FSR segítségével kialakított nyomás érzékelő mátrix

Készítette

Solymossy Gergely

Konzulens: Dr. Prukner Péter

Tartalom

absztrakt 3
Bevezetés 3
1 Nyomás érzékeny ellenállások (FSR) 4
2 Perkoláció FSR anyagokban 4
3 Kvantum-alagút hatás FSR anyagokban 5
4 Felületi ellenállás szerepe FSR anyagok esetében 7
5 FSR szenzorok felépítése 7
6 FSR összehasonlítása nyúlásmérő bélyeggel 9
7 Saját építésű szenzor prototípus 10
7.1 1 prototípus szenzor 11
7.2 2 prototípus szenzor 11
7.3 3 prototípus szenzor 12
7.4 Tapasztalatok a 3. prototípus készítése során 15
8 Nagyméretű prototípus szenzor mátrix tervezete 18
8.1 prototípus variációk 18
8.2 Szükséges eszközök, költségkalkuláció 20
8.3 RP2040 Mikrokontroller 20
8.4 CD74HC4067 Multiplexer 20
8.5 Micropython 21
8.6 Python 21
9 További célok és fejlesztési lehetőségek 21
9.1 Mátrixos szenzor kiolvasás 22
9.2 Feldolgozás 22
10 Konklúzió 23
11 Irodalomjegyzék 23
12 Csatolmányok 24
12.1 Arduino kód 24
12.2 Python kód 27

absztrakt

A dolgozat bemutatja az FSR-ok (force sensitive resistor) működését és szerepét egy nyomásérzékelésre alkalmazott szenzor esetén. Foglalkozik érintőlegesen egy FSR nyomásmérő szenzor összeállításához szükséges alapanyagokkal. (kiemelten a Velostat™ és ahhoz hasonló szennyezett polimerekkel) Foglalkozik a bemutatott szenzortípus előnyeivel és hátrányaival, más nyomás és erőmérő szenzorokkal szemben. Ismerteti a mátrixos szenzorelrendezés nehézségeit és a nehézségek fényében felvázol, egy mátrixos szenzor-prototípust. Bemutatja egy kisebb prototípus segítségével a már elért eredményeket. Kitér a szenzormátrix gyakorlati felhasználási céljára és a további fejlesztési lehetőségekre.

Bevezetés

A modern orvoslás megszületésének és előre lépésének feltétele volt a betegekről gyűjtött adatok növelése és kiszélesítése. Az elérhető információ élet és halál között jelent különbséget, hiszen a megfelelő kezelés kiválasztása nagyban változik a körülményektől függően. Más esetekben megbúvó betegségek, elváltozások kerülik ki a figyelmet, amelyek korábbi stádiumukban megelőzhetőek lettek volna. Gyakran napok vagy hetek döntenek arról, hogy időben születik-e diagnózis és indul meg a kezelés. A diagnózis megalkotása mellett elhúzódó folyamatok lefolyásának vizsgálata vagy felügyelete is nagyban támaszkodik az összegyűjtött adatokra. Az aktuálisan begyűjtött és múltbéli adatok összehasonlításával a lassú tendenciák is kimutathatók. A kapott adatok nem csak az egyéni páciens esetében értékesek, hanem más hasonló betegek, betegségek esetében is. Kvantifikálhatóságuk miatt az adatok egységesítik globális szinten is az orvoslást. Az információk begyűjtésében nem csak a manuális vizsgálatok vagy tesztek segítik az orvosokat, hanem szenzorok is.

A gyógypedagógiai gyakorlatok során gyakori probléma a stroke-os betegek számára a járás. Szabálytalanul, csoszogó jelleggel haladnak előre, gyakran önkénytelenül görnyesztve lábfejüket. Ez lábaikban és vázszerkezeti izmaikban nem szokványos terhelést okoz, ezzel terhelve testük többi pontját is. Ezen tünetek nem minden esetben jelentkeznek látványosan. Elég egy rossz súlypont elhelyezés és csökkenhet a rehabilitációs torna hatékonysága. Ezt a szabálytalan terhelést érzékelni lehet a talp alatt elhelyezett nyomásérzékelő szenzorok segítségével. Több nyomásszenzor mátrixos elrendezésével átfogóbb képet kaphatunk a páciens súlyelosztásáról statikus és járás közbeni állapotában is. Célom egy ilyen alkalmazásra

használható szenzoros megoldás fejlesztése, megvalósítása és tesztelése. A cél elérséhez viszont az alap építő elemek megismerésével kell kezdeni a fejlesztést.

1 Nyomás érzékeny ellenállások (FSR)

Ahogy arra nevük is utal a nyomás érzékeny ellenállások, olyan szigetelő-félvezető anyagok, melyek elektromos ellenállása megváltozik a rájuk ható nyomás függvényében. Felhasználásuk széleskörű:

- Ipari szenzorok: Iparban gyakran van szükség nyomásérzékelő szenzorokra, ezeket megoldhatják kapacitívérzékelők, nyúlásmérő bélyegek és FSR szenzorok is.
- Medikus, főleg diagnosztikai eszközök esetén terjedt el az FSR szenzorok használata. Ez egyszerű felépítésének köszönhető, szinte megkötés nélkül alkalmazható bármilyen felületen, illetve ruházatba is szőhető.
- Hobbi projektek esetében is kedvelt megoldás, egyedi darabok készítéséhez könnyen beszerezhetők az alapanyagok, és előállítása nem igényel költséges megmunkálási módszereket, mint CNC forgácsolás vagy áramkör marás.
- Elektronikai eszközök szállítmányozása és tárolása esetén is alkalmaznak FRS anyagokat, bár itt nem a nyomásérzékeny tulajdonságukat használják ki. Antisztatikus csomagolóanyagként kerül árusításra. A statikus töltésekből eredő nagy potenciál különbségeket nagy ellenállása révén biztonságosan képes egyenpotenciálra zárni.

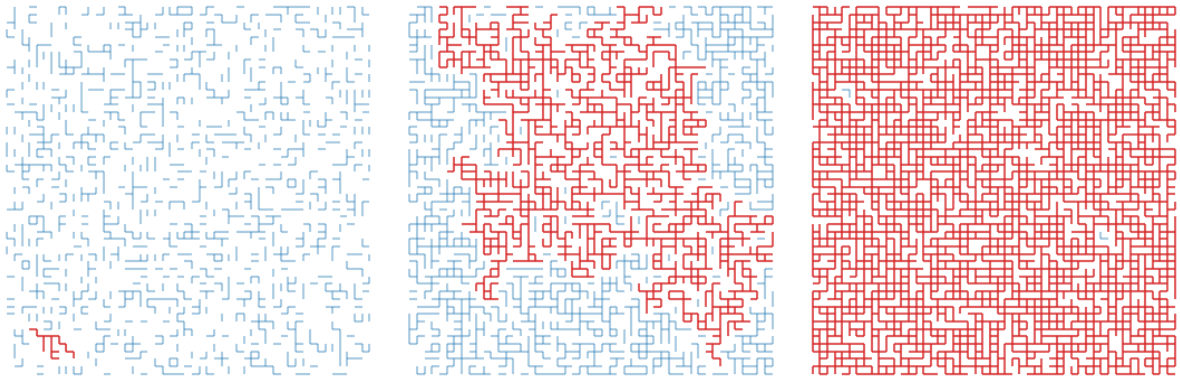
Készítésük során általában polimer alapú mátrixokat (hordozó anyag, a szerkezetet adja és önmagában nem vezető tulajdonságú) szennyeznek legtöbbször szén alapú vezető részecskékkel. Az FSR anyagok többségében 2 jelenséghatása figyelhető meg, melyek nyomástól függően, eltérő arányban érvényesülnek. Ez a két jelenség a perkoláció és a kvantum-alagút hatás.

2 Perkoláció FSR anyagokban

(Hyun-Jung Choi, 2019)

A perkoláció jelensége (mérnöki kontextusban) leírja folyadékok átszivárgását porózus anyagokon. FSR anyagok esetén is használt a kifejezés, a félvezető anyag részecskéin áthaladó töltések viselkedésének jellemzésére. A perkolációs tartományban működő FSR anyagok esetében a mechanikai nyomás növelésével a félvezető anyag ellenállása lecsökken. Ez a fizikai

deformáció során egymáshoz közelebb került részecskék következménye. Fontos megjegyezni, hogy a jelenség csak akkor érvényesülhet domináns módon (elnyomva a kvantum-alagút hatást), ha az anyagban az adott térfogatra jutó részecskék száma meghaladja a perkolációs küszöbértéket. A perkolációs küszöbértéket értelmezhetjük a következő módon: Vegyünk, egy csomópontokkal feltöltött kapcsolati rendszert, ahol azonos típusú csomópontok egységtávolságon belül összekapcsolódnak, de azon túl nem. Emellett, nem azonos csomópontok szintén nem képesek kapcsolatok létesítésére. Ebben az esetben, a küszöbérték azt a számot jelöli, amennyi azonos típusú csomópont esetén, (véletlenszerű eloszlással szétszórva a csomópontokat a vizsgált síkban vagy térben) az összekapcsolódó azonos típusú csomópontok nem csak kisméretű, de akár a vizsgált kapcsolati rendszerrel azonos nagyságrendű, azaz azt ''átívelő'' kapcsolati hálózatokat is képesek alkotni.



1. ábra Perkolációs küszöbérték eltérő állapotai (pirossal kiemelve az azonos csomópontokat): kevés, elszigetelt csoportok (bal), nagyobb néhol kapcsolódó csoportok (közép), a vizsgált rendszerrel megegyező nagyságrendű kapcsolati hálózatok (jobb) https://ematlap.hu/tudomany-tortenet-2020-11/957-mi-is-az-a-perkolacio

3 Kvantum-alagút hatás FSR anyagokban

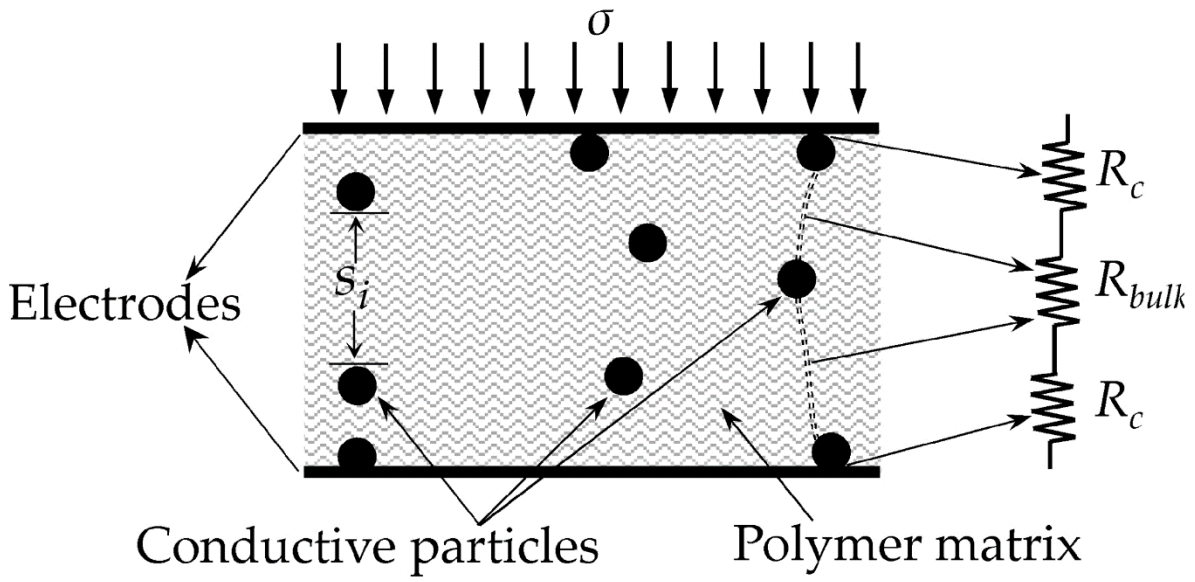
(Paredes-Madrid L., 2017)

A fizikában a kavntum-alagút hatás, egy olyan kvantummechanikai jelenség, amely során egy objektum, például egy elektron vagy atom, áthalad egy potenciális energiahatáron, úgy, hogy a klasszikus mechanika szerint nem rendelkezik elegendő energiával ahhoz, hogy bele lépjen, vagy leküzdje azt.

Az alagút hatás az anyag hullám jellegének következménye, ahol a kvantumhullám-függvény leírja egy részecske vagy más fizikai rendszer állapotát, és a hullám egyenletek (pl.:Schrödinger-egyenletek) írják le a viselkedésüket. A hullámcsoport egy adott szigetelőn való átjutásának valószínűsége exponenciálisan csökken a gát magasságával, a gát

szélességével és az áthaladó részecske tömegével összefüggően. Éppen ezért leginkább alacsony tömegű részecskék, például elektronok vagy protonok esetében látjuk, amik mikroszkopikus szélességű szigetelőkön jutnak keresztül. A jelenség észlelhető elektronok esetében már körülbelül 1-3 nm akadály vastagságnál, nehezebb részecskék, például protonok vagy hidrogénatomok esetében körülbelül 0,1 nm vagy kisebb akadály vastagságnál. Néhány forrás a hullámfüggvény szigetelőbe való behatolását is kvantum-alagút jelenségnek kategorizálja, annak ellenére, hogy a hullámfüggvény nem halad át az akadályon. Az alagút hatás számos ma használatos eszköz esetén megfigyelhető. Ilyenek főleg a mikroelektronikai eszközök (pl.: flash memória) de tudományos eszközök alapjaként is szolgál (pl.: Scanning Tunneling Microscope) A jelenség tulajdonságai miatt korlátként lép fel az elektronikai eszközök további kicsinyítése ellen, hiszen a miniatürizált szigetelők nem jelentenek akadályt az azokat működtető elektronoknak.

Az FSR anyagokban is jelentős szerepe van a kvantum-alagút hatásnak. Ez a leggyakoribb domináns működési mód kompozit jellegű anyagok esetében. A legtöbb kereskedelemben is kapható FSR (pl.: FlexiForce, Interlink) ezen az elven működik. Növekvő mechanikai nyomás hatására az anyag ellenállása csökken. Ez annak köszönhető, hogy az anyag szigetelő mátrixában találhatók szennyező részecskék, álltalában valamilyen szén módosulat. (pl.: carbon black, CNT) Nyugalmi állapotban felvehető $\boldsymbol{S}$ akadály szélesség, mely a beágyazódott vezető részecskék között lép fel a szigetelőként funkcionáló polimer mátrix miatt. A mechanikai nyomás hatására $\boldsymbol{S}$ távolság lecsökken ezzel megnövelve a kvantum-alagút jelenség bekövetkezését vezető részecskék között. A sorozatos akadály áthatolások következtében vezető utak alakulnak ki, melyeken keresztül megnő az átáramló elektronok mennyisége.



2. ábra Kvantum-alagút hatás FSR anyagban, ahol S_i az akadály vastagság, R_c a felületi kontakt ellenállás, R_{bulk} a kvantum-alagút hatásból eredő ellenállás és σ a mechanikai nyomás

4 Felületi ellenállás szerepe FSR anyagok esetében

(Wang L., 2009)

A kvantum-alagút hatás és a perkolációs jelenségek mellett újabb kutatások a felületi ellenállás jelenségének segítségével is foglalkozni kezdtek FSR polimer anyagok esetében. A mechanikai nyomás következtében plasztikus deformáció megy végbe a polimer és az elektródák találkozásánál. Emiatt a polimer egyenetlen felülete rásimul az elektróda felületére, ezzel növelve a kontakt területet. Ennek következtében csökken az ellenállás mértéke a 2 elektróda között.

5 FSR szenzorok felépítése

Az FSR anyagok segítségével létrehozott szenzorokra szokás hivatkozni FSR szenzorként is. Bár ez inkább gyűjtő fogalom, mivel más szenzorok más típusú FSR anyagokat használnak, és variációk lépnek fel a szenzor kialakításához felhasznált elektródák típusában is.

FSR alapanyag típusa:

> FSR alapanyagukat nézve 3 fő csoport különböztethető meg. A carbon black vezető részecskét tartalmazó, a CNT-t (karbon nano cső) tartalmazó és az ezeket keverve tartalmazó alapanyag.

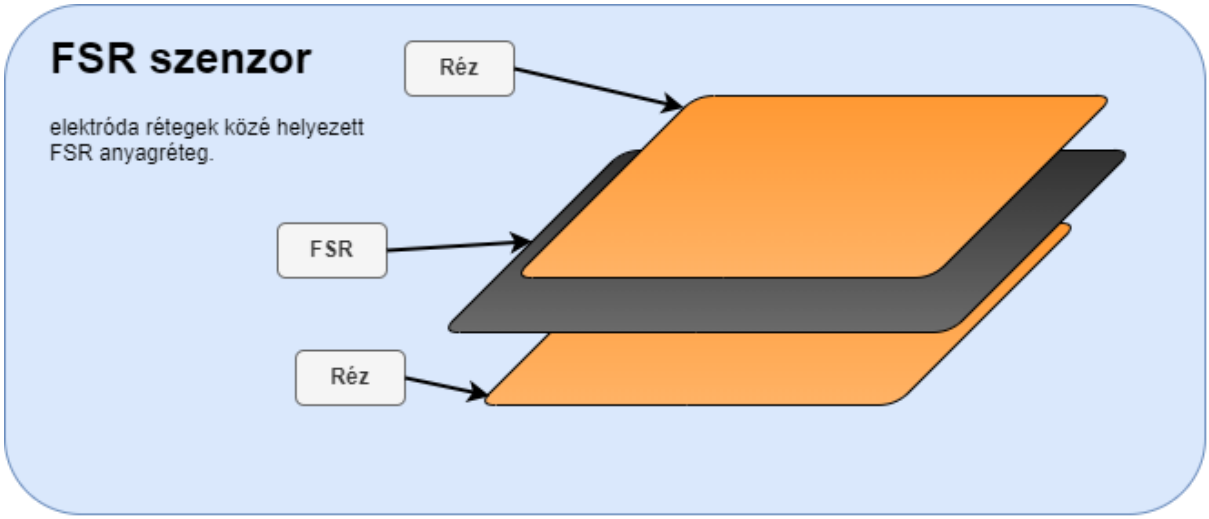
Elektródák anyaga:

Anyagukat tekintve szinte bármilyen konduktív anyag szóba jöhet, a réz és alumínium a leggyakoribb, könnyen előállítható vékonyrétegű kiszereléseik miatt, réz esetében a forraszthatóság is szerepet játszik.

Elektródák hajlékonysága:

Az elektródák esetében változhat az alapanyag és a rétegek hajlékonysága is. Létezik flexibilis PCB-ből, üvegszállal erősített PCB-ből és ezek együttes használata is.

Általános értelemben viszont igaz a szenzorokra, hogy réteges felépítésűek. 2 elektróda közé FSR anyag kerül elhelyezésre. Az elektródákra helyezett mechanikai nyomás összeszorítja azokon keresztül a polimert és annak ellenállása megváltozik. A szenzor így képes érzékelni a rétegek síkjára merőleges hatásvonalú erőket. (Sok esetben viszont nem közvetlen mérésre alkalmazzák, pl.: hajlancsok hajlításának érzékelésénél) Emiatt a réteges felépülés miatt a szenzor könnyen illeszthető egyedi felületek és alkalmazási lehetőségekhez.



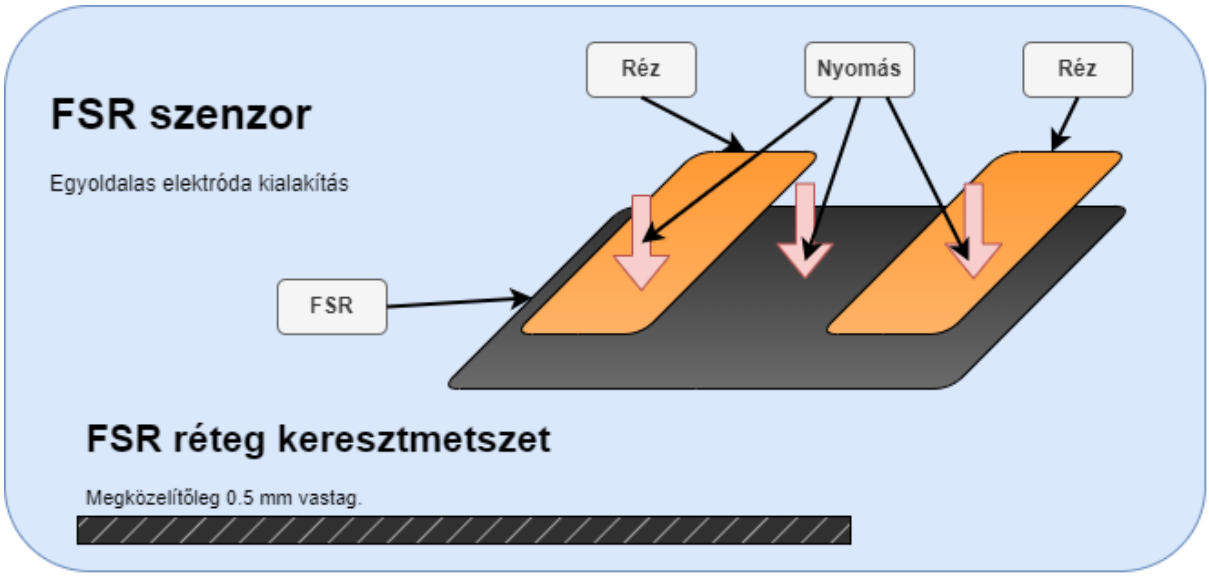
3. ábra FSR alapanyagú nyomásérzékelő szenzor struktúrája

Az összeállítás során a legfontosabb dolog, hogy a 2 elektróda ne érjen egymáshoz közvetlenül. Ezt többféle módon is lehet biztosítani:

- Az FSR réteg túlméretezése az elektródákhoz képest.
- Az elektródák egyoldalra helyezésével.
- Távtartó elemek közbeiktatásával.

A 3 megoldás közül az elektródák egyoldalra helyezése nem mindig célra vezető, ugyanis az FSR fólia megközelítőleg 0.5 mm-es keresztmetszeti szakaszán fog zárulni az áramkör. Ezek

mellett a szenzor aktiválásához mindkét elektródát és a közöttük lévő FSR polimert is nyomás alá kell helyezni.



4. ábra Egyoldali elektródás elrendezésű FSR szenzor.

Az FSR szenzorok rendelkeznek egy ''örökletes'' hibával, melyet a működésüket biztosító polimer anyagnak köszönhetnek. A polimer creep jelenség maradandó alakváltozást okoz a legtöbb polimer anyag esetében. Ekkor a polimer mátrix maradandó deformációt szenved és következésképpen csökken a szenzor érzékenysége is. Jelenleg is folynak kutatások ennek kiküszöbölésére, visszafordítására, vagy predikciójára. (Paredes-Madrid L., 2017)

Emiatt a hiba miatt az előfeszítést igénylő alkalmazások esetén nem célszerű választás, a nyúlásmérő bélyegekkel megoldott nyomásmérés gyakran eredményesebb lehet.

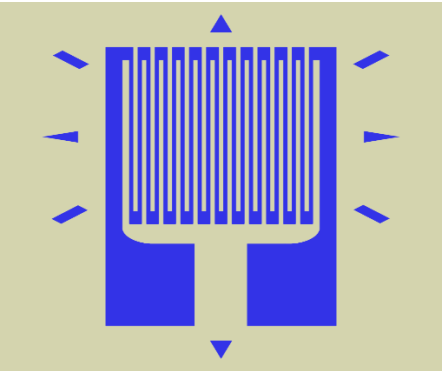
6 FSR összehasonlítása nyúlásmérő bélyeggel

A nyúlásmérő bélyegek nem alkalmasak közvetlen mechanikai nyomás mérésére. Szükséges egy próbatest, amelyre ható erők alakváltozáshoz vezetnek a szenzornak megfelelő irányba és az megnyúlás formájában képes mérni azokat közvetetten. Ehhez ismerni kell a próbatestgeometriai adottságait és anyagának tulajdonságait. Működésük fémes anyagok rugalmas tartományban végbement deformációján alapul. A bélyeg hajtogatott fémhuzalból / vezetőből, és ragasztó rétegből épül fel. A vékony vezető a ragasztó réteg miatt a mért felülettel együtt nyúlik. A szálak hosszanti irányában történő megnyúlás okozza a legjelentősebb ellenállás változást, a szakaszok mentén a fémes anyag keresztmetszete összeszűkül, ezáltal megemelve a teljes vezető ellenállását. Ez a bélyeg szálirányára merőlegesen csak marginálisan érvényes.

Többféle elrendezés is létezik a szálirány elhelyezésére és a vezetők számára vonatkozóan, ilyen variánsokra példa:

- szimpla nyúlásmérő bélyeg.

  A szárakkal megegyező irányban a leg érzékenyebb.



5. ábra Egyirányú szimpla nyúlásmérő bélyeg (AnonMoos, 2012)

- Hőmérséklet kompenzált nyúlásmérő bélyeg

  Kisebb mértékeb befolyásolja a környezeti hőmérséklet a kapott eredményt.

- Rozetta elrendezésű nyúlásmérő bélyeg

  Alkalmas ismeretlen fő nyúlásirányok mellett is megadni a fő nyúlások irányát és nagyságát.

Tulajdonság	**FSR**	**Nyúlásmérő bélyeg**
Előállítás bonyolultsága	szennyezett polimer gyártása	miniatűr fémes alkatrészek gyártása
Összeszerelés	rétegek egymásra helyezése	rétegek egymásra helyezése
Felhelyezés	ragasztás	ragasztás
Hőmérséklet függés	polimer mechanikai tulajdonsága változik	mért test hőtágulása, fém vezető hőtágulása
Mért erő	közvetlen hat	közvetetten hat
Élettartam	rövidebb	hosszabb
Költség (magyarországi oldalak alapján)	magasabb	alacsonyabb

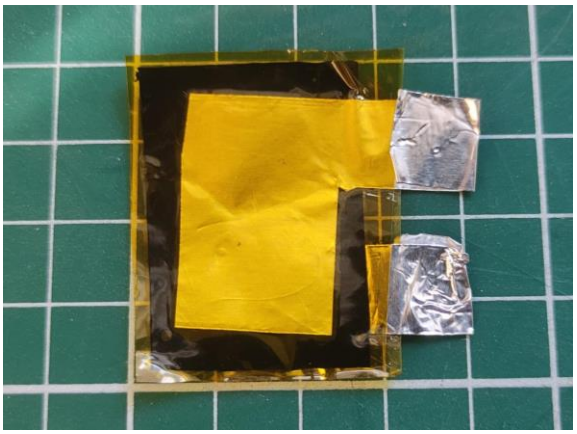
FSR szenzor és nyúlásmérő bélyeg összehasonlítása

7 Saját építésű szenzor prototípus

Az elméleti alapok elsajátítása után szükségessé vált a gyakorlatban is kipróbálni azokat. Megkezdődött a számomra a készítés idején elérhető eszközök kiválasztásával egy működő, réteges FSR prototípus szenzor építése. Rendelkezésre állt többféle réz, illetve alumínium

ragasztószalag rádiófrekvenciás árnyékolás céljával, illetve kis mennyiségű Velostat™ anyag egy Jetson Nano számítógép csomagolása miatt.

7.1 1 prototípus szenzor

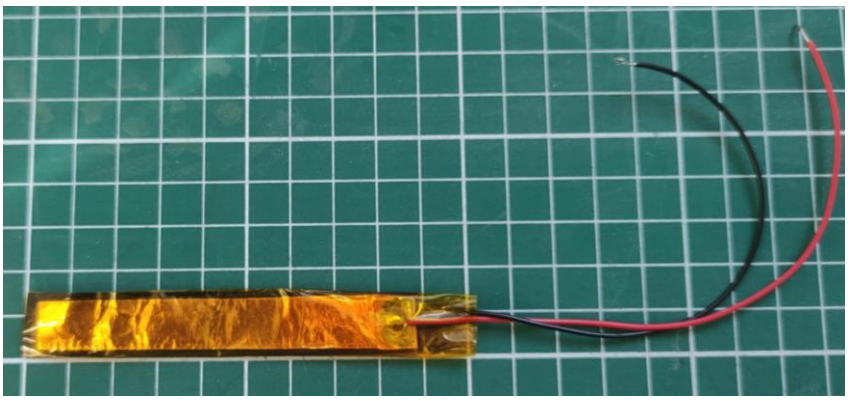


6. ábra Velostat™ alapú FSR szenzor prototípus, alumínium elektródákkal szerelve

Alumínium szalag segítségével került elkészítésre. Az elektródák 'L' alakúra lettek vágva és a Velostat™ réteg jelentős túllógással, közéjük helyezve. A rétegek rögzítésére poliamid ragasztószalag lett alkalmazva. A konstrukció során szerzett tapasztalatok megerősítették, hogy az antisztatikus csomagoló anyag valóban Velostat™. További tapasztalat volt, hogy bár az alumínium fólia nagyobb eszközök elkészítésénél költséghatékonyabb, a rendelkezésre álló szerszámparkot figyelembe véve nehézkes az elektródák vezetékekhez csatlakoztatása.

7.2 2 prototípus szenzor

A második prototípus elkészítéséhe ragasztható réz fólia került felhasználásra és a szenzor geometriájában is módosítás lett eszközölve. A tömzsi, közel érme méretű kialakítás helyett hosszúkás egyenes alakzatra lett módosítva.

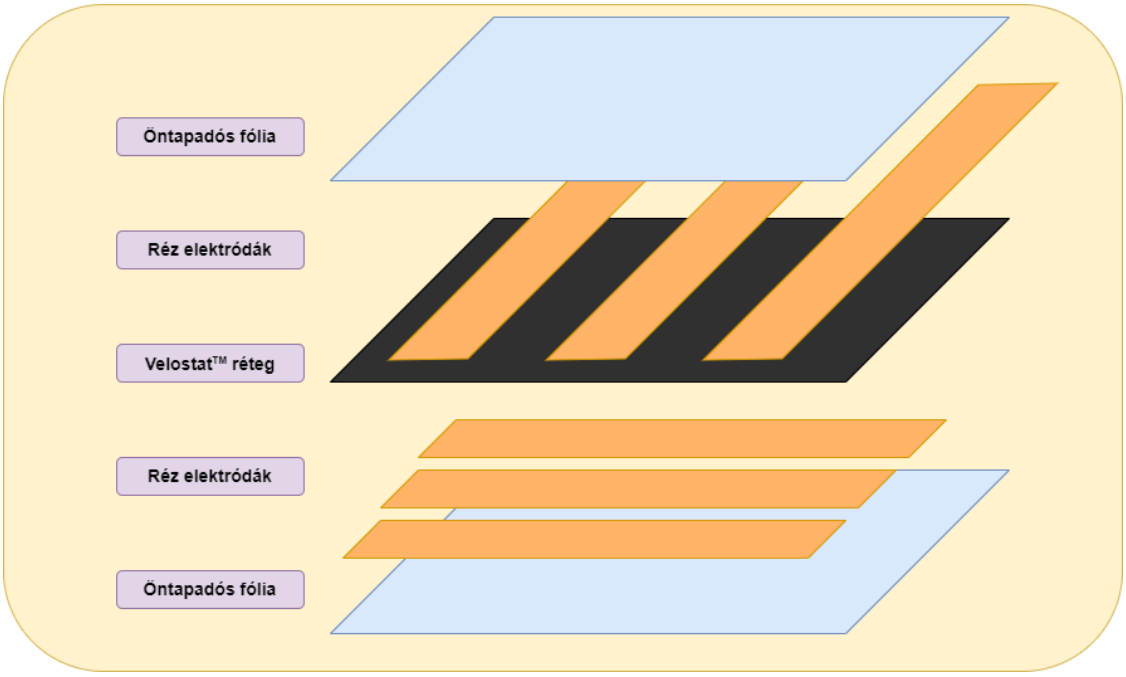


7. ábra Hosszúkás FSR szenzor prototípus, réz elektródákkal szerelve

A réz elektródáknak köszonhetően a szenzor vezetékhez forrasztása megoldhatóvá vált. A forrasztás során ügyelni kellett a hőfokra a Velostat™ védelme miatt és a forrasztás elhelyezkedésére is. A forrasztás nem kerülhetett a Velostat™ réteg fölé, mert egyenetlen lett volna a szenzor felülete, és egy pontra koncentrálódott volna a rá helyezett teher nyomása.

7.3 3 prototípus szenzor

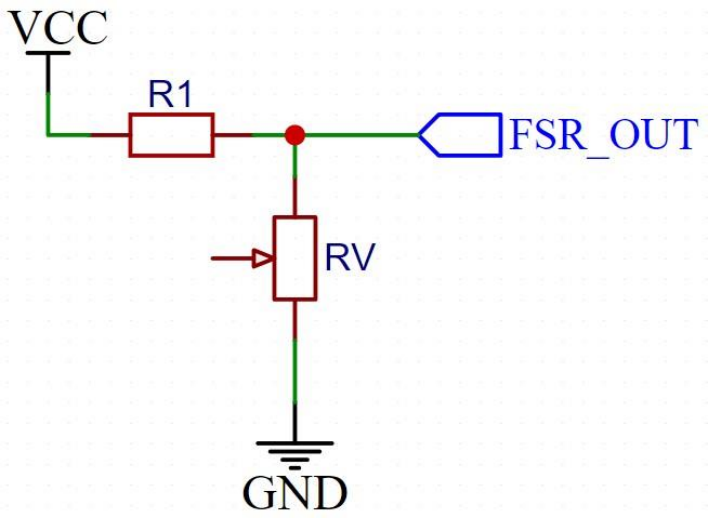
A projekt célja egy nyomásérzékelő mátrix kialakítása, ezért a 3. prototípus szenzor már nem önálló szenzoregység volt, hanem egy 3x3 elrendezésben kialakított szenzor mátrix. Az önálló szenzorokkal ellentétben már célszerűvé vált egy, a kiolvasást és a szenzorok multiplexelését megvalósító mikrokontroller használata. A választott eszköz egy Arduino Mega lett elérhetősége miatt. A szenzor összeállítása sokban megegyezett az előző prototípusok összeállításával. Ugyan úgy rétegelt kialakítás jellemezte, viszont az elektródák sorok és oszlopok-ként fogják közre a Velostat™ réteget.



8. ábra Mátrixos FSR szenzor prototípus, réz elektródákkal szerelve 3x3-as felbontással

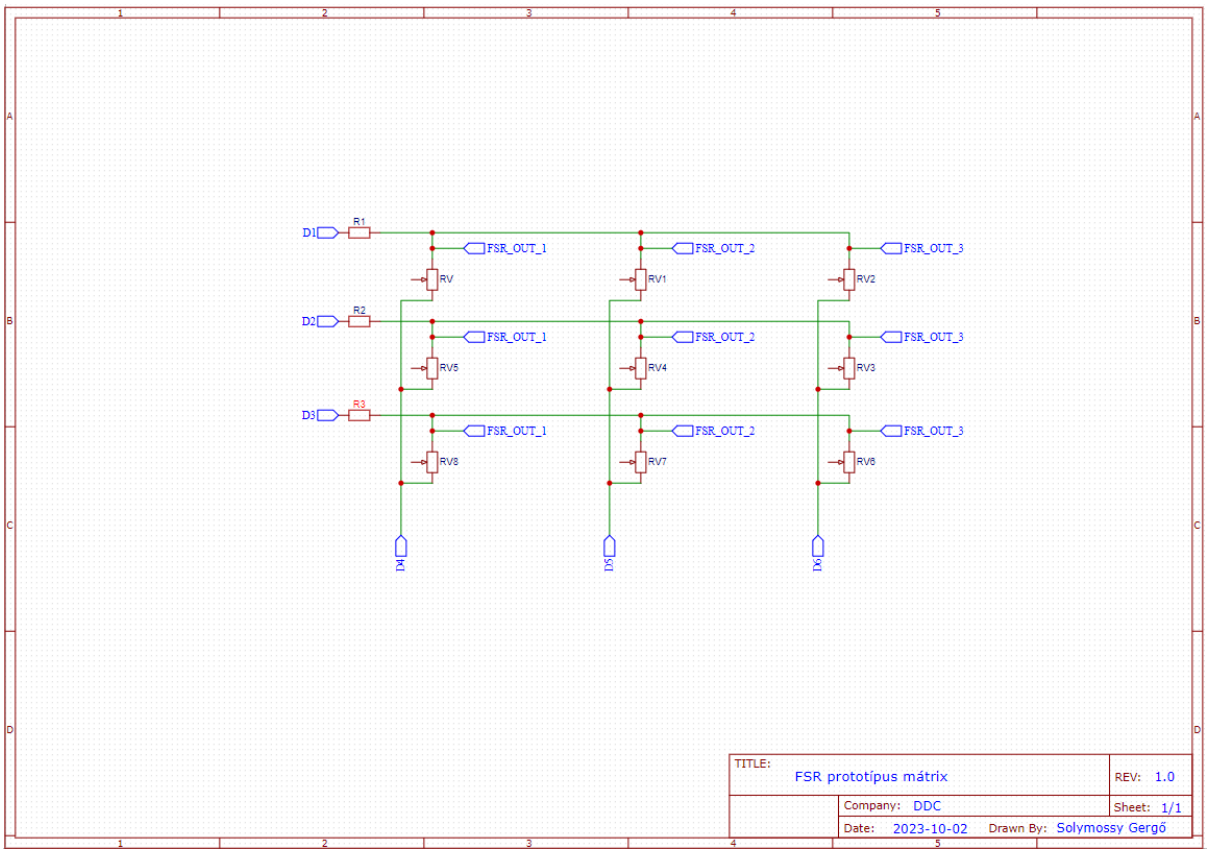
Az öntapadós fólia szerepét ebben az esetben is poliamid ragasztószalag töltötte be. A hosszanti és kereszt elektródák vetületüket nézve négyzetes FSR szenzorokat hoznak létre, a középső Velostat™ réteget közrefogva. Az így létre jött szenzorok elhelyezkedését megadhatjuk az őket alkotó sor és oszlop elektródák számával, mintegy kétdimenziós mátrixban az elemek helyzetét.

A mikrokontrolleres kiolvasás megvalósításához szükség van a mátrix sorainak és oszlopainak multiplexelésére, illetve előtét ellenállásokra, hogy a szenzorokkal feszültségosztóként működve kiolvasható legyen a fellépő ellenállásváltozás.



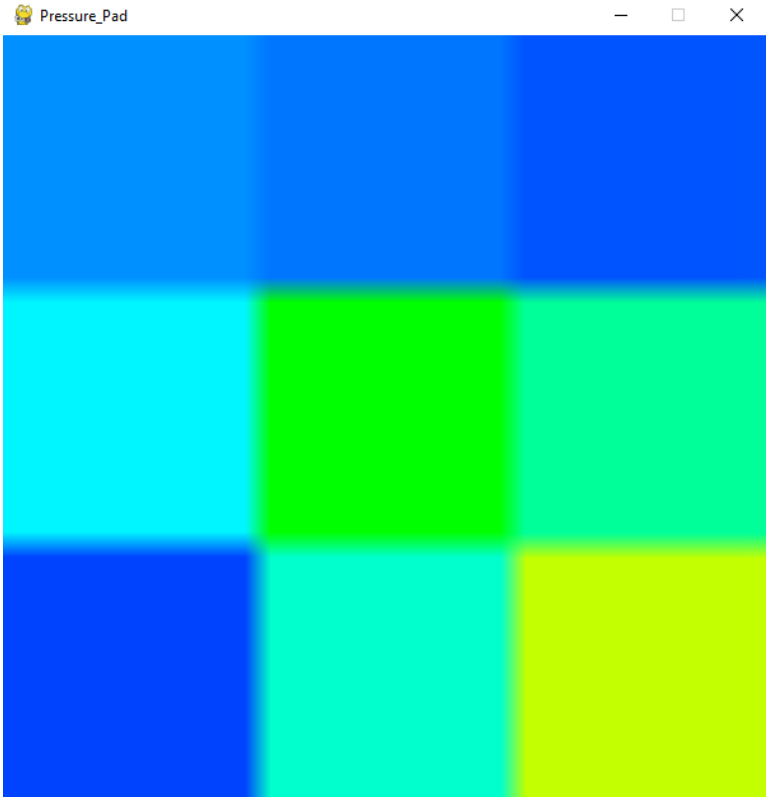
9. ábra 1 FSR szenzor feszültségosztós kapcsolása

Kísérleti úton R1 értéke 1MΩ-nak lett választva. (A velostat MΩ-os nagyságrendű ellenállásértékeket mutatott kis és közepes nyomás hatására)



10. ábra Mátrixos FSR szenzor prototípus, kapcsolási ábra

A kapcsolási ábrának megfelelő program került megírásra az Arduino IDE használatával. A mikrokontroller D1-D3 lábak a sorokat kötik össze, a D4-D6 lábak az oszlopokat. Az FSR_OUT_1-FSR_OUT_3 kivezetések pedig rendre az A0-A2 analóg lábakra lettek kötve. Az első szenzorpont kiolvasásához a program logikai magasra emeli (5V) a D1-es lábat, ezzel egyidőben logikai alacsonyra (GND) húzza a D4 lábat és magas impedancia állapotban tartja a maradék lábakat. (D2, D3, D5, D6 -> R ~ ∞) Ekkor megtörténik az A0 lábon az analóg jel beolvasása az eszköz fedélzeti 10 Bit-es ADC-je (analóg digitális átalakító) segítségével. Az értéket eltárolja egy listában és iterálja a digitális lábak szerepét. A mikrokontroller a kiolvasás mellett a 9 értéket soros port-on tovább küldi egy számítógépnek, ahol python programnyelven vizuálisan is megjelenítésre kerülnek az adatok.



11. ábra Python segítségével megjelenített nyomásminta 3x3 szenzor által felvett (a szenzor jobb alsó szegmensére rátenyerelve)

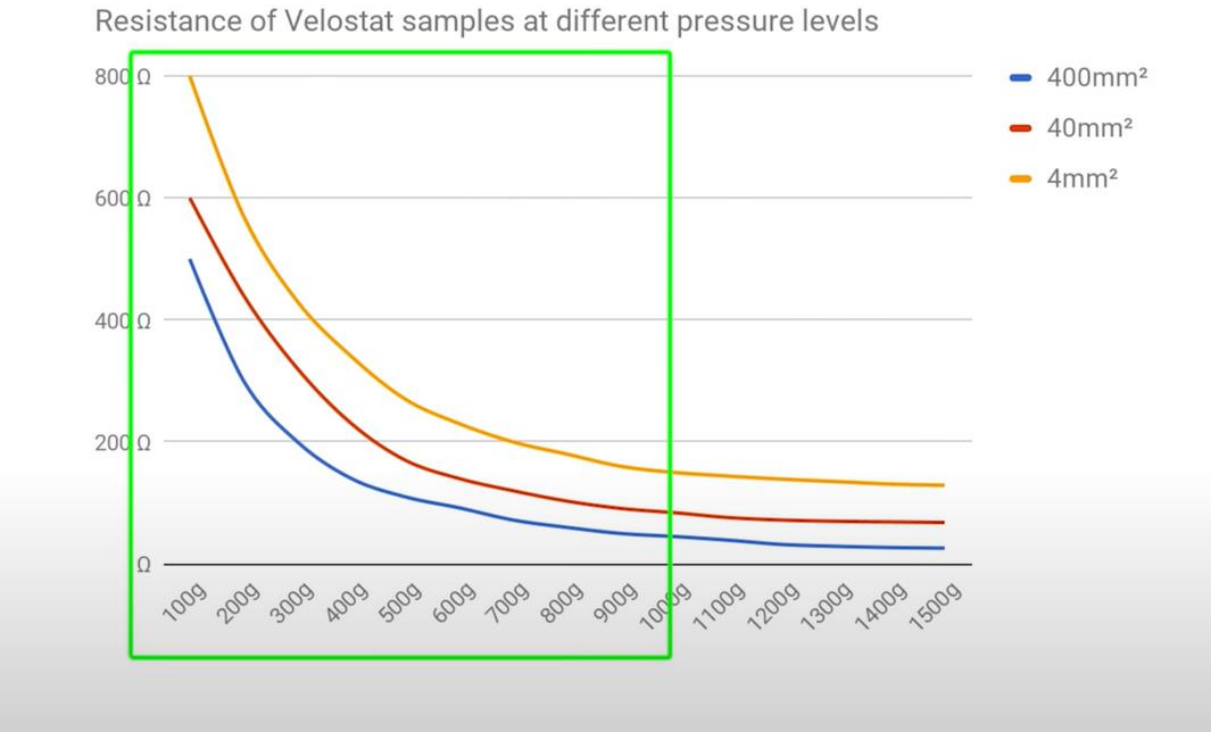
A megjelenítés l lényegi részét a PyGame könyvtár segítségével lehetett megvalósítani. Ebben az esetben valós időben volt képes reagálni a megjelenítő a szenzor értékek megváltozására.

7.4 Tapasztalatok a 3. prototípus készítése során

Több fontos tapasztalatot is következett a mátrix prototípus szenzor elkészítése és tesztelése során.

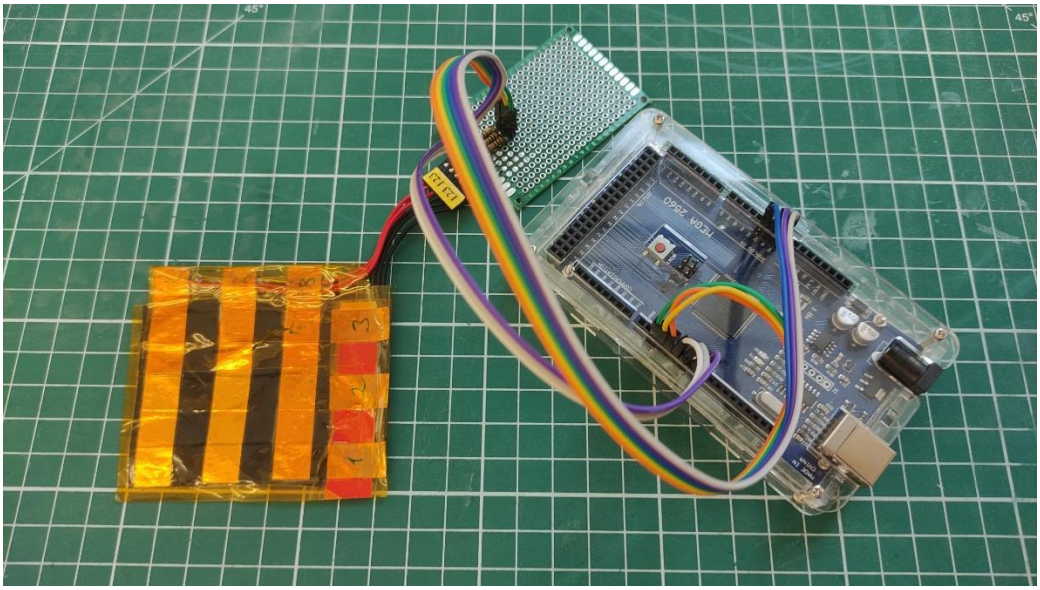
- Előnyösebb 1 ellenállást alkalmazni 1 analóg lábbal, így kizárható az ellenállások gyártásából bekövetkező eltérések.
- A mikrokontroller órajele miatt nem lesz alkalmas nagyobb méretű szenzorok meghajtására, így azt cserélni kell. Ideális esetben Raspberry PI PICO-ra a magas órajel, 2 magos kialakítás, beépített állapotgépek miatt.
- A számítógépen futó Python programban használatra került az OpenCV könyvtár is kép létrehozása, a nyomásértékek színkódolása és a kapott kép elmosása miatt. Eredetileg a kép megjelenítése is OpenCV könyvtárral történt, de a vártnál lassabb volt a megjelenítésért felelős függvény ezért szükséges volt a váltás PyGame-könyvtárra A jövőben érdemes a teljes OpenCV könyvtárat kivezetni a kódból a nagyobb mátrixok esetén fellépő adat többlet miatt.

- A tapasztalatok és a megírt Arduino kód alapján egyértelmű lett, hogy nagy hangsúlyt kell fektetni a kezdetektől a program mátrixpont iterálásnál végzett teljesítményére és hatékonyságára. A mátrixok méretének megadás paraméteres kell, hogy legyen.
- A poliamid ragasztószalag nem elég széles, vagy szélesebb kiszerelés szükséges, vagy nagyobb méretű öntapadós fóliát kell alkalmazni.
- A rézfólia szalag vékonyabb kell, hogy legyen. A jelen prototípusokban a fólia kézzel került levágásra. Ez pontatlanságokhoz és hosszas munkaórákhoz vezetett, ami meglátszik a prototípus minőségén is.
- A felhasznált velostat nagyságrendben tért el internetes infógyűjtés alatt kapott értékektől. Ennek több oka is lehet. Egyrészről használt Velostat™ anyag került felhasználásra így lehetséges, hogy a polimer creep jelenség miatt már jelentősen módosult az alap ellenállása és anyagszerkezete. Másrészről nem kizárt, hogy az antisztatikus csomaglásokban alkalmazott Velostat™ eltérő összetételű a hobbi célra is vásárolható 28x28 cm-es fóliadarabos kiszerelés anyagától és szerkezetétől. Ez a kérdés tisztázásra kerül a fólia darabok megérkezésekor és a helyes karakterisztika, illetve ellenállás értékkel folytatódhat a megvalósítás. A várható ellenállás nagyságrendileg 1 KΩ, ezzel szemben a mérési tapasztalatok 1MΩ-os nagyságrendet eredményeztek.



12. ábra Velostat ellenállás karakterisztika változó elektróda terület mellett (Reps, 2017)

- A mikrokontrollerek korlátozott IO port-jai miatt szükséges lesz multiplexer modulokat alkalmazni nagyobb prototípus szenzorok működtetésénél. Ideálisan 16 csatornás kialakításban.
- A mikrokontroller egy lábán maximum 20 mA-ert képes kiadni. Ezt egy nagyobb mátrix meghaladja működés közben, tehát a feszültség az aktív soron összeomlik, így használhatatlanná téve a szenzort. Megoldásként a mátrixos bekötésű billentyűzetek mintájára egyenirányító diódák alkalmazása lehetséges. Ezzel egyszerre elkerülhető a Ghosting effekt. (Cluney, 2021)
- A szenzor jelenlegi mérete nem elégséges meghatározni a bevezetésben elmondott célhoz szükséges minimum felbontást. Emiatt további nagyméretű prototípus szenzorokra van szükség lehetőleg variált felbontással.



13. ábra Mátrixos FSR szenzor prototípus, réz elektródákkal szerelve 3x3-as felbontással, fizikai megvalósítás

8 Nagyméretű prototípus szenzor mátrix tervezete

A prototípus nyomáspadló összeállításának lényege a szenzorfelbontás megismerése. A nagyobb felbontás részletesebb mintavételezési lehetőséget enged, de költségesebb és lassítja a kiolvasás sebességét is. Ezért a további prototípus eszközök eltérő, progresszívan sűrűsödő felbontással készülnek el. Így remélhetőleg könnyen meghatározható lesz a rehabilitációs gyakorlatok során mi az a minimum felbontás, amely mellett még hasznos információ nyerhető ki a szenzormátrix-al készített képekből.

8.1 prototípus variációk

A szükséges paraméterek megismeréséhez 4 eltérő felbontással rendelkező szenzormátrix elkészítése lett tervezve:

Megnevezés	**Méret**	**Mértékegység**
Velostat™	28x28	cm
Modul oldalhossz	28	cm
vezető szalag szélesség	1	cm
Sorok száma	14	db
sorkihagyás mérete	1	cm
Elektródák száma összesen	28	db

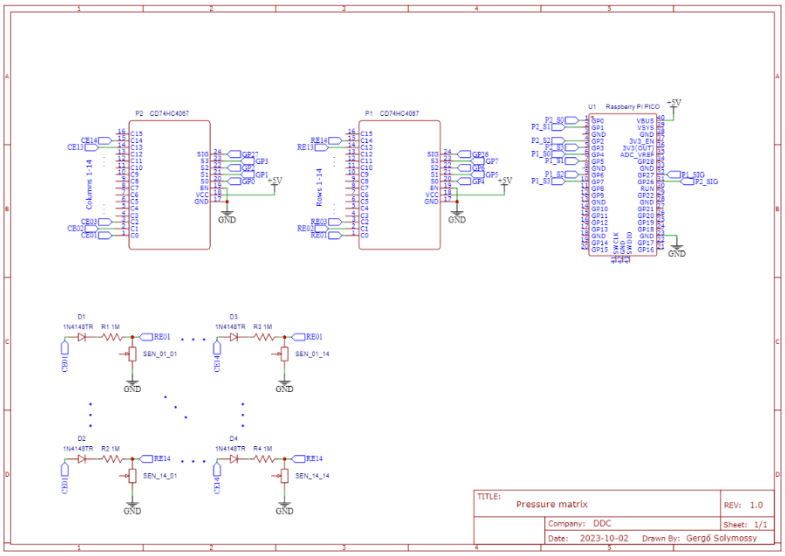
Megnevezés	**Méret**	**Mértékegység**
Velostat™	28x28	cm
Modul oldalhossz	28	cm
vezető szalag szélesség	1	cm

Sorok száma	11	db
sorkihagyás mérete	1.5	cm
Elektródák száma összesen	22	db

Megnevezés	**Méret**	**Mértékegység**
Velostat™	28x28	cm
Modul oldalhossz	28	cm
vezető szalag szélesség	1	cm
Sorok száma	9	db
sorkihagyás mérete	2	cm
Elektródák száma összesen	18	db

Megnevezés	**Méret**	**Mértékegység**
Velostat™	28x28	cm
Modul oldalhossz	28	cm
vezető szalag szélesség	1	cm
Sorok száma	8	db
sorkihagyás mérete	2.5	cm
Elektródák száma összesen	16	db

A szenzorokhoz készítve lett egy, a fent tárgyalt tapasztalatok alapján módosított kapcsolási ábra is.



14. ábra Módosított kapcsolási ábra mátrixos FSR szenzorok készítéséhez és bekötéséhez

8.2 Szükséges eszközök, költségkalkuláció

Költségkalkulációk készültek a megvalósíthatósággal és az esetlegesen fennmaradó kérdések megválaszolásának lehetőségét szemelőt tartva. (A költségtervezet tartalmazza a projekt során már korábban megvásárolt és használatba vett tételeket is, pl.: Arduino Mega mikrokontroller)

#	Név	Megjegyzés	Darab	Egység ár	Összes
1	Velostat	28x28 cm	4	3 400 Ft	13 600 Ft
2	Öntapadós fólia	45 cm x folyó m	2	950 Ft	1 900 Ft
4	rézszalag	10 mm	3	1 700 Ft	5 100 Ft
5	Ellenállás készlet	600 db-os csomag	2	2 500 Ft	5 000 Ft
6	Egyenirányító dióda	1N4148TR	400	7 Ft	2 800 Ft
7	Szalagkábel	40 pin	6	900 Ft	5 400 Ft
8	Csatlakozó szalagkábelhez anya	40 pin	8	300 Ft	2 400 Ft
9	Csatlakozó szalagkábelhez apa	40 pin	8	180 Ft	1 440 Ft
10	Csatlakozó szalagkábelhez nyákra	40 pin	2	150 Ft	300 Ft
11	Arduino mega mikrokontroller	ATmega2560	1	8 000 Ft	8 000 Ft
12	Raspberry PI PICO W mikrokontroller	RP2040	1	3 000 Ft	3 000 Ft
13	Multiplexer chip 16 csatornás	CD74HC4067	6	500 Ft	3 000 Ft
14	forraszthető próbanyák	6x8 cm	16	240 Ft	3 840 Ft
16	ADC modul	ADS1015	2	2 300 Ft	4 600 Ft

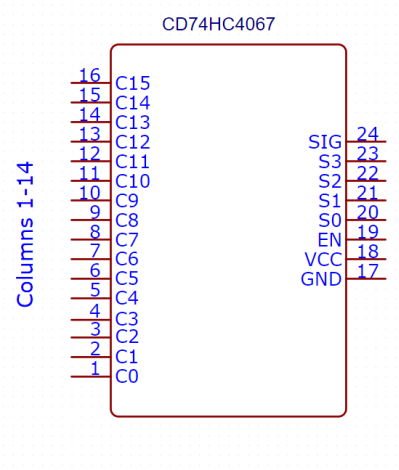
Teljes összeg: 64 540 Ft

8.3 RP2040 Mikrokontroller

Elsődlegesen Raspberry PI PICO mikrokontrollerrel történik a szenzor mátrix kiolvasásának a megoldása. Ennek oka, hogy az RP2040-es chip 2 processzormaggal rendelkezik, lehetőséget adva a párhuzamos feladatvégrehajtásra. Emellett programozható állapotgépeket is tartalmaz, ami nagy sebességgel képes végrehajtani kisebb, rövidebb feladatokat (pl.: multiplexer címek kiosztása) A mikrokontroller órajele jelentősen meghaladja az Arduino Mega órajelét, ezzel is gyorsítva az ugyan rövid ideig futó, repetitív lépések egymás utáni elvégzését. Arduino Mega 16 MHz, Raspberry Pi PICO 125 MHz.

8.4 CD74HC4067 Multiplexer

A szenzorok elrendezése mátrix kialakítású. Ez nagyban lecsökkenti a szükséges mikrokontroller- bemenetek számát. (pl.: 1024 helyett 32 sor-oszlop) A legtöbb mikrokontroller nem rendelkezik elégséges GPIO port-al a nagyobb sor-oszlop számú mátrixok kiolvasásához. Emiatt CD74HC4067 számú 16 csatornás multiplexer chip-eket érdemes használni.



15. ábra CD74HC4067 áramköri rajza

A 16 csatorna az S0 - S3 bemeneteken, binárisan címezhető. A SIG pin összeköttetésbe kerül a megcímzett csatornával.

8.5 Micropython

A PI PICO mikrokontroller támogatott nyelve. Ugyan magasabb szintű nyelv, de a kritikus pontokon lehetőség van alacsonyabb szinten történő vezérlésre is. Ilyen pont például a multiplexer modulok címzése, melyek megvalósíthatók az állapotgépekkel.

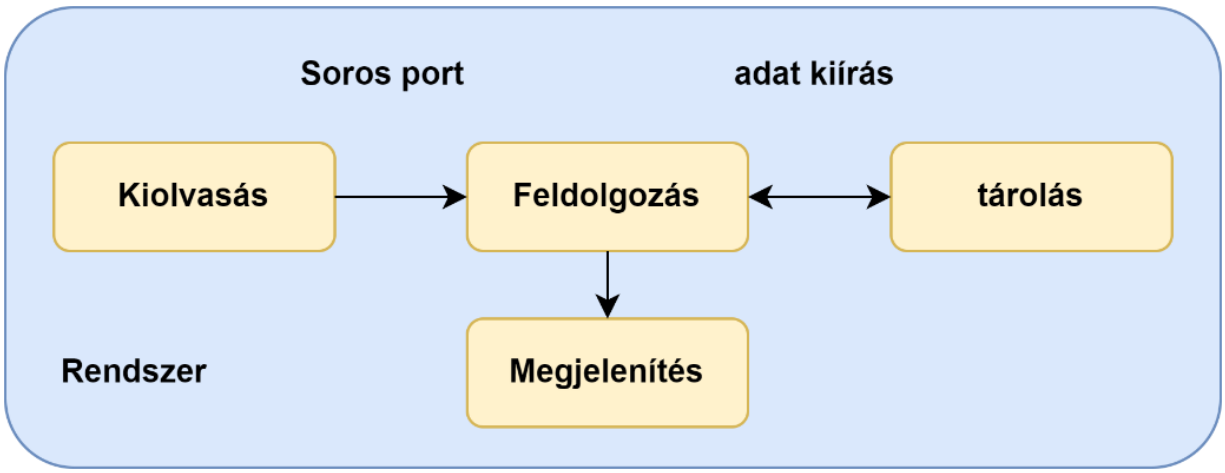
8.6 Python

Az adatok fogadását, feldolgozását és tárolását végző program a Python lesz. Programban felhasznált modulok a következő funkciókat fogják betölteni:

- Pyserial: Mikrokontrolleres adatok fogadása.
- Numpy: Mátrixos adatok kezelésére és feldolgozására.
- Pygame: Feldolgozott adatok megjelenítése valós időben OpenGL segítségével.

9 További célok és fejlesztési lehetőségek

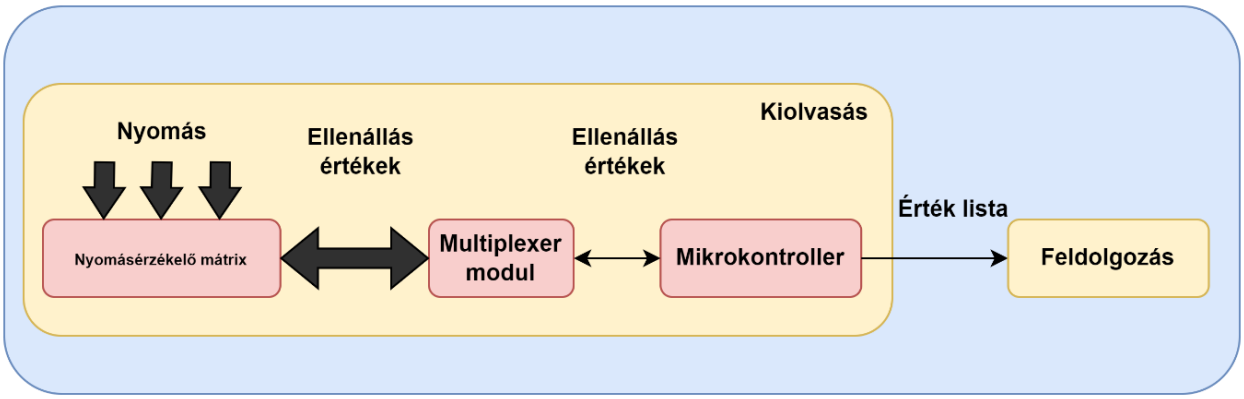
A megszerzett adatok és tapasztalatok alapján egy végleges prototípus is elkészítésre fog kerülni. software-es oldalról elkészítésre került egy kezdetleges rendszervázlat a már ismert adatok alapján. A rendszer magába foglal egy UI felületet, kiolvasást, feldolgozást, adattárolást és megjelenítést. Az orvosi felhasznál miatt szükséges az adatok valós időben történő megjelenítése és mentése is.



16. ábra Rendszer felépülésének vázlata

9.1 Mátrixos szenzor kiolvasás

A rendszerben a kritikus pontot a kiolvasás sebessége jelenti. Ez azért így van, mert a mikrokontrollerek erősen korlátoltak sebességben és számítási kapacitásban a számítógépekhez képest. Így a legfontosabb a mikrokontrolleren futó program optimalizálása és az adatok mérete, illetve a frissítési rátájuk által szükségessé vált átviteli sebesség biztosítása a kiolvasást és a feldolgozást végző modulok között.

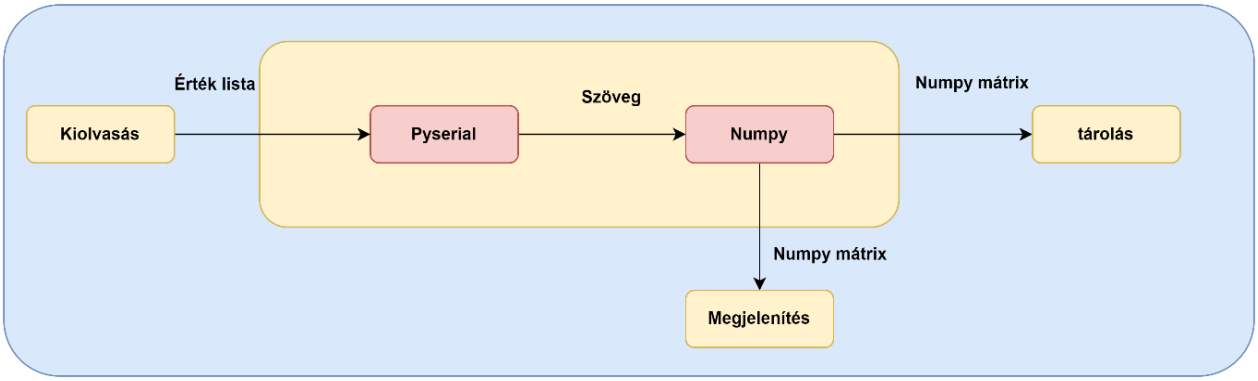


17. ábra Kiolvasásért felelős rész felépítése

9.2 Feldolgozás

A feldolgozás modul belső elemei részletesebben. Fogadja a soros port-on érkező adatokat Pyserial modul segítségével és numpy mátrixban eltárolja azokat a szenzormátrix felbontásának megfelelően. A tárolás mellett átalakítja a kapott számadatokat, kódolja szín

szerint és hőtérképet generál belőlük a felbontásnak megfelelően. A kapott képet, valós időben, PyGame könyvtár segítségével megjeleníti a kezelőnek kialakított UI felületen, videó szerűen.



18. ábra Feldolgozásért felelős rész felépítése

10 Konklúzió

Ez a projekt mindössze része egy nagyobb egésznek mely lehetőséget ad A Budapesten működő Pethő intézetnek a mai éra hihetetlen technológiai vívmányait kicsit közelebb hozni betegeikhez. Pontosan ezért elengedhetetlen az eddig munka precíz folytatása . Ehhez a prototípusok készítése elengedhetetlen volt. Remélem tapasztalatok részletes dokumentálása jól mutatja, hogy az elméleti megoldások és elképzelések mellett mekkora jelentősége lehet a gyakorlatban kipróbált letesztelt ötleteknek. Remélem továbbra is aktívan tudom folytatni a bevált módszerek alapján a munkámat és még ha csak kicsit is de segíteni azon személyeknek akik nehezebb helyzetből indulnak.

11 Irodalomjegyzék

AnonMoos. (2012. 10 29). *Strain gauge.svg*. Forrás: Wikipedia nyúlásmérő bélyeg: https://hu.wikipedia.org/wiki/F%C3%A1jl:Strain_gauge.svg

Cluney, E. (2021. 09). *Hand-Wired Keyboard Guide.* Forrás: Hand-Wired Keyboard Guide: https://yarukizero.files.wordpress.com/2021/09/handwired-keyboard-guide.pdf

Dzedzickis, A., Sutinys, E., Bucinskas, V., Samukaite-Bubniene, U., Jakstys, B., Ramanavicius, A., & Morkvenaite-Vilkonciene, I. (2020). *Polyethylene-Carbon Composite (Velostat®) Based Tactile Sensor.* Vilnius: Polymers. Forrás: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7761878/

Hyun-Jung Choi, M. S. (2019). Electrical percolation threshold of carbon black in a polymer matrix and its application to antistatic fibre. *Sci Rep*, 9, 6338.

Paredes-Madrid L., M. A. (2017). Underlying physics of conductive polymer composites and Force Sensing Resistors (FSRs). A study on creep response and dynamic loading. *materials*, 1334. Forrás: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5706281/

Paredes-Madrid, L., Matute, A., Bareño, J., Parra Vargas, C., & Gutierrez Velásquez, E. (2017). Underlying Physics of Conductive Polymer Composites and Force Sensing Resistors (FSRs). A Study on Creep Response and Dynamic Loading. *Materials*, 10, 1334.

Reps, M. (2017. 09 17). *Youtube*. Forrás: Hi-Res Pressure Sensor Matrix with the LattePanda: https://www.youtube.com/watch?v=4JBSHqUcaG4&ab_channel=MarcoReps

Wang L., D. T. (2009. Novembe). Influence of carbon black concentration on piezoresistivity for carbon-black-filled silicone rubber composite. *Carbon*, 3151-3157. Forrás: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622309003972?via%3Dihub

12 Csatolmányok

12.1 Arduino kód

```
const int rowNum = 3;
const int columNumber = 3;


int readOutDelay = 3;

const int row[] = {2, 3, 4};
const int colum[] = {5, 6, 7};

static int table_1[3];
static int table_2[3];
static int table_3[3];

void setup() {
  // defines for setting and clearing register bits
  #ifndef cbi
  #define cbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
  #endif
  #ifndef sbi
  #define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
  #endif

  // // set prescale to 16
  sbi(ADCSRA,ADPS2) ;
  cbi(ADCSRA,ADPS1) ;
```

```
  cbi(ADCSRA,ADPS0) ;

  // set pin modes for rows
  for (int i = 0; i < rowNum; i++) {
    pinMode(row[i], OUTPUT);
    digitalWrite(row[i], 1);
  }

  // set pin modes for colums
  for (int i = 0; i < columNumber; i++) {
    pinMode(colum[i], OUTPUT);
    digitalWrite(colum[i], 1);
  }

  // set pinmode for analog inputs
  pinMode(A0, INPUT);
  pinMode(A1, INPUT);
  pinMode(A2, INPUT);

  // start serial at 115200 baudrate
  Serial.begin(115200);

  Serial.println();



}

int binRow = 0b100;


void loop() {
  String pressure_Frame = "";
  digitalWrite(row[1], 0);
  digitalWrite(row[2], 0);
  delay(readOutDelay);
  digitalWrite(row[0], 1);
  lineRead(3, table_1, A0);
  for(int i = 0; i < sizeof(table_1) / sizeof(int); i++){

    //Serial.print(map(table_1[i], 200, 1000, 100, 0));
    // Serial.print(table_1[i]);
    // Serial.print(",");
    pressure_Frame += table_1[i];
    pressure_Frame += ",";
  }

  digitalWrite(row[0], 0);
  digitalWrite(row[2], 0);
```

```
  delay(readOutDelay);
  digitalWrite(row[1], 1);
  lineRead(3, table_2, A1);
  for(int i = 0; i < sizeof(table_2) / sizeof(int); i++){

    //Serial.print(map(table_1[i], 200, 1000, 100, 0));
    // Serial.print(table_2[i]);
    // Serial.print(",");
    pressure_Frame += table_2[i];
    pressure_Frame += ",";
  }
  digitalWrite(row[0], 0);
  digitalWrite(row[1], 0);
  delay(readOutDelay);
  digitalWrite(row[2], 1);
  lineRead(3, table_3, A2);
  for(int i = 0; i < sizeof(table_3) / sizeof(int); i++){

    //Serial.print(map(table_1[i], 200, 1000, 100, 0));
    // Serial.print(table_3[i]);
    // Serial.print(",");
    pressure_Frame += table_3[i];
    pressure_Frame += ",";
  }

  // Serial.print("\r\n");
  Serial.println(pressure_Frame);

}


// get the average of multiple analog reads
float averageRead(int pin, int number, int interval){
  int temp = analogRead(pin);
  return temp;
}


// read a line of FSR-s, return an array
void lineRead(int numberOfColums, int tempTable[], int analogPin){
  int binClum = 0b100;
  for(int i = 0; i < numberOfColums; i++){
    for (int j = 0; j < numberOfColums; j++) {
      int bitValue = (binClum >> j) & 1; // Bit érték kinyerése
      digitalWrite(colum[j], !bitValue);
  }

    binClum = binClum >> 1;
    delay(1);
```

```
    tempTable[i] = analogRead(analogPin);


  }
  return;
}
```

12.2 Python kód

```
import serial
import numpy as np
import cv2
import pygame




colums = rows = 3
rectangleSize = 200
margin = 0
# testList = [0, 400, 900, 400, 900, 700, 900, 400, 900]
X = colums * rectangleSize+int(margin / 2)
Y = rows * rectangleSize+int(margin / 2)
blank_image = np.zeros((Y, X, 3), np.uint8)
blank_image = cv2.cvtColor(blank_image,cv2.COLOR_BGR2HSV)



aweragerNumber = 10

pygame.init()
screen = pygame.display.set_mode((X, Y))
pygame.display.set_caption('Pressure_Pad')


# make sure the 'COM#' is set according the Windows Device Manager
ser = serial.Serial('COM6', 115200, timeout=2)




data = [[], [], [], [], [], [], [], [], []]
dataAwerage = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

data = np.zeros((9), np.uint16)
```

```
num = []
# while 1:
#     if ser.in_waiting:
#         byte = ser.read(ser.in_waiting)
#         print(byte)
#     print(ser.read(ser.in_waiting).decode('utf'))
#     print(ser.readline())

while 1:

    screen.fill("black")

    # if ser.in_waiting:
    #     line = ser.readline().decode('utf').strip()  # read a byte string
    #     split_num = line.split(",")
    #     ser.flushInput()
    # if ser.read()
    ser.read(ser.in_waiting)
    line = ser.readline().decode('utf').strip()  # read a byte string
    # print(line)
    split_Line = 0
    split_num = line.split(",")




    # for i in range(9):

    #     try:
    #         data[i].insert(0, int(split_num[i]))
    #     except:
    #         data[i].insert(0, 0)

    #     try:
    #         data[i].pop(aweragerNumber)
    #     except:
    #         pass
    #     dataAwerage[i] = int(sum(data[i]) / aweragerNumber)
    # print(data[0])
    # print(dataAwerage)

    for i in range(9):
        try:
            data[i] = int(split_num[i])
        except:
            pass

    HSV_TestList = np.interp(data, [200, 1023], [0, 120])
    # print(data)
```

```
    colorNumber = 0
    for i in range(rows):
        for j in range(colums):
            try:
                color = [int(HSV_TestList[colorNumber]), 255, 255]
            except:
                color = [0, 0, 200]
            heatmap = cv2.rectangle(blank_image, [int(margin /
2)+i*rectangleSize, int(margin / 2)+j*rectangleSize], [rectangleSize +
i*rectangleSize, rectangleSize + j*rectangleSize], color, -1)

            if colorNumber == (rows*colums):
                colorNumber = 0
            else:
                colorNumber += 1
            final_Image = cv2.cvtColor(heatmap,cv2.COLOR_HSV2RGB)
            final_Image = cv2.blur(final_Image,(20,20))
            size = final_Image.shape[1::-1]


            surface = pygame.image.frombuffer(final_Image.flatten(), size,
'RGB')
            screen.blit(surface, (0,0))
            # cv2.imshow("pressuremat", final_Image)
            # cv2.waitKey(1)
            for event in pygame.event.get():
                if event.type == pygame.QUIT:
                    pygame.quit()
                    quit()
            pygame.display.update()
```