

# KÍVÁNT RUGALMASSÁGÚ TÉRBELI FELÜLETEK KÖZELÍTÉSE SÍKOK HAJTOGATÁSÁVAL

## APPROXIMATION OF SURFACES WITH DESIRED FLEXIBILITY BY FOLDING A PLANAR LAYER OF MATERIALS

*Csire Géza, Doktorandusz*

### ÖSSZEFOGLALÁS (ABSTRACT)

In this paper I lay down the basic considerations of a method which makes it possible to approximate any three dimensional surface with desired flexibility by folding a planar configuration of material layers. The layers are the results of planar manufacturing processes.

### 1. BEVEZETÉS

A legtöbb ember amennyiben nem szorul rá nem szívesen alakítja át a bútorait. Mivel a bútorok átalakításának a legfőbb oka a helytakarékosság, a leggyakoribb az összecusukható vagy lapra szerelhető átalakítható bútor. A helytakarékosság általában a szállításnál fontos igény. Ezen felül a gyorsan összecusukható, vagy átalakítható szerkezetű tárgyak funkciói közül általában valamelyik ideiglenes.

#### *1.1. Lapra szerelt bútorok*

A legtöbb lapra szerelt bútor egyszeri átalakításra lett kitalálva. A legkisebb lapos bútor-elemeket szorosan pakolva szállítják és a megfelelő helyen a felhasználónál egyszer össze-szerelik, majd használják. Ezek után a legtöbb esetben még újabb szállításhoz sem szerelik lapra az adott bútort. Léteznek tárolási, gyártási vagy egyéb okokból lapra csukható bútorok is.

#### *1.2. Jelenleg fellelhető típusok*

Három a felhasználók szemszögéből jelentős fő szempont alapján kategorizálom a jelenleg elérhető lapra szerelhető termékeket: ár, szere-

lés és formai minőség. A legjobbakat és legnépszerűbbeket vizsgáltam és ebből három fő esetet határoztam meg:

- A termék jól néz ki és megfizethető, azonban a szerelést a felhasználónak kell végeznie és az gyakran időigényes és frusztráló.
- A termék jól néz ki és könnyű szerelni, átalakítani, azonban drága ezzel elvesztve azokat a felhasználókat, akiknek a leginkább szükségük lenne a helytakarékosságra.
- A terméket könnyű szerelni és megfizethető, azonban ez látszik rajta. Mivel hatásában is az olcsó és ideiglenes érzetet sugallja, csak bizonyos életvitelhez passzol. A formai minőség csökken.

A több tényezőben is rosszul teljesítő típusokkal nem foglalkozunk. A formai minőség meghatározásának módjára a Rolf Reber cikkében [3] vázolt szépség fogalmat használtam. Ez alapján az indokolatlan bonyolítása bármely formának (különösen az olyan archetípus fogalmak körében, mint például: "szék"), a szemlélő számára nehezebben értelmezhetővé és ezzel kevésbé vonzóvá teszi azt. A legtöbb síkokból összetoldott termék illesztéseivel az adott tárgy formai szempontból indokolatlanul bonyolódik. Ezeket formai minőség csökkenésnek számítottam.

### 1.3. A típusok kialakulásának okai

A tervezés bonyolultságában lehet keresni a típusok kialakulásának okát. Egy bútorban több szinten fellelhetőek közismert régi fogalmak, mint például: "háttámla", "láb", stb. A lapra szerelhető bútoroknál és általában minden több mint egy állapottal rendelkező tárgynál ezeket a klasszikus fogalmakat újra kell értelmezni. A leggyakoribb és szinte kizárólagos jellegzetesség, hogy a legkisebb laposhoz közeli fogalmakra bontanak föl egy-egy bútort, ezzel elérve a lapra szerelhetőséget. Léteznek más úton elért lapra szerelhető bútorok is, azonban ezek mindig egyedi kreatív gondolatokon alapulnak, ritkák és tervezésük egy komplikált folyamat eredménye. A fogalmak szerinti felbontás ugyan a legtermészetesebb a gondolkodás módunknak, azonban legtöbbször valamilyen kompromisszumra kényszeríti a tervet, az ár, a szerelés, vagy a kinézet területén. Ezen a fogalmakon a funkcionális kötöttségnek nevezett kognitív beállítottság miatt nehéz felülkerekedni. Ezt a fogalmat Karl Dunken definiálta: "mentális gát, amely akadályozza egy tárgy olyan új módon történő használatát, ami egy probléma megoldásához szükséges." [4]. A bútorok esetében az önálló elnevezéssel rendelkező fogalmakat a tervezők csak ritkán merik megbontani, inkább a termék más tulajdonságát változtatják meg.

## 2. SÍKBÓL TÉRALKOTÁS

### 2.1. Alap gondolat

Nem a kívánt funkcióból érdemes kiindulni, hanem a preferált síkszerű gyártási lehetőségekhez találni olyan tér alkotó módszert, amellyel létrehozható valamely kívánt téralkotó test. Olyan formai sajátosságokkal, amelyekhez adott ismert funkciók rendelhetőek, ezzel létrehozva a kívánt tárgyat, amely tervezői szándék szerint vagy reflektál valamely létező tárgy archetípusára, vagy új struktúrát alkot.

### 2.2. Módszerek, eljárások

A használható módszerek és eljárások felkutatásánál nem a mindenképp síkszerű alapokból indultam ki, hanem az adott eljárás építő ele-

meinek dimenzióit vizsgáltam azzal, hogy legalább egy de legfeljebb két dimenziója jelentősen eltérjen a többitől, tehát sík-, vagy rúdszerű. Három kézenfekvő téralkotó módszert vizsgálok:

- A klasszikus módszerben a külön álló síkok először a síkszerű funkcionális elemekké lesznek szerelve például háttámla, vagy ülőlap. Ez után az elemeket kell összeszerelni a teret foglaló tárggyá.
- Az origami jellemzően egyetlen rugalmasan hajtható anyagból (leggyakrabban papír) hajtásokkal alkot teret.
- A tensegrity elnevezésű konstrukció sajátossága, hogy minden eleme csak húzás vagy nyomás jellegű terhelést kaphat. Anthony Pugh a következő definíciót adja: "Egy tensegrity rendszert kapunk, ha a nem folytonos elemek kizárólag nyomás alatt álló csoportja a folytonos elemek csak húzásnak kitett csoportjával kapcsolódva egy stabil térfogatot alkot." [5]

### 2.3. Összehasonlítás

A klasszikus módszer nehézségeit az 1.3 fejezetben tárgyaltuk. Legfőbb nehézsége a funkcionális kötöttségeken átlépni. Az egyszerű gyártás többnyire komplikált szereléshez vagy formai minőségsökkenéshez vezet. Az origami egyetlen felületből  $C^0$  görbületű nem deriválható folytonos felületeket alkot. Speciális esetében az úgynevezett rigid origamiban merevsíkok kapcsolódnak csuklókkal. Ez merev anyagokkal is kivitelezhető konstrukciókat tesz lehetővé. A tensegrity csak rudakat és huzalokat használ. Jól számolható a viselkedése különböző terhelések alatt, azonban a formakeresési eljárásai nem a befoglaló forma alakjából indulnak ki [6] és utómunkával jár a funkcionális síkok kialakítása a szerkezet megtalálása után.

Az origami elvekből kiinduló eljárásokkal közelítjük a formákat, mivel az origami forma-

keresési eljárások között több ismert módszer is a kívánt vizuális megjelenésből kiindulva hoz létre síkká teríthető hajtásokat. Az így létrejövő rendszerek anyag hatékonyságát és szerkezeti stabilitását a tensegrity rendszerekből megismert kedvező térfogat-anyag arányú szerkezetekkel javíthatjuk.

#### 2.4. Origami formakeresés

Mivel sík gyártásból indulunk ki, ezért a rigid origamin belül is egy speciális esetet a síkra hajtható origami változatokat vizsgálom először. Tehát a síkból egyenesek mentén hajtható formaalkotó eljárást keresünk. A későbbiek során a rugalmas anyagokat is számításba veszem nem egyenes hajtásokkal. A síkra hajtható origami jellemzője, hogy egy hajtott állapotban minden pontja egy síkon helyezkedik el. A hajtás minta egy kétdimenziós egyszerű egyenesekből álló gráf egy síkon. Amelyben minden vonal domború vagy homorú hajtást reprezentál. A hajtás minta hajtássorrendje ugyan nem triviális probléma, azonban léteznek eljárások, amelyekkel több kisebb alapvető megoldott hajtásra, úgynevezett molekulára vezethető vissza egy adott hajtás probléma. Ezekről bővebben Tomohiro Tachi ír [7]. Tachi algoritmusával a kívánt vizuális módon kereshető hajtásminta adott formákhoz. A Tachi cikk jó összefoglalást ad egyéb formakereső eljárásokról is. Megtalálása előtt a híres TreeMaker algoritmust vizsgáltam Robert Langtól [8]. Ebben az eljárásban egy kétdimenziós pálcika figurát (a kívánt hajtogatás elágazásait reprezentáló gráf-fát) lehet meghatározni. Az elágazások száma és az ágak hossza szabályozható a kívánt módon. A TreeMaker algoritmus ebből készít egy bázis hajtogatás elemet, amiből kiindulva egy tapasztalt hajtogató létre tudja hozni a kívánt formát. Ez az eljárás, azonban gyárthatósági és szerelési szempontokból túl komplikált eredményre vezet. Már egy egyszerű széket reprezentáló ötágú fánál is, a hajtások nagy száma és a hajtott egy síkba eső lapok nagy száma is problémát okoz.

#### 2.5. Tachi módszer

A Tachi módszer poligonokból állórendszereket bont föl olyan módon, hogy az általa javasolt lineáris és pontszerű behajtó molekulákat [9] illeszt a poligonok közé. A nyitott molekulák és a poligonok együttesen síkká teríthetőek. A molekulák behajtásával a poligonok megfelelő élei egymás mellé kerülnek és ezzel a kívánt térbeli állapotot veszik föl. A következő fejezet

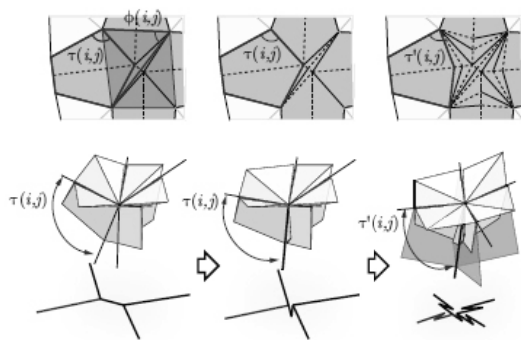
#### 2.6. A Tachi módszer alakítása gyártási szempontok alapján

Anyaghatékonyság, egyszerű kezelhetőség és a merev lapok jelentős vastagsága miatt az átfedő lapok maximális számát kétféleképpen határozom meg. A Tachi módszer algoritmusáig mindig szimmetrikus lineáris molekulákat készít. Tehát a közös poligon élek között egy homorú hajtással lehet a molekulát összecsucni. Ez két egymás melletti lapot eredményez a poligonok között, ami mindig kielégíti az iménti feltételt. A pont molekulák legalább három poligon találkozásánál vannak. Általános esetben ez több, mint 2 átfedő lapot eredményezne, ezért a pontszerű molekulák helyén réseket hagyunk a merev lemezben. Az így keletkező hajtási határozatlanság nincs befolyással a termékre, amennyiben a használati végállapotában fixálható. A lapra szerelt állapotban megengedett több szabadságfok.

#### 2.7. Formai határozottság

Az összehajtott molekulák irányát mindig befelé a felületektől elfelé határozza meg az algoritmus. A vonalszerű molekulák találkozási határozza meg minden esetben egyértelműen a környező poligonok által bezárt szögeket. A következő összefüggés adja a pontszerű molekulákban az adott vonalszerű molekulák melletti felhajtások lehetséges szögeit, ahol  $\tau'(i,j)$  a felhajtás szöge  $i$  és  $j$  pont közötti vonalmolekula  $i$  pontjánál:

$$\phi(i,j) - \frac{1}{2} \theta(i,j) \leq \pi - \tau'(i,j) \quad (1)$$



1. ábra: Poligonok szögeit meghatározó elrendezések a Tachi módszerben

Az egyenlőtlenség szélső értékében a vonal molekulák egy egyenes mentén összeérnek az adott pontban. Részletes definíció: [7]-ben a 4.2.2-es fejezetnél. A vonal molekulák hajtott szélének találkozása határozottá teszi a szerkezetet, az irányuk pedig a poligonoktól elfelé áll így egyben merevítőként is funkcionálhatnak. A pont molekulák helyén találkozó élek rögzítése és oldása határozottá vagy határozatlanná (síkra hajtható) teszi a lapot.

### 2.8. Szélső hozzáadott élek

Az algoritmus a szélekhez plusz éleket és molekulákat generál, hogy a teljes befoglaló forma ne legyen konvex. A szélső pont molekulák miatt a szélső vonal molekulák függetlenné és ezzel fölöslegesé válnak. A befoglaló molekulákat a teríték készítésénél nem vesszük figyelembe.

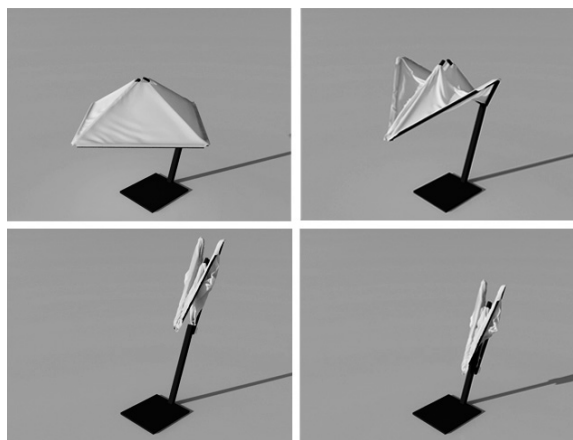
## 3. MEGVALÓSÍTÁS KÉRDÉSEI

### 3.1. Csuklók

Anyaghatékonysági megfontolások alapján a csuklást lehetővé tevő részelemek további funkciókat is el kell, hogy lássanak. Kézenfekvő megfontolás a korábbi munkáimban használt szövetsukló elve.

A Korábbi kutatásaimban a Bennett mechanizmust [10] használó napernyő terve nem használt a tartó elemek közötti csuklókat. A tartóelemek helyzetét az ernyő szövete határozta meg. Ez a szerkezet felfogható

tensegrityi jellegűnek. A csuklást az ernyő rugalmassága és a tartók elrendezése tette lehetővé.



2. ábra: Csire Géza: Napernyő a Bennett mechanizmus és Tensegrity megfontolások alapján

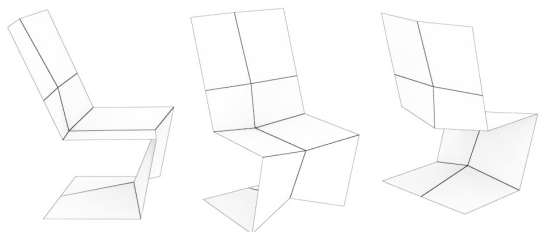
Elsősorban lapra szerelhető bútorok sík gyártási eljárását vizsgálom. A bútorokra jellemző szövet borítás használatánál a szövet csuklóként is működhet. Több réteg használatával az origami megközelítésnél komplikáltabb elrendezések is elérhetővé válnak, azonban ezek megalkotása komplikált folyamat eredménye, ezért vizsgálatukra későbbi írásban kerül sok. Inspirációként érdemes áttekinteni a Whitney és társai által kidolgozott eljárást [11]. Csak sík gyártási eljárások alkalmazásával és különböző anyagminőségű síkok rétegzésével hoztak létre komplex téralkotó struktúrákká egy egyszerű mozdulattal hajtható szerkezeteket. Nagyobb léptékben a rétegzés és a rétegek pozicionálásának kérdései komplikálttá teszik az eljárást, azonban bizonyos elemei hasznosak lehetnek.

### 3.2. Alak rögzítés

A pont molekulák helyén lehet egyszerre a legtöbb él egymáshoz viszonyított helyzetét irányítani, mivel itt találkoznak az élek. Nincs egyértelmű kézenfekvő rögzítési mód, egy hatékony és egyszerű eljárás még kikísérletezésre vár. Addig a pont molekulákban összefutó él molekulák magasságának bizonyos pontjait rögzítjük egymáshoz a lehető legkisebb

köztük lévő távolsággal. Ennek a módszernek a hátránya, hogy minden egyes pont molekulánál rögzíteni kell a szerkezetet a fix állapot eléréséhez.

### 3.3. Kísérlet - szabadfelület

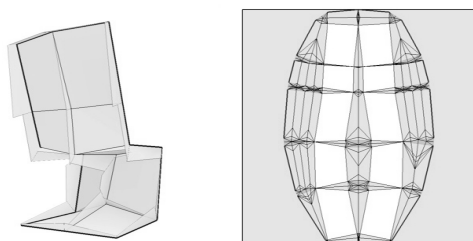


4. ábra: Csire Géza: kevés poligonszámú szék

Egy a híres Pantone szék strukturáltságát idéző alapforma alacsony poligonszámú változatával kezdünk. Az így létrehozott alapja a szabadfelületnek a termék váza lesz összehajtáskor. Az eljárásunk végén ehhez hasonló formájú alapot kell kapnunk, amely: lapra szerelhető, hátoldalán megerősített, első oldalán azonos. Ezt az alapot fejlesztjük tovább székké.

### 3.4. Teríték generálás

A Tachi algoritmussal terítéket generálunk a kívánt formához. Ezt a terítéket a gyártási megfontolások alapján a korábban részletezett módon átalakítjuk. Eredményeképpen poligonokban és pont molekulákban végződő konkáv vagy konvex alakzatot kapunk, amely az eredeti teríték pont molekuláinak a helyén lyukas. Az így kapott teríték adja a lapra szerelhető bútorunk merev részeinek alapját képező rajzot. Ebben minden él a merev sík egy vágását reprezentálja, amely vágások a szövet hozzá-



5. ábra: Tartól és teríték a Tachi módszerrel

adásával csuklók szerepét fogják betölteni.

### 3.5. Tapasztalatok, további megfontolások

A gyártáshoz alakított terítéket papír hajtással ellenőriztem. A kívánt megfontolások működtek azonban további vizsgálatok szükségesek. A Tachi féle eljárás legnagyobb hátránya, hogy folyamatos felületekből folyamatos felületeket képez. Ez nem minden esetben szükségszerű a bútorok készítésében, itt nem muszáj a klasszikus origami szabályokat követni. A hajtott vonal molekulák mérete a kívánt formai sajátosságoktól függenek, önmagukban nem befolyásolhatóak. Ez a kapott formai minőség rovására mehet. Összetett terítékek esetében nem szükséges minden vonal molekula által adott hajtás, mint merevítés. Ez az összeállítás bo-



3. ábra: Gyártáshoz alakított teríték és papírmoddellje

nyolódásához vezet.

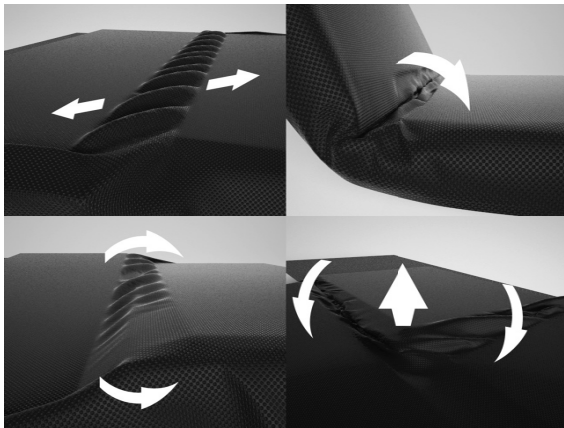
## 4. EREDMÉNYEK

A bútorok tulajdonságait meghatározó szabványok az ISO 9241 és a ANSI/BIFMA X5.1-2011 jól alkalmazható eredményeket adnak ülőbútorok minőségének mérésekor: Háttámlájának 68 kg terhelést kell bírnia; Bármely pontját terhelve az stabil marad; Minden lába legalább 34 kg terhelést kell elviseljen 25 mm-re a végétől; Ülése 102 kg terhelést kell kibírjon 150 mm magasból ejtve; Élettartama alatt legalább 100000-szer el kell viselnie 57 kg terhelést 50 mm magasból ejtve. [1]

### 4.1. Előzetes jellegzetesség keresés

Az origami jellegnek köszönhetően az eredeti struktúra lapjai egymáshoz képesti elmozdulása az őket összetartó szövetben jellegzetes mintákat alakít ki. A szövet kizárólag húzást a

merev lapok többnyire nyomást vesznek föl. A négy legalapvetőbb eset: Húzás: két szövettel egymáshoz rögzített szomszédos lap egymáshoz legközelebbi éle távolodik. Hajlítás: két szövettel egymáshoz rögzített szomszédos lap legközelebbi élük mentén egymáshoz képest elfordulnak. Csavarás: két szövettel egymáshoz rögzített szomszédos lap egymáshoz legközelebbi éle kitér. Vegyes: több hatás találkozása. Főleg azokon a pontokon jellemző ahol több lap éle egy pontban találkozik. Előreláthatólag ezek a pontok mindig kritikus pontok lesznek. A szövet legkönnyebben a pontszerű terhelésektől megy tönkre. Folyamatos húzásnak kitett feszülő részekben felléphet a szövetben relaxáció, vagy nyúlás, ami a forma és a teherbírás megváltozásával járhat. A csavarás



6. ábra: Előzetes Jellegzetességek: húzás, hajlítás, csavarás és mindegyik egyszerre

és vegyes jellegű terheléseknél a szövetben nem egyenletes feszültség ébred. Amennyiben a kísérletek, vagy az elméleti modell megköveteli, ezeket a pontokat érdemes megerősíteni nagyobb teherbírású szövettel, vagy puha töltőanyaggal eloszlatni a pontszerű terhet. A merevlapok tönkremenetelének legvalószínűbb az éles sarkok letörése, valamint különleges terhelési esetekben kaphatnak hajlítást is.

## 5. JÖVŐKÉP

Eredménye egy tervezés segítő szoftver, amely a lapra szerelhető bútorok kialakításakor a tervezést nehezítő funkcionális kötöttségektől mentesen síkokra bontja a kívánt térbeli formát, olyan módon hogy a kapott síkok rétegei

ismert gyártási eljárásokra vannak optimalizálva és a lehető legjobb anyaghatékonyságot biztosítja az ökológikus gyárthatóság érdekében. A rétegekből álló sík összehajtható és rögzíthető egyszerű módon a kívánt térformában. Ezzel a szoftverrel a síkban szállítható bútorok tervezésében nagyobb hangsúlyt kaphat a formai és pszichológiai oldal, amely hosszútávon a vizuális kultúra fejlődését eredményezheti.

## 6. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] ANSI/BIFMA, X5.1, 2011, "Chairs" fejezet részlete.
- [2] Julian M. Allwood, Michael F. Ashby, Gutowsky G. Timothy, and Worrel Ernst, "Material efficiency: A white paper," *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 55, pp. 362-381, 2011.
- [3] Rolf Reber, Norbert Schwarz, and Piotr Winkielman, "Processing Fluency and Aesthetic Pleasure: Is Beauty in the Perceiver's Processing Experience?," vol. 4, no. 8, pp. 364-382, 2004.
- [4] Karl Duncker and Lynne S. Lees, "On problem-solving," *Psychological Monographs*, vol. 58, no. 5, pp. i-113, 1945.
- [5] Anthony Pugh, *An Introduction to Tensegrity*. USA: University of California Press, 1976.
- [6] Gunnar Tibert, *Deployable Tensegrity Structures for Space Application*, 2002.
- [7] Tomohiro Tachi, "Origamizing Polyhedral Surfaces," , vol. 16(2), 2010, pp. 298-311.
- [8] Robert J. Lang, "A computational algorithm for origami design," , 1996, pp. 98-105.
- [9] Tomohiro Tachi, "3D origami design based on tucking molecule," , 2009, pp. 259-272.
- [10] Geoffrey Thomas Bennett, "A new mechanism," *Engineering* 76, pp. 777-778, 1903.
- [11] J. P. Whitney, K. Y. Ma Sreetharan, and R. J. Wood, "Pop-up book MEMS," *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, vol. Volume 21, no. 11, 2011.