő berendezések felhasználásával történt:**

- Rieckhoff típusú 2.5D-s marógép
- Ellenbéllyeggel segített kétpontos inkrementális lemezalakítást megvalósító prototípus
- Mitsubishi RM-501 típusú 5 tengelyes manipulátor
- KUKA KR6 típusú ipari robot
- FANUC S430iF típusú ipari robot

Az erőmérésekhez egy hatkomponensű JR3 erőmérő cellát használtam. Egyes próbatestek geometriai mérése a GOM rendszereivel, a lemezvékonyodási mérések ellenőrzése Mitutoyo SLIM (LGB2-0105L) típusú finomtapintóval történt.

A Hall szenzor (AD22151 típusú integrált áramkörü elem, ami a vastagságmérés alapjául szolgál) lemezalakításba történő integrálását mikrométerorsóra épülő saját készítésű kalibrációs rendszerrel és a tervezési fázist segítő végelelemes számításokkal végeztem. A meleg légárammal segített lemezalakítási kísérletek SMD beültetéshez használható AOYUE-852A típusú hőlégfúvóval, a hőmérsékletmérések Testo 875 típusú hőkamerával történtek.

### **Kutatás során felhasznált programok:**

Számítógéppel segített tervezést és gyártást megvalósító programok: SolidWorks, SolidCAM

Robotmozgás kinematikai vizsgálatát segítő szimulációs program: IRBCAM

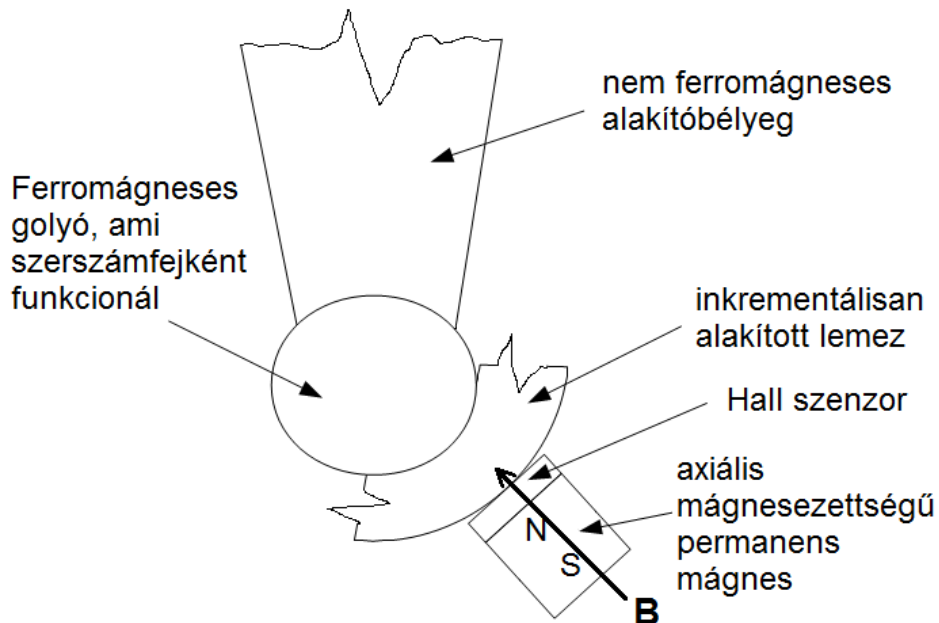
Valós idejű robotvezérlést megvalósító program: Linuxcnc 2 (korábbi nevén EMC2)

Végelelemes szimulációs program: ANSYS Workbench v11

# Új tudományos eredmények

## I. Tézis

Az egyponτος inkrementális lemezalakításnál (nem ferromágneses lemezek esetében) a képlékeny alakítási zónához tartozó lemezvastagság az alábbi új mérési elrendezéssel és eljárással folyamatában mérhető;



ahol B a mágneses térerő iránya

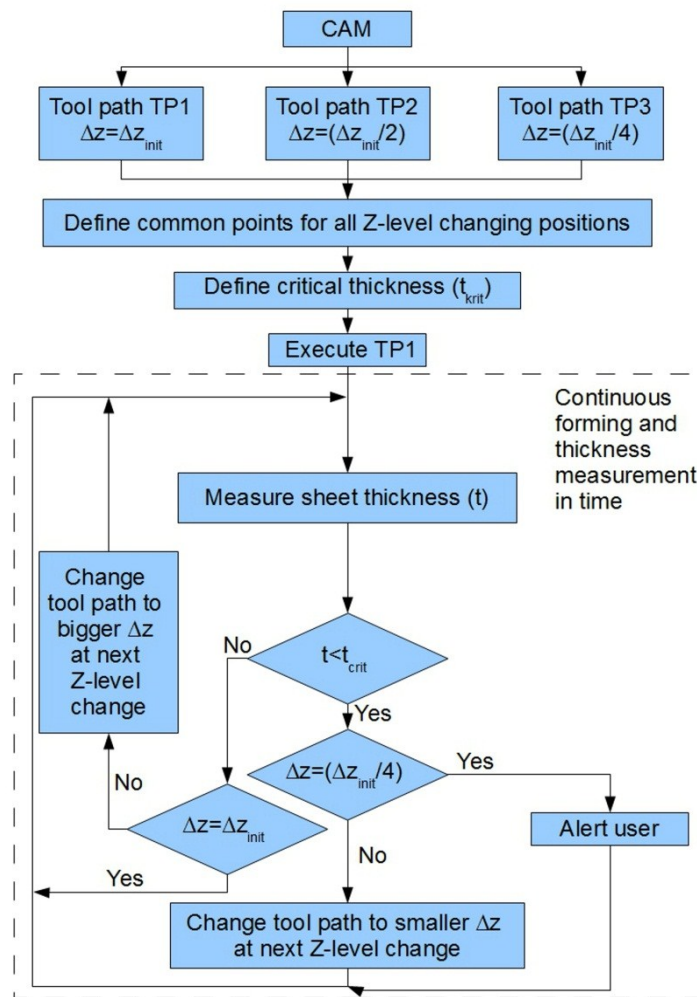
Állításomat 0.5 mm-es alumínium (Al 1050) lemezen végzett képlékenyalakítási kísérletekkel bizonyítottam.

**Kapcsolódó publikációk:** [PC-Paniti2011], [PJ-Paniti2012], [PB-Paniti2014],

[PJ-Paniti2014c], [PC-Paniti2014]

## II. Tézis

Az egyponτος inkrementális lemezalakítás megvalósítható az előre kiszámított különböző mélységű előtolással rendelkező szerszám pályák kombinációjával és a kontrakciót követő szakadás az alakíthatósági határig megakadályozható a következő blokkvázlatban leírt pályavezérlés alkalmazásával;



Állításomat 0.5 mm-es alumínium (Al 1050) lemezen végzett képlékenyalakítási kísérletekkel bizonyítottam.

**Kapcsolódó publikációk:** [PB-Paniti2014], [PJ-Paniti2014c], [PC-Paniti2014]

### III. Tézis

A mozgatott ellenbéllyeggel történő kétpontos inkrementális lemezalakításnál alkalmazott optimális alátámasztási erő/pozíció megvalósítható az eddigi gyakorlatban alkalmazott két szerszámgép/robot (továbbiakban megmunkológép) helyett egy minimum 4-szabadságfokú megmunkológép kengyeles kiegészítésével, ahol az optimális alátámasztó erő az excentrikus alakítóbéllyeg és a megmunkológép, ill. az ellenbéllyeg és egy lineáris aktuátor közé szerelt 1-1 egytengelyes erőmérő cella és egy erőszabályzás segítségével biztosítható. A mozgatott ellenbéllyeggel történő kétpontos inkrementális lemezalakítást megvalósító rendszer egyszerűsített változatához a szerszám pályák kiszámítása a következő eljárással lehetséges:

**Amennyiben a megmunkálógépre excentrikusan felszerelt szerszám alakítóbélyegként funkcionál és a lineáris aktuátorra szerelt ellenbélyeg erőszabályozott:**

1. Egyponos ISF-hez hasonlóan az általános szerszám pálya GTP(X, Y, Z, I, J, K) kiszámítása ahol (I, J, K értékek az érintkezési pont koordinátái).

$$S = F + (2R_T + t) \frac{\underline{n}}{|\underline{n}|} \quad \text{képlettel, ahol}$$

2. Ellentartást biztosító pontok kiszámítása

$$S = \begin{bmatrix} \text{TCP}_X^S \\ \text{TCP}_Y^S \\ \text{TCP}_Z^S \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} \text{TCP}_X^F \\ \text{TCP}_Y^F \\ \text{TCP}_Z^F \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \underline{n} = \begin{bmatrix} n_X \\ n_Y \\ n_Z \end{bmatrix}.$$

$S$  az ellenbélyeg, míg  $F$  az alakítóbélyeg koordinátáit tartalmazza,  $R_T$  az alakítóbélyeg/ellenbélyeg átmérője,  $t$  a lemez vastagsága a képlékenyalakítási zónában,  $\underline{n}$  az érintkezési pont és az alakítóbélyeg szerszámközepontjából adódó normálvektor.

3. Az excentrikus szerszám pálya kiszámításához  $S$  koordinátái közül a  $Z$  koordinátáját kicserélni GTP  $Z$  koordinátájával.

4. A megmunkálógép utolsó tengelyének  $\gamma$  rotációs szögének kiszámítása

$\text{TCP}_X^F, \text{TCP}_Y^F, \text{TCP}_X^S, \text{TCP}_Y^S$  koordináták felhasználásával.

5. Inverz-kinematikai probléma megoldása.

6. A megmunkálógép utolsó tengelyének szögének kicserélése  $\gamma$  értékére.

**Amennyiben a megmunkálógépre excentrikusan felszerelt szerszám ellenbélyegként funkcionál, a  $Z$  koordináta erőszabályozott és a lineáris aktuátorra szerelt szerszám az alakítóbélyeg:**

1. Egyponos ISF-hez hasonlóan az általános szerszám pálya GTP(X, Y, Z, I, J, K) kiszámítása ahol (I, J, K értékek az érintkezési pont koordinátái).

2. A lineáris aktuátor kezdő pozíciójának figyelembe vételével a  $Z$  érték újraszámítása.

$$S = F + (2R_T + t) \frac{\underline{n}}{|\underline{n}|} \quad \text{képlettel.}$$

3. Ellentartást biztosító pontok kiszámítása

4. A megmunkálógép utolsó tengelyének  $\gamma$  rotációs szögének kiszámítása:

$\text{TCP}_X^F, \text{TCP}_Y^F, \text{TCP}_X^S, \text{TCP}_Y^S$  koordináták felhasználásával.

5. Inverz-kinematikai probléma megoldása.

6. A megmunkálógép utolsó tengelyének szögének kicserélése  $\gamma$  értékére.

**Kapcsolódó publikációk:** [PP-Paniti2012], [PB-Paniti2014], [PJ-Paniti2014b], [PC-Paniti2014]

#### IV. Tézis

A mozgató ellenbéllyeggel történő kétpontos inkrementális lemezalakításnál az alakítást mélységében követő ellenbéllyeges alátámasztás nagyobb alakíthatósági határt eredményez, mint a kezdő szerszámhálya-kontúr el nem hagyó ellenbéllyeges alátámasztás. A kezdő szerszámhálya-kontúr, axiálisan szimmetrikus alakzatok esetén az alábbi egyenlettel számítható:

$$S = \begin{bmatrix} TCP_x^F \frac{R}{r} \\ TCP_y^F \frac{R}{r} \\ TCP_z^S \end{bmatrix},$$

ahol  $TCP_z^S$  az ellenbéllyeg szerszámközéppontjának Z koordinátája (melynek kiszámítása egyszer szükséges),  $r$  paraméter az alakítóhélyeges szerszámhályája utolsó kontúrjának a rádiusza, az  $R$  paraméter pedig az ellenbéllyeg első kontúrjának a rádiusza.

Állításomat 0.6 mm-es alumínium (Al 1050) lemezen végzett képlékenyalakítási kísérletekkel bizonyítottam.

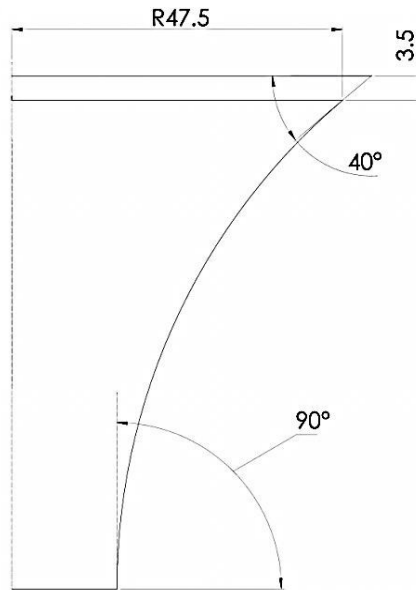
**Kapcsolódó publikációk:** [PJ-Tisza2010], [PJ-Paniti2010], [PJ-Paniti2014b]

#### V. Tézis

Lokális, meleg légárammal segített egyponos inkrementális lemezalakításánál - 5 mm vastag PE-HWST\* (extrudált polietilén) lemez esetében -, ha a lemezt 70 °C-ra hevítjük, a folytonosan növekvő axiális reakcióerő értéke az inkrementális alakítási szakaszban nem haladja meg az 1000 N-t.

Állításomat az alábbi geometrián a következő paraméterek mellett bizonyítottam; kétirányú ún. z-level pálya, 0.5 mm-es mélységi előtolás, 110 °C-os 20 L/perc légáram, 3000 mm/perc előtolási sebesség, 15 mm-es szerszámátmérő, valamint 8.4 mm-es fúvóka átmérő.





A lokális, meleg légárammal segített egypontos inkrementális lemezalakítás termoplasztikus polimerek esetében egy, a megmunkálógépre szerelhető kengyellel, illetve e kengyelre rögzíthető meleg légáramot közvetítő eszközzel (hőlégfúvóval) került megvalósításra, amely a lemez túoldalát hevítette. \*(Sűrűség: 0.947 g/cm<sup>3</sup>, Lágulási hőmérséklettartomány kezdete: 126°C - 130°C, Hajlító modulus: 900 MPa, Szakítószilárdság: 22 MPa, Keménység Shore D: 64).

A kísérleti berendezés helyettesíthető két robottal/szerszámgéppel is, amelyek vezérlése szinkronizált és ahol az egyik berendezés a meleg légáramot közvetítő eszközt mozgatja.

**Kapcsolódó publikációk:** [PC-Paniti2007], [PC-Nacsa2011], [PJ-Paniti2014a]

## Tézisekhez kapcsolódó saját közlemények listája

[PJ-Paniti2010] Paniti, I. (2010). CAD API based tool path control for novel incremental sheet forming. *Pollack Periodica*, 5(2), pp. 81-90.

[PJ-Paniti2014b] Paniti, I. and Somló, J. (2014): Novel incremental sheet forming system with tool-path calculation approach, *Acta Polytechnica Hungarica*, 2014 (accepted paper, under submission), **IF(2012): 0.588**.

[PJ-Paniti2014c] Paniti, I. (2014): Adaptation of Incremental Sheet Forming into cloud manufacturing, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014 (accepted paper, under submission), DOI: 10.1016/j.cirpj.2014.04.003

- [PJ-Tisza2010] Tisza, M., Paniti, I., Kovács, P. Z. (2010). Experimental and numerical study of a milling machine-based dieless incremental sheet forming. *International Journal of Material Forming*, 3(1), 971-974., pp. 441-446., **IF(2012): 0.509**.
- [PJ-Paniti2014a] Paniti, I. and Halász, M. (2014): Improved Single Point Incremental Forming performance of thermoplastic polymer sheets through dynamic local heating, *Polymer Testing*, 2014 (in submission phase).
- [PJ-Paniti2012] Paniti, I. (2012). Polietilén alapú extrém sport eszköz és gyógyászati segédeszköz alternatív gyártási módszere online minőségellenőrzéssel. *MŰANYAG ÉS GUMI*, 49(12), 465-468.
- [PC-Nacsa2011] Nacsa, J., Paniti, I., Kopácsi, S. (2011). Incremental Sheet Forming in Cyberspace—a Process Oriented Cognitive Robotics Application, CogInfoCom 2011. In *2nd International Conference on Cognitive Infocommunications in Budapest, July 7-9.*, New York: IEEE Press, pp. 1-5.
- [PC-Paniti2007] Paniti, I., and Haidegger, G. (2007). Control development for mechatronic sheet metal forming processes., In: *MicroCAD 2007 Internatioanal Scientific Conference*, Miskolc, Hungary, 2007.03.22-23., pp. 207-212.
- [PC-Paniti2011] Paniti, I. and Paroczi, A. (2011, July). Design and modeling of integrated Hall-effect sensor based on-line thickness measurement device for incremental sheet forming processes. In: *Proceedings of Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2011 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, IEEE, pp. 297-302).
- [PC-Paniti2012] Paniti, I. and Rauschecker, U. (2012). Integration of incremental sheet forming with an adaptive control into cloud manufacturing, In: *Proceedings of the 14th International Conference on Modern Information Technology in the Innovation Processes of Industrial Enterprises, MITIP2012, Budapest, 24-26.10.2012.* pp. 119-128.
- [PC-Paniti2014] Paniti, I. (2014). A novel, single-robot based two sided incremental sheet forming system, In *Proceedings of the 45th International Symposium on Robotics (ISR 2014) and the 8th German Conference on Robotics (ROBOTIK 2014)*, Munich, Germany, June 3 - 6, 2014, 7 pages (accepted paper)
- [PB-Paniti2014] Paniti, I. (2014). New Solutions in Online Sheet Thickness Measurements in Incremental Sheet Forming. In *Applied Information Science, Engineering and Technology*, Springer International Publishing, pp. 157-177.
- [PP-Paniti2012] Paniti, I., and Somlo, J. (2013): Device for two sided incremental sheet forming, EU Patent EP2505279