

# Tapintásérzékelő tömbök – tervezés és jelfeldolgozás

VÁSÁRHELYI GÁBOR, ÁDÁM ANTALNÉ, DÜCSŐ CSABA, BÁRSONY ISTVÁN

MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet  
{vasarhelyi, adam, ducso, barsony}@mfa.kfki.hu

KIS ATTILA

Pázmány Péter Katolikus Egyetem, Információs Technológiai Kar  
kis@itk.ppke.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** tapintásérzékelő, rugalmas borítás, taxel, MEMS, három erőkomponens

Tapintásérzékelő rendszereket előszeretettel használnak az iparban, orvostudományban, virtuális valóság alapú alkalmazásokban, azonban a legtöbb rendszer csak egy egyszerű nyomástérkép felvételére alkalmas. Ebben a cikkben egy olyan – világviszonylatban újdonságnak számító – tapintásérzékelő tömböt mutatunk be, melynek minden egyes tapintó eleme (taxel, tactile pixel) a felületére ható erők mindhárom (egy a felületre merőleges és két nyíróirányú) komponensét érzékelni tudja. Bemutatjuk az integrált mikroérzékelők előállításának folyamatát, az érzékelőket borító rugalmas bevonat információ kódoló hatását és végül egy robotikai példaalkalmazást is, ahol a három erőkomponens mérésének kiemelkedő szerepe van.

## 1. Bevezetés

A tapintás az emberi testnek a látás után talán legfontosabb, legkomplexebb információt közvetítő érzékelési módja. Az emberi bőr temérdek apró receptort tartalmaz, amik a tapintási információ egyes komponenseit (statikus nyomás, elmozdulás, vibráció stb.) párhuzamos csatornákon közvetítik a jelfeldolgozó központ, az agy felé. Célunk ennek az érzékelő és jelfeldolgozó rendszernek a lemásolása olyan mesterséges tapintásérzékelő rendszerekkel, melyek robotkezekbe, orvosi diagnosztikai eszközökbe vagy akár művégtagokba integrálva segítik ezek működését.

Érzékelő rendszereink alapját a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetben (MTA MFA) fejlesztett tapintásérzékelő tömbök képezik. Ezek az apró MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) eszközök a szilícium egykristály tömbi mikromechanikai megmunkálásával készül, olyan érzékelő-jelfeldolgozó rendszerek, melyek a hagyományos nyomásérzékelőkkel ellentétben a felületükön támadó erő-vektornak nem csak a felületre merőleges, hanem az azzal párhuzamos, nyíróirányú komponenseit is képesek mérni, feldolgozni és továbbítani.

A tapintásérzékelők nélkülözhetetlen és meghatározó kelléke a rugalmas borítás, mely amellett, hogy bizonyos fokú fizikai védelmet biztosít a sérülékeny taxelnek, mechanikai tulajdonságainál fogva alapvetően befolyásolja az érzékelési folyamatot. Gondoljunk csak a nyáron talponton kialakuló bőrkeményedés hatására, vagy ennek ellenkezőjére, a lehorzsolts bőrfelületünkön tapasztalható megnövekedett érzékenységre. A rugalmas borítás tulajdonképpen a tapintási folyamat *első téridőbeli dinamikus jelfeldolgozó rétegének* tekinthető, hatását tehát mindenképpen figyelembe kell vennünk az érzékelő tömbjeink tervezésénél.

A következőkben ismertetjük a tapintásérzékelő tömbök előállítási folyamatát, majd bemutatjuk a bőrszerű

rugalmas borítás információ-kódoló hatását. Tesszük ezt azzal a céllal, hogy egyrészt jobban megértsük az emberi tapintásérzékelés működését, másrészt hogy a biológiai rendszerekből ötleteket merítve tökéletesíthessük mesterséges érzékelőink hatékonyságát. Az általános ismertetést egy tapintásérzékelőkkel felszerelt robotkar *proaktív megfogási feladatának* bemutatásával zárjuk.

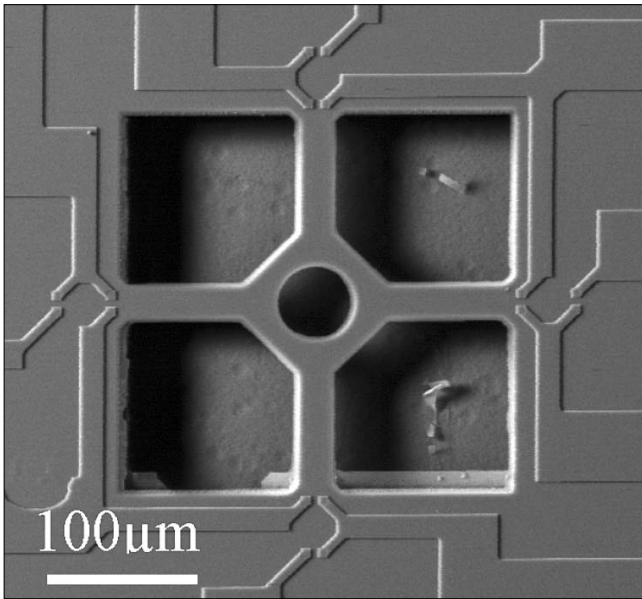
Ez a cikk tulajdonképpen magyar nyelvű összefoglalója a témában megjelent és a hivatkozásjegyzékben felsorolt korábbi nemzetközi publikációinknak [1-7].

## 2. MEMS érzékelők

A tapintásérzékelő tömbök egykristályos szilíciumból készülnek az IC gyártástechnológia jól ismert technikáival, amelyet kiegészítünk a Si egykristály három dimenziós tömbi mikromechanikai megmunkálásával. A szilíciumnak egyrészt rendkívül jó mechanikai tulajdonságai vannak, másrészt a rá épülő technológia kombinálható a hagyományos mikrotechnológiai lépésekkel is. Ez lehetővé teszi egyetlen chipen integrált intelligens érzékelőrendszerek (úgynevezett smart sensors) létrehozását.

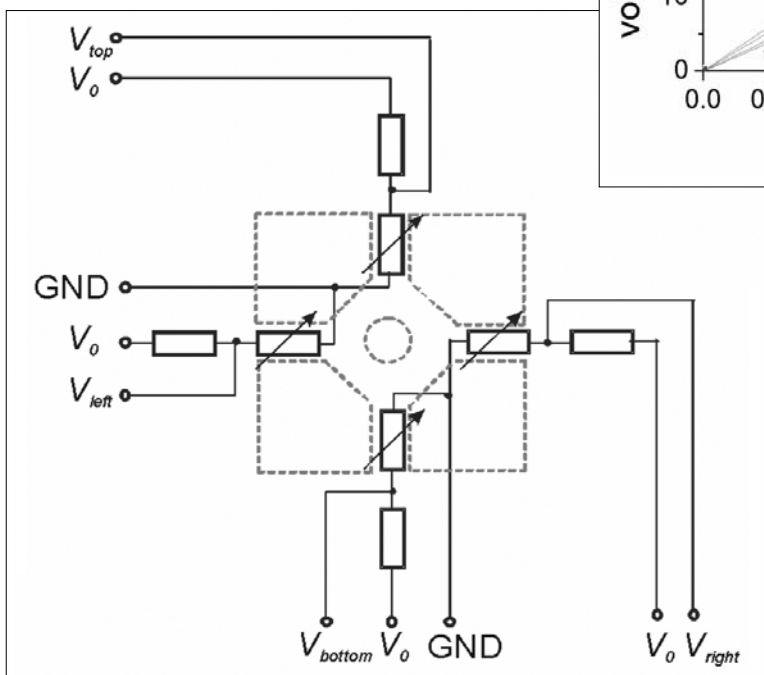
Az érzékelő tömbök minden egyes taxel-eleme egy apró, felfüggesztett, perforált egykristályos Si membrán vagy hídpár (1. ábra). A felfüggesztési pontokban gondosan pozicionált beágyazott piezoellenállások találhatók, amik a terhelés hatására az egyes hídelemekben ébredő mechanikai feszültséggel arányosan változtatják értéküket.

Az érzékelők egyoldali pórusos szilícium megmunkálással készülnek, a hidakat n-típusú egykristályos szilícium alkotja, amelyekben ionimplantációval p+ adalékolással piezoellenállásokat alakítunk ki. A piezoellenállások helyét és irányultságát végeelem szimulációs számítások alapján azokba a pontokba helyeztük, ahol az ébredő mechanikai feszültségek maximális értékűek.



1. ábra  
Egy piezorezisztív érzékelő elem pásztázó elektronmikroszkópos képe. Karakterisztikus méretek: híd  $80 \times 32 \times 10 \mu\text{m}^3$ , középső merevítő  $100 \times 100 \times 10 \mu\text{m}^3$ , lyukátmérő  $50 \mu\text{m}$ , marási mélység kb.  $35 \mu\text{m}$ . A piezoellenállás-párok (mérő- és terhelésmentes referenciaellenállás) a hidak felüggesztési pontjai körül találhatóak.

Minden piezoellenálláshoz tartozik egy, a nem deformálódó Si tömbben kialakított, sorosan kapcsolt referencia elem, aminek értéke terhelés alatt sem változik. A két ellenállást feszültség osztóként, vagy fél Wheatstone-hídbe kapcsolva a mechanikai feszültséggel arányos analóg ellenállás változást egyenárammal mérhetjük (2. ábra). Egy-egy érzékelő elemhez a geometriai kialakításnak megfelelően négy piezoellenállás tartozik, ami egyben az érzékelőt érő erő három komponensének egymástól független mérését teszi lehetővé.



Az érzékelőt a középpontjában érő erőhatás és a mért feszültségváltozások közti lineáris kapcsolatot az alábbi képlettel írhatjuk le:

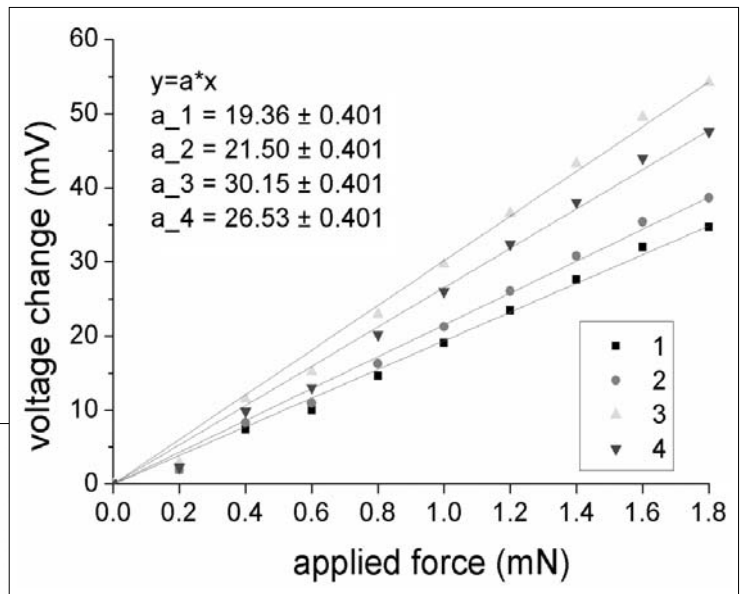
$$F_x = \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} (\Delta V_{right} - \Delta V_{left}),$$

$$F_y = \frac{1}{V_0 \alpha_{ls} \pi_{44}} (\Delta V_{top} - \Delta V_{bottom}),$$

$$F_z = \frac{1}{V_0 \alpha_{ln} \pi_{44}} \frac{(\Delta V_{left} + \Delta V_{right} + \Delta V_{top} + \Delta V_{bottom})}{2}$$
(1)

ahol  $F_i$  az ébredő erő három komponense (z az érzékelő felületre merőleges, x és y azzal párhuzamos koordináta)  $V_0$  a közös feszültség,  $\Delta V$  a mért feszültségváltozás,  $\pi_{44}$  a piezorezisztivitást jellemző anyagi együttható az adott geometrikus rendszerben,  $\alpha_{ln}$  és  $\alpha_{ls}$  pedig a merőleges (normal) és nyíróirányú (shear) lineáris együtthatók, amelyek az adott kialakításra jellemzőek.

Az érzékelők mért jelleggörbéi összhangban állnak az előzetes végelem szimulációkkal számított érzékenységgel (4-6 mV/mN/V) és az elmélet által megjósolt lineáris erőfüggést mutatják (3. ábra).



3. ábra  
Az érzékelők merőleges irányú terhelésre adott lineáris válasza

2. ábra  
Egy érzékelő elem négy piezoellenállása és a referencia elemek áramköri elhelyezkedése

### 3. Érzékelő tömbök

A gyakorlati alkalmazások sokszor megkövetelik, hogy ne egy, hanem sok érzékelő elemünk legyen egy felületen egymás mellett elhelyezve. Ez az igény 2x2-es méretű tömbök esetén (4. ábra) egyszerűen teljesíthető.

Amikor azonban növelni akarjuk az integrált taxelek számát, szembesülünk a sok kontaktushoz tartozó vezeték elhelyezésének problémájával.

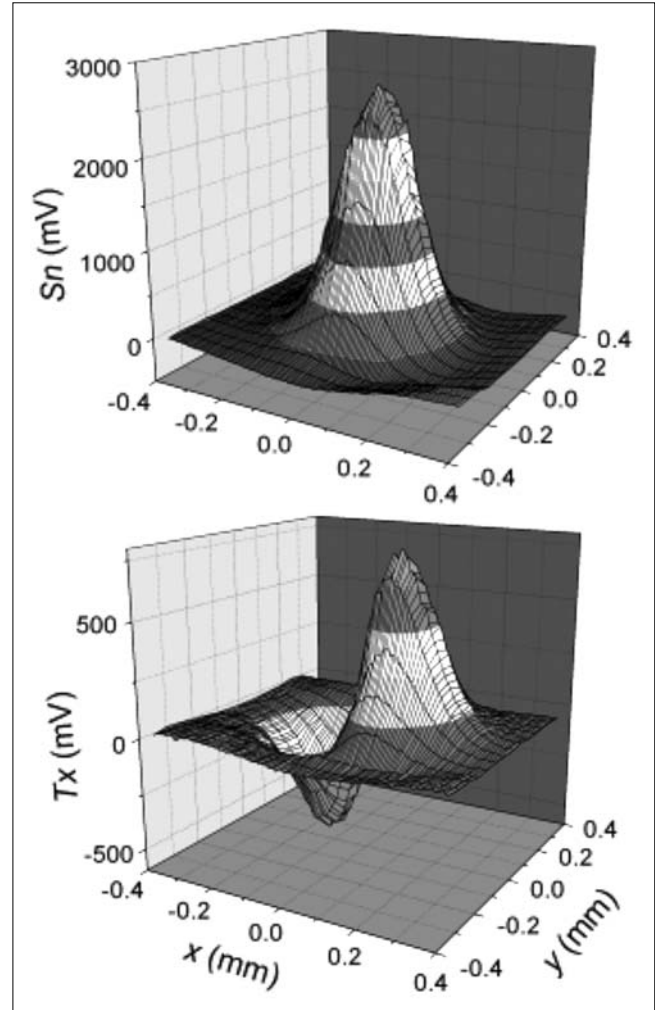
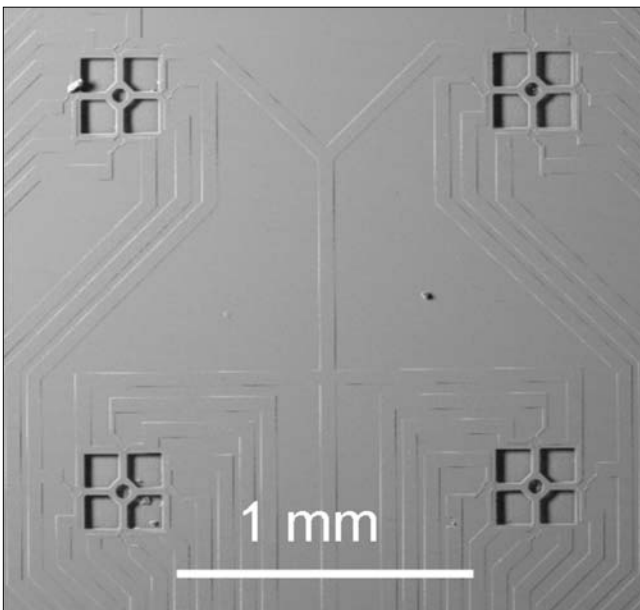
Megoldásként az érzékelő chip mikro-mechanikai megmunkálási technológiáját kombináltuk a hagyományos CMOS áramköri technológia lépéseivel azért, hogy az egyes elemeket lokális áramgenerátorokkal lássuk el és a jeleket multiplexelve, azaz egy dekóder segítségével soros módon tudjuk kiolvasni. Szabadalmaztatott eljárásunkkal az egy tömbben elhelyezkedő taxelek számát az első prototípusban 8x8-ra tudtuk növelni (5. ábra).

### 4. A rugalmas borítás hatása

Ahogy a bevezetőben is említettük, a rugalmas borítás nélkülözhetetlen és meghatározó kelléke minden tapintórendszernek. Bőr, illetve rugalmas borítás jelenlétében a felületi erőhatások rendkívül bonyolult módon kódolva, a rugalmas anyag belsejében ébredő mechanikai feszültségek formájában jutnak el az érzékelőkig, legyenek azok akár az ujjainkban található mechanoreceptorok, akár a mesterséges tapintásérzékelők.

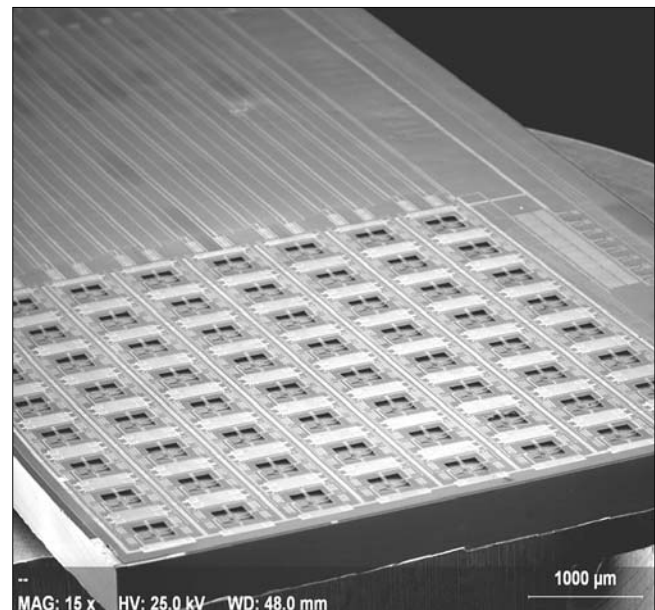
Ennek az információ kódoló rétegnek a matematikai leírását a *kontinuummechanikából* származtatjuk. A borítás anyaga első közelítésben homogén, izotróp, végtelen féltérnek fogható fel, mely alapvetően a Hooke-törvény szerint viselkedik. A félterünk egyetlen szabad felületét érő erőhatások deformálják az anyagot és benne bonyolult mechanikai feszültségeloszlást eredményeznek.

4. ábra  
2x2-es érzékelő tömb  
(taxel-méret: 0.3x0.3 mm; taxelek távolsága: 1.5 mm)



6. ábra  
A legegyszerűbb, a felületre merőleges, pontszerű terhelés által keltett rendkívül bonyolult feszültségeloszlás két komponense a borítás mélyén.  
A mérések szoros korrelációban vannak az elmélettel.

5. ábra  
CMOS-kompatibilis MEMS technológiájával megvalósított 8x8-as érzékelő tömb (MFA szabadalom)



Mivel a feszültségek az anyagban általában az erőhatás közelében koncentrálnak és attól távolodva gyorsan elenyésznek, jó közelítésnek tekinthető, ha a végtelen anyagban a tapintásérzékelő pozícióját a véges borítás vastagságának megfelelő mélységben képzeljük el.

Az első feladat tehát az egyensúlyi egyenletek megoldásával meghatározni az adott erőeloszlás függvényében adott mélységben ébredő feszültséget vagy alakváltozást (6. ábra). Gyakorlati szempontból sokkal fontosabb az inverz probléma megoldása, vagyis a felületi erőeloszlás kiszámítása a véges számú pontban mért feszültségből.

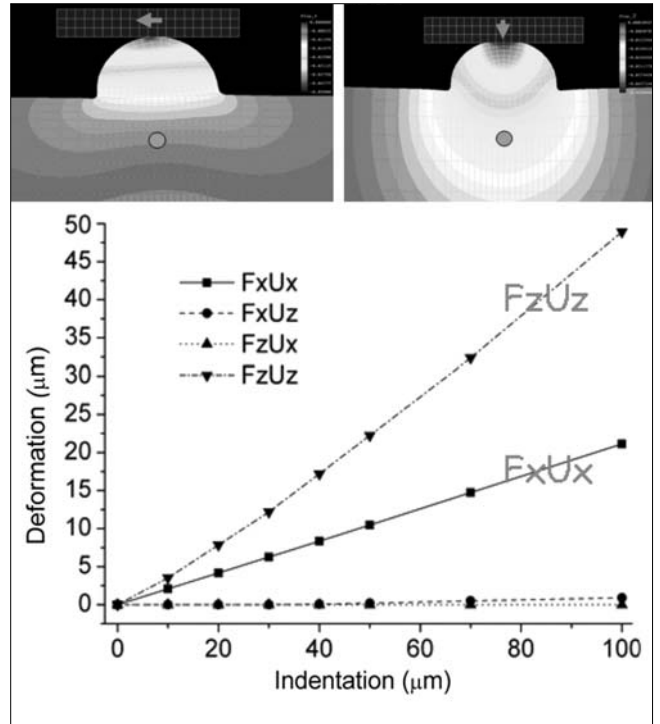
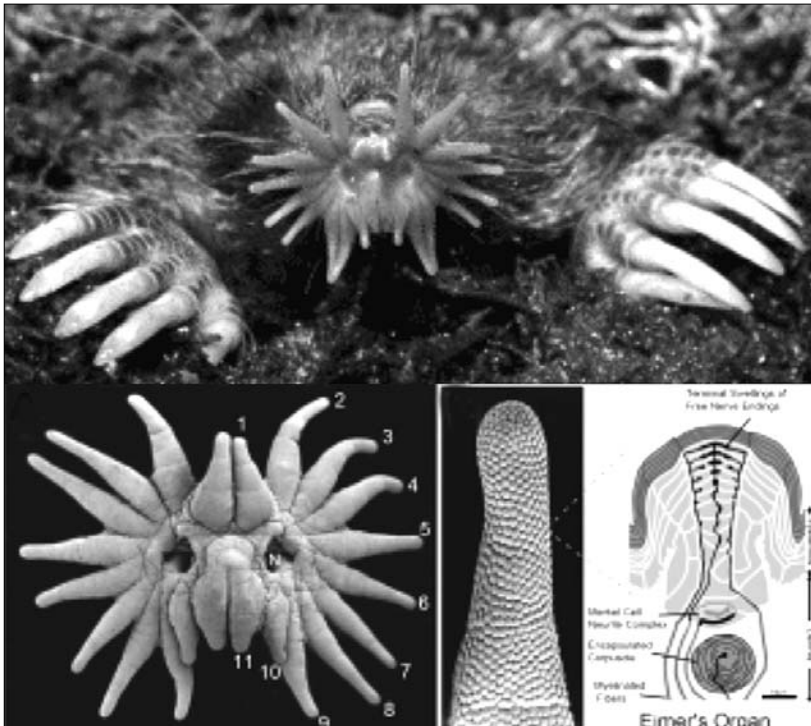
A direkt probléma első megoldásait a 19. század vége felé már megtalálták, bár az elaszticitás elméletének ekkor még semmi köze sem volt a tapintóeszközök-höz. A modell a múlt század nyolcvanas éveinek közepétől kezdve vált a bőr, illetve a mesterséges nyomásérzékelők borításának elsődleges leírási módjává.

A három szabadsági fokú érzékelők megjelenésével az elmélet újabb bővítési lehetőségek elébe nézett. Kutatásaink egyik eredménye, hogy a végtelen féltér sík felületét – az ujjainkon található ujjlenyomatok illetve a biológiai rendszerekben található legfejlettebb tapintórendszerek (7. ábra) mintájára – más geometriával váltottuk fel.

Az anyagra így azonban már nem alkalmazható az eredeti leírás, ezért az új borításban ébredő mechanikai feszültség leírásához újabb *végelelem modellt* is készítettünk. Ez a végtelen féltér modell egyfajta kibővítésének is tekinthető.

7. ábra

A csillagorrú vakond (*Condylura cristata*) tapintórendszere, mely az ujjlenyomatoknál fejlettebb rugalmas félgömböket alkalmaz a tapintási információ mechanikus elven történő szűrésére és erősítésére



8. ábra

Fent: a rugalmas félgömbök végelelem modellje a kialakuló feszültségállapotokkal különböző irányú terhelés alatt.

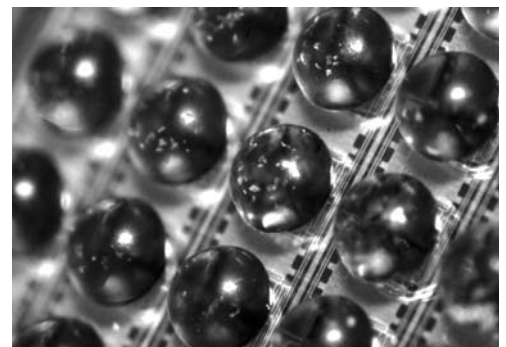
Lent: az érzékelők helyén ébredő feszültség-komponensek egymástól független és a terheléssel lineáris kapcsolata.

A csillagorrú vakondról mintázott neuromorf borításunk tulajdonképpen egy a síkfelületből kiemelkedő rugalmas félgömb, melynek számos előnyös tulajdonságára fény derült:

- A félgömb szerkezeténél fogva a térben folytonos bemeneti erőeloszlást lokalizálja és diszkrétizálja a félgömbök csúcsára és egyben ide összpontosítja az erőhatást.
- A félgömb struktúra úgy módosítja a rugalmas anyag kódolási mechanizmusát, hogy az alatta megfelelő módon elhelyezett érzékelők a felületi erőhatások mindhárom komponensét egymástól függetlenül, lineáris kapcsolattal tudják mérni (8. ábra).

9. ábra

A 8x8-as chip a félgömbös borítással



Érzékelő tömbjeinket a végeelem szimulációk alapján tervezett borítással ellátva (9. ábra) rendszerünk nyíróirányú erőkre mutatott érzékenységet is javítani tudtuk. A geometriai struktúra biológiai rendszerekben betöltött szerepével kapcsolatos feltételezéseinket is alá tudtuk támasztani.

### 5. Rendszerszintű integrálás

Az érzékelők jeleit egy kiolvasó egység továbbítja a számítógép felé. A kiolvasó áramkör szűri és erősíti az analóg jeleket, kompenzálja az esetleges alapállapotú feszültségek közti eltéréseket, és soros vagy USB porton keresztül éri el a PC-t.

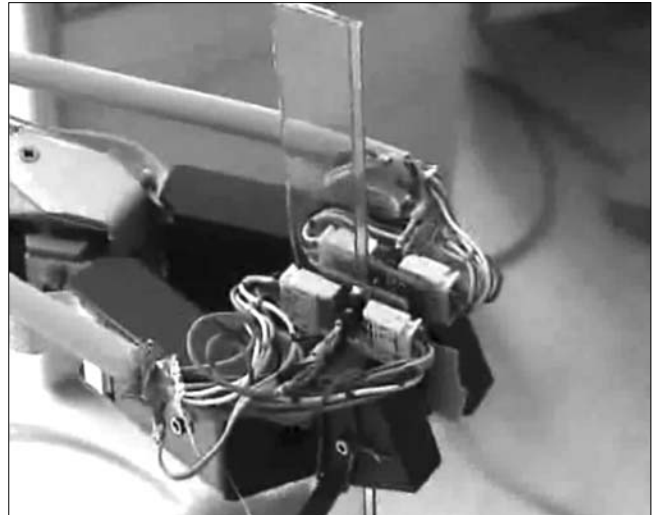
A PC-n egy Windows XP operációs rendszerre fejlesztett speciális adatfeldolgozó és megjelenítő szoftver (10. ábra) fogadja, tárolja és elemzi az adatokat akár valós időben, akár utólag visszajátzva.

### 6. Proaktív robotkar vezérlés, csúszás megelőzés

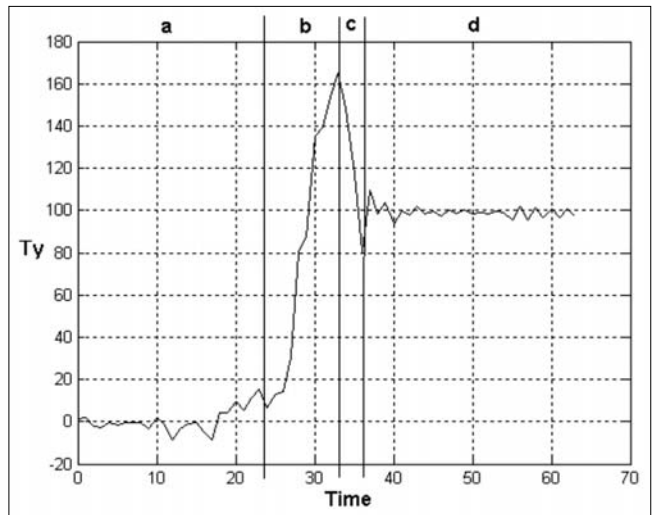
A robotkaros megfogási feladat egyszerű példa a háromkomponensű tapintásérzékelő tömbök alkalmazására.

Az általunk használt robotkar végén található két ujj a kis-, és közepes méretű objektumok megfogására és tartására alkalmas (11. ábra).

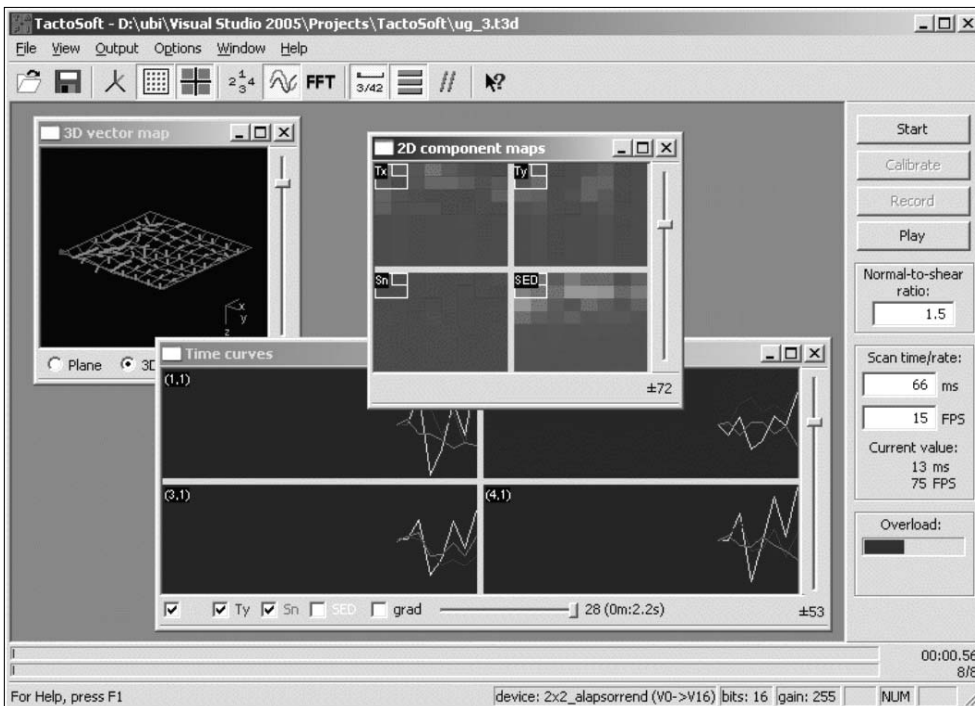
Törékeny, ismeretlen tulajdonságú objektumok, mint például csúszós, vékonyfalú üvegpohár csúszásmentes megtartásához elengedhetetlen a tapintásból nyert folyamatos információ ismerete. Amikor például egy kétujjú robotkar üres poharat tart, amelybe folyamatosan folyadékot töltünk, tömege állandóan változik. Ebben az esetben a tárgy súlyának növekedésével arányosan, automatikusan növelni kell a szorítóerőt is.



11. ábra  
Katana robotkéz tart egy tárgyat a két ujjára felszerelt tapintásérzékelő tömb között



12. ábra  
A megfogás időbeli folyamata a tapintásérzékelők jelein keresztül:  
a) semmi sincs megfogva;  
b) a nyíróerő a súllyal egyenes arányban nő;  
c) a tárgy elkezdi csúszni, az erő lecsökken;  
d) csúszás alatt a csúszó súrlódási együttható által meghatározott állandó erő



10. ábra  
A tapintásérzékelő rendszer szoftverének pillanattfelvétele

Ha a szorítóerő túl kicsi, a pohár megcsúszhat. A rendszer ezt érzékeli és a tapintásból származó információ alapján megnöveli a robot ujjai által kifejtett erőt, hogy a csúszás megálljon.

A nyíróerők mérésére alkalmas tapintóeszköz hatalmas előnye, hogy a csúszási határérték ismeretében a robotkart még a megcsúszás előtt figyelmeztetni lehet a bekövetkező eseményre, megelőzve ezzel a tényleges elmozdulást (12. ábra).

## 7. Összefoglalás, alkalmazások

Az előzőekben ismertettük egy komplex tapintásérzékelő tömb fejlesztésének menetét. Az érzékelő tömbök fő újdonsága, hogy a taxelemben támadó erő-vektor mindhárom komponensét képesek érzékelni. Az oldalirányú, nyíróerők mérése a magas szintű tapintási-megfogási feladatok alap követelménye, mivel súrlódási viszonyok szinte minden tapintási eseményben jelen vannak.

Az MFA-ban fejlesztett tapintásérzékelő tömböket elsősorban orvostechikai alkalmazásokban kívánjuk hasznosítani a TactoLogic Kft. termék-fejlesztéseiben. Endoszkópra, katéterre, autonóm mikro-robotokra szerelve a miniatűr érzékelők rendkívül hasznos többlet információt tudnak nyújtani olyan helyekről is, ahol az emberi tapintás nem kivitelezhető.

Az érzékelőkkel számszerűsíthetővé tehető a fizikális diagnosztika is. Tapintás-kijelzőkkel felszerelt rendszerrel megoldható lesz majd a tapintási távjelenlét és hosszú távon az érzékelők akár végtag protézisekbe is beépíthetők lesznek.

### Köszönetnyilvánítás

A tapintás érzékelés fejlesztése a Széchenyi Program TELESENSE projekt támogatásával indult.

### Irodalom

- [1] G. Vásárhelyi, M. Ádám, É. Vázsonyi, Zs. Vízváry, A. Kis, I. Bársony, Cs. Dücső, "Characterization of an Integrable Single-Crystalline 3D Tactile Sensor," IEEE Sensors Journal, Aug. 2006, Vol. 6, No.4., pp.928–934.
- [2] G. Vásárhelyi, M. Ádám, É. Vázsonyi, I. Bársony, Cs. Dücső, „Effects of the Elastic Cover on Tactile-Sensor Arrays,” Sens. Actuators A, 2006, Vol. 132, pp.245–251.
- [3] G. Vásárhelyi, B. Fodor, T. Roska, „Tactile Sensing-Processing: Interface Cover Geometry & the Inverse Elastic Problem,” Sens. Actuators A, 2007, Vol. 140, pp.8–18.
- [4] Zs. Vízváry, P. Fűrjes, M. Ádám, Cs. Dücső, I. Bársony, "Mechanical Modelling of an Integrable 3D Force Sensor by Silicon Micromachining," National Institute for Research and Development in Microtechnologies (Bucharest) (ed.) Special issue featuring selected papers from the 13th European Micromechanics workshop, MME'02, Bristol, Institute of Physics Publishing, 2003. pp.165–168.
- [5] É. Vázsonyi, M. Ádám, Cs. Dücső, Zs. Vízváry, A.L. Tóth, I. Bársony, "Three-dimensional Force Sensor by Novel Alkaline Etching Technique," Sens. Actuators A, Vol. 123-124, No.23., Sept. 2005, pp.620–626.
- [6] M. Ádám, T. Mohácsy, P. Jónás, Cs. Dücső, É. Vázsonyi, I. Bársony, "CMOS Integrated Tactile Sensor Array by Porous Si Bulk Micromachining", Sens. Actuators A, 2007, In Press, Corrected Proof, Available online 6 August 2007.
- [7] A. Kis, F. Kovács, P. Szolgay, "3D Tactile Sensor Array Processed by CNN-UM: A Fast Method for Detecting and Identifying Slippage and Twisting Motion", International Journal on Circuit Theory and Application (CTA), 2006, No.34., pp.517–531.