

# TAPINTÁSÉRZÉKELŐK ÉS RUGALMAS BORÍTÁSUK TERVEZÉSE

*Tézisfüzet a Ph.D. disszertációhoz*

**Vásárhelyi Gábor**

Konzulens:

Kovács Ferenc, D.Sc.

a Magyar Tudományos Akadémia Doktora

Témavezető:

Roska Tamás, D.Sc.

a Magyar Tudományos Akadémia Rendes Tagja



Pázmány Péter Katolikus Egyetem  
Információs Technológiai Kar  
Multidiszciplináris Műszaki Tudományok Doktori Iskola

Budapest 2007

## 1. Bevezetés

A tapintás különleges, alapvető és mégis sok szempontból a legkevésbé ismert érzékszervünk. Alapvető, mert a tapintási információ nélkülözhetetlen mindennapi létünkhöz. Különleges, mert az egyetlen szenzoros rendszerünk, mely az anyagot a maga „kézzelfogható” fizikai valóságában térképezi fel – ráadásul nem testrészhöz kötött, hanem a teljes testfelületen elosztva. Érzékszerveink többsége a tárgyakat távolról érzékeli a belőlük kiinduló másodlagos mennyiségek alapján – a látáshoz a tárgyról visszaverődő fény kell, a halláshoz tovaterjedő hanghullámok, a szagláshoz a levegőben utazó molekulák. A tárgyak érintése viszont közvetlen kontaktust igényel, mely ellentmondásmentesen tudunkra adja, hogy mi van a környezetünkben. Ha délibábot látunk de nem érinthetjük meg, tudjuk, hogy az valójában nincs ott. Ha pedig nekimegyünk az üvegajtónak, egész biztosan tudni fogjuk, hogy ott volt, még ha nem is láttuk. Egyszóval több érzékszervből jövő ellentmondó információ esetén is sok esetben a tapintásnak hiszünk inkább.

Mindezekből látszik, hogy a tapintás az ember számára rendkívül fontos érzékszerv, melynek kutatása, modellezése, megismerése rengeteg szépséget és érdekességet rejt magában. Ph.D. munkám is a tapintásérzékelésről szól – de nem biológiai rendszereken, hanem mesterségesen létrehozott tapintóeszközökön.

Kutatásaim alapját a Magyar Tudományos Akadémia Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetében (MTA MFA) fejlesztett tapintásérzékelő tömbök képezik. Ezek az apró MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) eszközök úgynevezett mikro-elektro-mechanikai megmunkálással készülő, olyan érzékelő-jelfeldolgozó rendszerek, melyek a hagyományos nyomásérzékelőkkel ellentétben a felületüket érő erőknem csak a felületre merőleges, hanem avval párhuzamos, nyíróirányú komponenseit is képesek mérni, feldolgozni és továbbítani. Munkám során bekapcsolódtam az érzékelő tömbök tervezésébe, tesztelésébe, rendszerszintű integrálásába, de fő feladatomban az érzékelőket borító, bőrrel analóg rugalmas réteg vizsgálata, tervezése volt.

A rugalmas borítás a tapintásérzékelők nélkülözhetetlen és meghatározó kelléke, mely amellet, hogy bizonyos fokú fizikai védelmet biztosít, mechanikai tulajdonságainál fogva alapvetően befolyásolja az érzékelési folyamatot. Gondoljunk csak a nyáron megvastagodó talpunkra, vagy ennek ellenkezőjére, a lehorzsoltsó bőrfelületünkön tapasztalható megnövekedett érzékenységre. 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. Ilyenformán a *rugalmas borítás* a

tapintási folyamat *első téridőbeli dinamikus jelfeldolgozó rétegének* tekinthető.

Első feladatomban ennek a téridőbeli, nem triviális kódolási mechanizmusnak a megértése, feltérképezése volt. Második lépésként a kérdéskört a másik oldaláról közelítettem meg – arra kerestem választ, hogy a rugalmas borítás anyagi tulajdonságainak és geometriájának tudatos megválasztásával, neuromorf indíttatású *tervezésével* hogyan lehet a kódolás jellegét befolyásolni és az eszközünk által mért, kódolt jelekből minél könnyebben visszanyerni a felületi erőeloszlást.

## **2. Vizsgálati módszerek**

A tapintásérzékelők és borításuk vizsgálatához mindenekelőtt érdemes a természet egyik mesterművét, az *ember* – vagy akár más élőlények – *tapintási rendszerét* megismerni. A mesterséges tapintóeszközök minden összetevője megfeleltethető a biológiai tapintásérzékelés valamely komponensének – a jó öreg evolúciónk évmilliókig fejlesztett eszközeiből ezért rengeteg neuromorf ötletet meríthetünk saját érzékelőink tervezésekor. A tapintás neurobiológiájának, a mechanoreceptoraink működésének vagy a bőr struktúrájának, mechanikai tulajdonságainak vizsgálata nélkül véleményem szerint nem érdemes belekezdeni tapintóeszközök készítésébe.

A munkámban használt MEMS érzékelők működése a *piezorezisztív effektusra* épít. Amikor egy piezorezisztív anyagot mechanikai erőhatás ér, az anyag a benne lévő nyúlás mértékével arányosan megváltoztatja ellenállását. Az érzékelőink deformálható mikrohidacskákat tartalmaznak, melyekbe ilyen piezoellenállások vannak beágyazva. Az érzékelők tervezéséhez, működésük megértéséhez feltétlenül szükség van tehát néminemű MEMS technológiai ismeretre, valamint a piezorezisztív effektus elméletének mélyebb megértésére.

A rugalmas borítás matematikai modelljét a *kontinuummechanikából* származtatjuk. A borítás anyaga első közelítésben felfogható egy homogén, izotróp, *végtelen féltérnek*, mely alapvetően a Hooke-törvény szerint viselkedik. A féltérünk egyetlen szabad felületét érő erőhatások az anyagot deformálják, benne bonyolult mechanikai feszültségeloszlást ébresztenek. Mivel a feszültségek az anyagban általában az erőhatás közelébe koncentrálódnak és attól távolodva gyorsan elenyésznek, jó közelítésnek tekinthető, ha a tapintásérzékelőinket a véges borításunk vastagságának megfelelő mélységbe képzeljük a végtelen anyagban. Az első feladat tehát adott erőeloszlás függvényében, az egyensúlyi egyenletek megoldásával meghatározni az adott mélységben ébredő feszültséget vagy alakváltozást. Inverz problémánk lényege pedig a véges számú pontban mért feszültségből a felületi erőeloszlás visszaállítása.

A direkt probléma első megoldásait a XIX. század vége felé már megtalálták, bár az elaszticitás elméletének ekkor még semmi köze nem volt a tapintóeszközökhöz. A modell a múlt század nyolcvanas évek közepétől kezdve vált a bőr illetve a mesterséges nyomásérzékelők borításának elsősleges leírási módjává, ám a három szabadsági fokú érzékelők megjelenésével az elmélet újabb bővítési lehetőségek elébe nézett.

Kutatásaim egyik eredménye, hogy a végtelen féltér sík felületét – az ujjainkon található ujjlenyomatok mintájára – más geometriával váltottam fel. Az anyagra azonban így már nem alkalmazható az eredeti leírás, ezért az új borításhoz Fodor Balázssal együttműködve *végeselem modellt* is készítettünk, mely a végtelen féltér modell egyfajta kibővítésének is tekinthető.

Az MTA MFA-ban készített érzékelő tömböket egy *speciális mérőrendszer* segítségével teszteltük, fejlesztettük. A mérőrendszerben az érzékelők rögzíthetők, mikrocsavarokkal és egy léptetőmotoros egységgel finoman pozícionálhatók, dönthetők, rájuk különböző irányú és nagyságú, pontszerű vagy kiterjedt felületű terhelés adható. Az érzékelő tömbben mért jelek egy általunk fejlesztett erősítő egységen keresztül jutnak a számítógépbe, ahol a szintén saját készítésű szoftver környezet vár rájuk kiértékelésre.

### 3. Új tudományos eredmények

#### *I. Téziscsoport: Tapintásérzékelők és borításuk minősítése*

Ahhoz, hogy a tapintásérzékelőkkel hatékonyan és megbízhatóan dolgozhassunk, mindenképp meg kell ismerni azok működését. Első körben össze kell hasonlítani az érzékelők elméletileg várt karakterisztikáját a valóságban mérhetővel, borítás nélkül. Ezután meg kell ismételni a méréseket borítás jelenlétében, és kísérletileg alá kell támasztani a legegyszerűbb, sík borítást leíró végtelen féltér modell alkalmazhatóságát mind a direkt, mind az inverz megközelítésben.

#### **I.1. Kidolgoztam az MFA-ban előállított MEMS keresztidas, piezorezisztív, 3D tapintásérzékelő fizikai működésének pontos leírását, és igazoltam ennek, valamint az eszköz végeelem modelljének érvényességét összetett kísérleti rendszeren végzett karakterisztika mérésekkel.**

Az érzékelők fizikai modelljét az eddigi irodalom alapján az MFA-ban tömbi MEMS megmunkálással készített eszköz leírására hangoltam. A modell által előrevetített lineáris karakterisztika és az előzetes végeelem szimulációk által jósolt érzékenység összhangban van a komplex mérőrendszeren végzett valós mérésekkel.

#### **I.2. Nagy térbeli felbontású, három komponensű mérésekkel igazoltam, hogy a végtelen féltér modell hatékonyan alkalmazható a 3D érzékelőket borító véges vastagságú,**

**sík felületű rugalmas rétegek leírására. Mérések alapján megállapítottam, hogy borítás jelenlétében az érzékelők jele a rugalmas borítás alakváltozási tenzorának három lokális komponensével arányos.**

Az érzékelők receptív mezeje sík borítás jelenlétében nem pontszerű, hanem egy térben folytonos kiterjedt terület – az anyagmodellnek megfelelően bonyolult eloszlású súlyozással. Ezt a háromkomponensű receptív mező eloszlást mértem ki 3  $\mu\text{m}$ -es térbeli felbontással az érzékelő fölötti teljes síkfelületen, és összehasonítottam a végtelen féltér modell alapján számítottal. Megállapítottam, hogy az előzőleg más kutatócsoportok által feltételezett feszültségtenzor komponensek helyett az érzékelők jele borítás jelenlétében a rugalmas anyag alakváltozási tenzorának megfelelő komponenseivel arányos.

**I.3. Megoldottam a gumiszerű rugalmas féltér inverz problémáját tetszőleges irányú pontszerű terhelésre és az eredményeket felhasználva sík rugalmas borítással ellátott érzékelőkön taktilis hiperpontosságot valósítottam meg.**

A sík borítás kódolási mechanizmusát felhasználva, pontszerű terhelésre lehetőséget találtam az erő helyének, irányának és amplitúdójának pontos és egyértelmű visszaszámolására. Elméleti eredményeimet az érzékelőkön is alkalmaztam és egyben mérésekkel is igazoltam: egy darab érzékelő elem jeleinek felhasználásával tetszőleges merőleges terhelés helyét 300×300  $\mu\text{m}$ -es receptív mező felületen 3  $\mu\text{m}$  (1%) pontossággal,



amplitúdóját szintén nagy pontossággal, valós időben visszaszámoltam. Az eljárást a szoftver környezetbe is beépítettem.

## *II. Téziscsoport: Neuromorf elemek a tapintásérzékelők szolgálatában*

A nagy felbontású biológiai tapintórendszerek legtöbbször nem sík felületűek, hanem ujjlenyomatokkal, különféle barázdákkal, szőrszálakkal vannak kiegészítve. Ezen jellegzetességek biológiai rendszerekben betöltött szerepét vizsgálva új módszereket vezettem be a mesterséges érzékelők tervezéséhez. A sík felületű borítást az ujjlenyomatok mintájára más geometriával váltottam fel, hogy az érzékelők különböző tulajdonságait, érzékenységét, kódolási mechanizmusát tudatosan befolyásolhassam. Legfontosabb új eredményeim a következők:

### **II.1. Szőryszerű és ujjlenyomatszerű elemeket kapcsolva az érzékelőkhöz módosítottam azok karakterisztikáját, megnöveltem érzékenységüket és alátámasztottam az elemek biológiai rendszerekben betöltött feltételezett szerepét.**

Mivel sík felületű érzékelőkkel a jelfeldolgozás a rugalmas anyag komplex kódolása miatt igen nehézkes, a borítás alakját és struktúráját neuromorph módon megváltoztattam. Amellett, hogy így az érzékelőink karakterisztikáját tökéletesíteni, nyíró irányú érzékenységét növelni tudtam, méréseimmel egyben alá is támasztottam azt az elképzelést, miszerint az ujjlenyomatoknak

jelerősítő, jelkiemelő hatása van, a szőrszálak pedig az oldalirányú erők érzékelésében játszanak fontos szerepet.

**II.2. Végeelem módszeres szimulációkat felhasználva bizonyítottam, hogy a borítás geometriájának tudatos tervezésével az anyag kódolási mechanizmusa leegyszerűsíthető. A borítás síkjából kiemelkedő rugalmas félgömböket alkalmazva módszert adtam a felületi erőhatás lokalizálására és a három erőkomponens egymástól független és közvetlen mérésére.**

Az elméleti megfontolásaimat a 3D érzékelőkön kísérletekkel is alátámasztottam egy anyagmintázat osztályozási példán keresztül. A félgömbök alkalmazásával a borítás védelmének megőrzése mellett a folytonos eloszlású bemenetet diszkrétizálni tudtam, kikerülve ezáltal az anyag kódolási mechanizmusából eredetileg adódó inverz számítási nehézségeket.

**II.3. A rugalmas félgömbök felhasználásával létrehoztam egy olyan különleges borítás tervezési eljárását, mellyel tetszőleges nyomásmérő – azaz csak a felületre merőleges erőkomponenst mérő – eszközön lehetővé tettem a felülettel párhuzamos, nyíróirányú erők független mérését is.**

A félgömbös rugalmas borítást csak merőleges irányú erőket mérő tapintásérzékelő tömbökön is sikerrel alkalmazhatjuk. Ekkor egy félgömb alatt négy 1D érzékelő elem jelének kombinálásával jó hatásfokkal tudunk a félgömbökre ható nyíróirányú jelet

származtatni – újfent a végeelem modell szimulációs eredményei alapján. A módszer általánosan alkalmazható tetszőleges méretű és elemszámú nyomásmérő tömbön. Kísérleti úton egy 9×9 elemszámú kapacitív tömbön igazoltam a feltevésem helyességét.

## **4. Az eredmények felhasználási területe**

Eredményeim felhasználási területe természetesen egybeesik a tapintásérzékelők felhasználási területével. Tapintásérzékelőket „legkézenfekvőbben” robotkarokon alkalmazhatunk, tetszőleges megfogási feladathoz. Az ipari felhasználás és a tudományos kutatási célok mellett egyre aktívabb felvevőpiac a tág értelemben vett orvostudomány. Érzékelőinket felhasználhatjuk endoszkópos vizsgálatoknál, ahol a kézi tapintás kivitelezhetetlen. Megfelelő tapintás kijelző integrálásával létrehozhatunk virtuális teleoperációt segítő rendszert. Az érzékelőket hosszú távon felhasználhatjuk a saját mechanoreceptoraink helyettesítőjeként végtagukat vesztettek protézisében.

## **5. Köszönetnyilvánítás**

Mindenekelőtt szeretnék külön köszönetet mondani témavezetőmnek, Roska Tamásnak, aki tengernyi dolga mellett is tudott rám időt szánni és hasznos tanácsokat adni, amikor csak szükségem volt rá. Köszönöm konzulensem, Kovács Ferenc sokoldalú segítségét is.

Hálás köszönet minden segítőmnek az MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézetéből. Dücső Csabának a rendkívül hasznos és motiváló konzultációkért, Ádám Marikának a lelkes és precíz segítségével az érzékelők elkészítésében, tesztelésében, Nagy Attilának a hihetetlen türelméért és kezűgyességéért az érzékelők összeszerelésében, Juhász Gyurinak a léptetőmotoros egység elkészítéséért, Forgács Bélának és munkatársainak a mérőrendszerünk és minden egyéb hülye kívánságom precíz összerakásáért, Bársony Istvánnak a csoport összefogásáért és végül az egész csoportnak, a nem említettekkel együtt a végtelen emberségességéért.

Köszönet a Pázmány Egyetem Doktori Iskolájából Szolgay Péternek és Kis Attilának a sok éves kitartó együttműködésért és Attilának a külföldi utazásaink élménygazdagságáért. Bárdi Tamásnak, Havasi Lacinak és Hillier Daninak a számítógépek világában nyújtott óriási segítségükért, rajtuk kívül még Lázár Annának, Fodróczy Zolinak, Kóbor Istvánnak és a „másodéveseknek” a jó társaságért, hasznos vagy éppen haszontalan beszélgetésekért és a közös ebédekért.

Külön köszönet neurobiológusainknak, Négyessy Lászlónak, Vidnyánszky Zoltánnak és Hámori Józsefnek, amiért biztosították a doktori iskolában az interdiszciplinaritás alapjait.

Köszönet illeti az alábbi alkalmi konzulenseimet a rendkívül hasznos szakmai tanácsokért: Páczelt István (Miskolci Egyetem, Mechanika

Tanszék), Stépán Gábor és Szabó László (Budapesti Műszaki Egyetem, Műszaki Mechanika Tanszék), Farkas Henrik (Budapesti Műszaki Egyetem, Fizikai Kémia Tanszék), Nick Bottka (University of Virginia, Department of Electrical & Computer Engineering).

Köszönet Fodor Balázsnak és Váradi Károlynak a Budapesti Műszaki Egyetem Gépelemek Tanszékéről a végeselem modellekért. Köszönet Mari nagynénémnek és Jessnek az angol nyelvi tanácsokért és korrektúrákért.

Köszönet Tamásnak, Annának, Krisztának, Zsókanak és Zsófinak minden másért, és természetesen a bácshegyi diófáknak a remek árnyékért a disszertációírás tikkasztó nyári napjain.

Kutatásom anyagi támogatását részben fedezték a következő grantek:

- „Telesense Project” Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Program (NKFP 2001/2/035)
- Országos Tudományos Kutatási Alap (OTKA) Programok: T47002 és TS040858.

## 6. A szerző publikációi

### Folyóiratokban

- [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*, under review

### Konferenciákon

- [4] M. Ádám, É. Vázsonyi, I. Bársony, **G. Vásárhelyi** and Cs. Dücső, “Three Dimensional Single Crystalline Force Sensor by Porous Si Micromachining,” *Proceedings of IEEE Sensors 2004*, Vienna, vol. 1, pp. 501–504
- [5] Kis A., **Vásárhelyi G.**, Ádám M., Szolgay P. – “Taktilis Érzékelés: Szenzorok és Algoritmusok,” *XI. MITT Kongresszus*, Pécs (2005)
- [6] **G. Vásárhelyi**, M. Ádám, É. Vázsonyi, I. Bársony, Cs. Dücső, “Effects of the Elastic Covering on Tactile Sensor Arrays,” *Proceedings of EuroSensors 2005*, Barcelona
- [7] **G. Vásárhelyi**, B. Fodor, “Enhancing Tactile Capabilities with Elastic Hemispheres,” *Proceedings of EuroHaptics 2006*, Paris, pp. 491–494

### Függő szabadalmak

- [8] **Vásárhelyi G.**, Kis A., Dücső Cs., Fodor B, „Rugalmas borítás tapintásérzékelőkhöz és rugalmas borítással ellátott tapintásérzékelő elrendezés,” *Magyar szabadalmi bejelentés*, P0600892 (bejelentés dátuma: 30/11/2006)

## 7. A témához kapcsolódó irodalom

### Jedlik Laboratórium (PPKE ITK, Budapest)

- [9] 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), special issue on CNN*, 2006; 34: 517–531
- [10] A. Kis, F. Kovács, P. Szolgay: “Hardware and Software Environment for a Tactile Sensor Array,” *Proceedings of Eurosensors XIX*, 2005, Barcelona, Spain, pp. 324–328
- [11] A. Kis, F. Kovács, P. Szolgay: “Grasp Planning Based on Fingertip Contact Forces and Torques,” *Proceedings of Eurohaptics 2006*, Paris, France, pp. 455–459

### MTA MFA (Budapest)

- [12] Zs. Vízváry, P. Fürjes, 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
- [13] 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, Sep. 2005, pp. 620–626

### Ron S. Fearing (Robotics, Berkeley)

- [14] R. S. Fearing, J. M. Hollerbach, “Basic Solid Mechanics for Tactile Sensing,” *Int. J. of Robotics Research*, 1985, vol. 4, no. 3
- [15] R. S. Fearing, “Tactile Sensing Mechanisms,” *Int. J. of Robotics Research*, 1990, vol. 9, no. 3, pp. 3–23
- [16] R. S. Fearing and T. O. Binford, “Using a Cylindrical Tactile Sensor for Determining Curvature,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1991, vol. 7, no. 6, pp. 806–817
- [17] U. Singh, R.S. Fearing, “Tactile After-Images from Static Contact,” *7th Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, ASME IMECE Anaheim, CA Nov. 1998
- [18] G. Moy, R.S. Fearing, “Effects of Shear Stress in Teletaction and Human Perception,” *7th Symp. on Haptic Interfaces for Virtual*

*Environment and Teleoperator Systems*, ASME IMECE Anaheim, CA  
Nov. 1998

- [19] G. Moy, U. Singh, E. Tan, R.S. Fearing, “Human Psychophysics for Teletaction System Design,” *Haptics-e The Electronics Journal of Haptics Research*, 2000, vol. 1, no. 3

Kenneth O. Johnson

(Mind/Brain Institute, Johns Hopkins University)

- [20] K. O. Johnson, J. R. Phillips, “Tactile Spatial Resolution I. Two Point Discrimination, Gap Detection, Grating Resolution, and Letter Recognition,” *J. Neurophysiology*, 1981, vol. 46, no. 6, pp. 1177–1191
- [21] K. O. Johnson, J. R. Phillips, “Tactile Spatial Resolution II. Neural Representation of Bars, Edges, and Gratings in Monkey Primary Afferents,” *J. Neurophysiology*, 1981, vol. 46, no. 6, pp. 1192–1203
- [22] J. R. Phillips, K. O. Johnson, “Tactile Spatial Resolution III. A Continuum Mechanics Model of Skin Predicting Mechanoreceptor Responses to Bars, Edges, and Gratings,” *J. Neurophysiology*, 1981, vol. 46, no. 6, pp. 1204–1225
- [23] K. O. Johnson, “The Roles and Functions of Cutaneous Mechanoreceptors,” *Current Opinion in Neurobiology*, 2001, vol. 11, pp. 455–461

Mandayam A. Srinivasan (M.I.T. Touch Lab)

- [24] M. A. Srinivasan, K. Dandekar, “An Investigation of the Mechanics of Tactile Sense Using Two Dimensional Models of the Primate Fingertip,” *J. Biomechanical Engineering*, 1996, vol. 118, pp. 48–55
- [25] K. Dandekar, B. I. Raju, M. A. Srinivasan, “3-D Finite-element Models of Human and Monkey Fingertips to Investigate the Mechanics of Tactile Sense,” *J. Biomech. Eng.*, 2003, vol. 125(5), pp. 682–91

Makoto Shimojo

(The University of Electro-Communications, Tokyo, Japan)

- [26] M. Shimojo, “Spatial Filtering Characteristic of Elastic Cover for Tactile Sensor,” *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, San Diego, CA, 1994, pp. 287–292
- [27] M. Shimojo, “Mechanical Filtering Effect of Elastic Cover for Tactile Sensor,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1997, vol. 13, no. 1, pp. 128–132



Takashi Maeno (Keio University, Yokohama, Japan)

- [28] T. Maeno, K. Kobayashi, N. Yamazaki, “Relationship Between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors,” *JSME International Journal*, 1998, vol. 41, pp. 94–100
- [29] D. Yamada, T. Maeno, Y. Yamada, “Artificial Finger Skin Having Ridges and Distributed Tactile Sensors used for Grasp Force Control,” *Journal of Robotics and Mechatronics*, 2002, vol. 14, no. 2, pp. 140–146
- [30] Y. Mukaibo, H. Shirado, M. Konyo, T. Maeno, “Development of a Texture Sensor Emulating the Tissue Structure and Perceptual Mechanism of Human Fingers,” *Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, pp. 2576–2581

Danilo De Rossi (Università di Pisa)

- [31] C. Domenici, D. De Rossi, “A Stress-Component Selective Tactile Sensor Array,” *Sens. Actuators A*, 1992, vol. 31(1–3), pp. 97–100
- [32] D. De Rossi, G. Canepa, G. Magenes, F. Germagnoli, A. Caiti, T. Parisini, “Skin-like Tactile Sensor Arrays for Contact Stress Field Extraction,” *Material Sciences Engineering C1*, 1993, pp. 23–36
- [33] A. Caiti, G. Canepa, D. De Rossi, F. Germagnoli, G. Magenes, T. Parisini, “Towards the Realization of an Artificial Tactile System: Fine-form Discrimination by a Tensorial Tactile Sensor Array and Neural Inversion Algorithms,” *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1995, vol. 25, issue 6, pp. 933–946

Rugalmasságtan, végtelen féltér modell, rugalmas borítás

- [34] J. Boussinesq, “Application des Potentials à l’étude de l’équilibre et du mouvement des solides élastiques,” *Paris: Gauthier-Villars*, 1885
- [35] A. Flamant, *Paris Compt. Rend.*, 1892, vol. 114, pp. 1465–1465
- [36] S. Timoshenko, J. N. Goodier, “Theory of Elasticity,” New York:McGraw-Hill, 1951
- [37] A. E. H. Love, “The Mathematical Theory of Elasticity”, 4th Edition, Cambridge Univ. Press, 1952
- [38] F. Zee, E. M. G. Holweg, W. Jongkind, G. Honderd, “Shear force measurement using a rubber based tactile matrix sensor,” *Proc. 8th Int. Conf. Advanced Robotics, Monterey, CA*, 1997, pp. 733–737
- [39] N. Chen, H. Zhang, R. Rink, “Tactile Sensing of Point Contact,” *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1995. 'Intelligent Systems for the 21st Century'*, 1995, vol. 1, pp. 574–579

- [40] G. J. Gerling, G. W. Thomas, “The Effect of Fingertip Microstructures on Tactile Edge Perception,” WHC 2005, pp. 63–72
- [41] M. R. Tremblay, M. R. Cutkosky, “Estimating Friction Using Incipient Slip Sensing During a Manipulation Task,” *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 1993, pp. 429–434

### Három komponensű tapintásérzékelők

- [42] H. Shinoda, N. Morimoto and S. Ando, “Tactile Sensing Using Tensor Cell,” *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1995, vol. 1, pp. 825–830
- [43] L. Zhu, J. W. Spronck, “A Capacitive Tactile Sensor for Shear and Normal Force Measurements,” *Sens. Actuators A*, 1992, vol. 31(1-3), pp. 115–120
- [44] K. Kamiyama, H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, “Evaluation of a Vision-based Tactile Sensor,” *Proc. of 2004 International Conference on Robotics and Automation*, 2004, WP-6
- [45] M. Ohka, Y. Mitsuya, I. Higashioka, H. Kabeshita, “An Experimental Optical Three-axis Tactile Sensor for Micro-Robots,” *Robotica*, 2005, vol. 23, pp. 457–465
- [46] S. A. Mascaro, H. H. Asada, “Measurement of Finger Posture and Three-axis Fingertip Force Using Fingernail Sensors,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, vol. 20(1), pp. 26–35
- [47] P. M. Chu, S. Sarro, S. Middelhoek, “Silicon Three-Axial Tactile Sensor,” *Sens. Actuators A*, 1996, vol. 54, pp. 505–510
- [48] M. Hakozaiki, H. Shinoda, “Digital Tactile Sensing Elements Communicating through Conductive Skin Layers,” *Proc. 2002 IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, 2002, pp. 3813–3817
- [49] L. Wang, D. J. Beebe, “A Silicon-based Shear Force Sensor: Development and Characterization,” *Sens. Actuators A*, 2000, vol. 84, pp. 33–44
- [50] B. J. Kane, M. R. Cutkosky, G. T. A. Kovacs, “A Traction Stress Sensor Array for Use in High-Resolution Robotic Tactile Imaging,” *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2000, vol. 9, no. 4, pp. 425–434

### Mechanoreceptorok

- [51] H. Ogawa, “The Merkel Cell as a Possible Mechanoreceptor Cell,” *Prog Neurobiol.*, 1996, vol. 49(4), pp. 317–34
- [52] Z. Halata, M. Grim, K. I. Bauman, “Friedrich Sigmund Merkel and his “Merkel cell”, Morphology, Development, and Physiology: Review and

- New Results,” *Anat Rec A Discov Mol Cell Evol Biol.*, 2003, vol. 271(1), pp. 225–39
- [53] I. Moll, M. Roessler, J. M. Brandner, A. C. Eispert, P. Houdek, R. Moll “Human Merkel Cells – Aspects of Cell Biology, Distribution and Functions,” *Eur J Cell Biol.*, 2005, vol. 84(2–3), pp. 259–71
- [54] K. C. Catania, “A Nose that Looks Like a Hand and Acts Like an Eye: the Unusual Mechanosensory System of the Star-nosed Mole,” *J Comp Physiol A*, 1999, vol. 185, pp. 367–372
- [55] J. N. Hoffmann, A. Montag, N. J. Dominy, “Meissner Corpuscles and Somatosensory Acuity: The Prehensile Appendages of Primates and Elephants,” *Anatomical Record*, vol. A281, pp. 1138–1147

#### Újlenyomatok

- [56] N. Cauna, “Nature and Function of the Papillary Ridges of the Digital Skin,” *Anat Rec*, 1954, vol. 119, pp. 449–468
- [57] R. D. Martin, “Primate Origins and Evolution: a Phylogenetic Reconstruction,” *Princeton: Princeton University Press*, 1990
- [58] S. J. Bolanowski, L. Pawson, “Organization of Meissner Corpuscles in the Glabrous Skin of Monkey and Cat,” *Somatosens Mot Res.*, 2003, vol. 20(3–4), pp. 223–31

#### CNN technológia

- [59] T. Roska, L. O. Chua, “The CNN Universal Machine: An analogic array computer”, *IEEE Trans. Circuits and Systems-II*, 1993, vol. 40, pp. 163–173

#### Könyvek

- [60] K. L. Johnson, “Contact Mechanics,” *Cambridge University Press*, 1985
- [61] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell “Principles of Neural Science,” *McGraw-Hill/Appleton & Lange*; 4th edition (January 5, 2000)
- [62] L. D. Landau, E. M. Lifsic: “Elméleti fizika VII. kötet (Rugalmasságtan),” *TK, Bp.* 1974
- [63] S. M. Sze, “Semiconductor Sensors,” *John Wiley & Sons, Inc.* NY, 1994