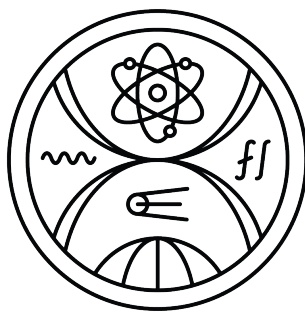


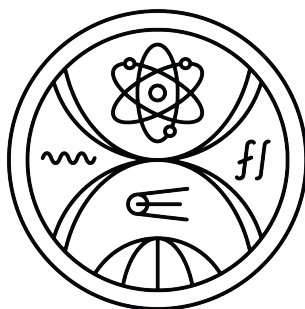
UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



BUDOVANIE SCHÉMY TELA HUMANOIDNÉHO ROBOTA S TAKTILNOU KOŽOU

Diplomová práca

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY



BUDOVANIE SCHÉMY TELA HUMANOIDNÉHO ROBOTA S TAKTILNOU KOŽOU

Diplomová práca

Študijný program: Aplikovaná informatika
Študijný odbor: Aplikovaná informatika
Katedra: Katedra aplikovanej informatiky
Školiteľ: RNDr. Kristína Malinovská, PhD.
Konzultant:



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Bc. Miriam Cidoríková
Študijný program: aplikovaná informatika (Jednoodborové štúdium, magisterský II. st., denná forma)
Študijný odbor: informatika
Typ záverečnej práce: diplomová
Jazyk záverečnej práce: slovenský
Sekundárny jazyk: anglický

Názov: Budovanie schémy tela humanoidného robota s taktilnou kožou
Building a body schema in humanoid robot with tactile skin

Anotácia: Hmat je zmysel, ktorý sa vyvíja ešte pred videním a to už v prenatálnom živote dieťaťa. Dotýkaním sa samého seba si jedinec vytvára mapu svojho tela, tzv. body schema. V rámci kognitívnej robotiky modelujeme prepojenie medzi propriocepciou, čiže vnímaním kde sa nachádza ruka a dotykovým vnemom pomocou humanoidného robota iCub so špeciálnou umelou taktilnou kožou a to prostredníctvom umelých neurónových sietí.

Cieľ: Vychádzajúc z predošlých prác natrénujte a otestujte existujúci model neurónovej siete pre robota iCub na nových nazbieraných dátach. Vyroberte a vyhodnotte experimenty s rôznymi modulmi modelu, vyberte najlepšie parametre a analyzujte jeho správanie a úspešnosť vzhľadom na rôzne množiny dát. Ďalej navrhните a implementujte alternatívne moduly modelu pre reprezentáciu sekvencií pohybov vedúcich k dotyku na tele robota a možnosti reprodukovat' pohyb na základe zadaného miesta na tele robota.

Literatúra: [1] Hoffmann, M., Marques, H., Arieta, A., Sumioka, H., Lungarella, M. and Pfeifer, R., (2010). Body schema in robotics: a review. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, 2(4), pp.304-324.
[2] Hoffmann, M.; Straka, Z.; Farkaš, I.; Vavrečka, M. & Metta, G. (2018). Robotic homunculus: Learning of artificial skin representation in a humanoid robot motivated by primary somatosensory cortex. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems 10 (2), 163-176
[3] Malinovská, K., Farkaš, I., Harvanová, J. & Hoffmann, M. (2022). A Connectionist Model of Associating Proprioceptive and Tactile Modalities in a Humanoid Robot. Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL).

Vedúci: RNDr. Kristína Malinovská, PhD.
Katedra: FMFI.KAI - Katedra aplikovanej informatiky
Vedúci katedry: doc. RNDr. Tatiana Jajcayová, PhD.
Dátum zadania: 22.09.2022

Dátum schválenia: 01.12.2022

prof. RNDr. Roman Ďuríkovič, PhD.
garant študijného programu



81943386

Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

.....
š t u d e n t

.....
v e d ú c i p r á c e

Týmto prehlasujem, že som túto prácu napísala sama, len s pomocou spomenutej literatúry, pod dohľadom mojej školiteľky.

Bratislava, 2024

.....

Bc. Miriam Čidoríková

Pod'akovanie

Podakovanie

Abstract

Touch is one of the first senses to develop even before a person is born, playing a crucial role in shaping awareness of one's own body, known as the "body schema." This work focuses on connecting proprioception and the perception of tactile stimuli through cognitive robotics. We employ the iCub humanoid robot equipped with a special artificial tactile skin, utilizing a model of a Universal Bilateral Associative Learning (UBAL) network and Self-Organizing Maps (SOM).

Our research delves into the field of modeling the body schema using cognitive robotics. Using the iCub humanoid robot with artificial tactile skin, we connect proprioceptive information about hand position with tactile stimuli. We trained an existing neural network model on new data and conducted experiments with different modules, identifying optimal parameters. The work also encompasses experiments with the UBAL model, linking proprioceptive sensor information about hand position with tactile stimuli during interactions with the environment.

The goal of our work is to gain a better understanding of how a humanoid robot can integrate and adapt to information from its own body. Investigating the impact of hyperparameters on our model's results provides crucial insights into optimizing the learning process for better integration of proprioceptive and tactile information in cognitive robotics.

Our work builds upon existing knowledge from the literature, referencing works such as [15], [19], and [14], which address the issues of body schema and the connection between proprioception and tactile perception in cognitive robotics.

Keywords: iCub, neural network, self-organizing maps, touch, proprioception

Abstrakt

Hmat je jedným z prvých zmyslov, ktorý sa rozvíja ešte pred narodením človeka a hrá kľúčovú úlohu pri tvorbe vedomia o vlastnom tele, známom ako "body schema". Táto práca sa venuje prepojeniu medzi propiocepciou a vnímaním taktilných stimulov prostredníctvom kognitívnej robotiky. Využívame humanoidného robota iCub-a vybaveného špeciálnou umelou taktilnou kožou a používame na to model univerzálnej dvojstrannej asociatívnej siete (UBAL) a samoorganizujúcej sa mapy (SOM).

Naša práca sa zameriava na výskum v oblasti modelovania schémy tela pomocou kognitívnej robotiky. Využívame humanoidného robota iCub s umelou taktilnou kožou na prepojenie propiocepčných informácií o polohe ruky s taktilnými stimulmi. Natrénovali sme existujúci model neurónovej siete na nových dátach a vykonali experimenty s rôznymi modulmi modelu, identifikujúc optimálne parametre. Práca taktiež zahŕňa experimenty s modelom UBAL, ktorý slúži na prepojenie informácií z propiocepčných senzorov o polohe ruky s taktilnými podnetmi pri interakcii s prostredím.

Cieľom našej práce je lepšie porozumieť, ako humanoidný robot môže integrovať a adaptovať sa na informácie z vlastného tela. Skúmanie vplyvu hyperparametrov na výsledky nášho modelu nám poskytuje dôležité poznatky o tom, ako optimalizovať proces učenia pre lepšie prepojenie propiocepčných a taktilných informácií v kognitívnej robotike.

Naša práca sa opiera o existujúce poznatky z literatúry, ako sú práce [15], [19] a [14], ktoré sa venujú problematike schémy tela a prepojeniu medzi propiocepciou a taktilným vnemom v oblasti kognitívnej robotiky.

Kľúčové slová: iCub, neurónová sieť, samo-organizujúce mapy, dotyk, propiocepcia

Obsah

Úvod	1
1 Kognitívna robotika a modelovanie vnímania vlastného tela	2
1.1 Biologická motivácia	2
1.2 Reprezentácia obrazu ľudského tela	2
1.2.1 Propriocepcia	3
1.2.2 Somatosenzorická kôra a reprezentácia dotyku	4
1.3 Kognitívna robotika	5
1.4 Predošlé výskumy v danej oblasti	6
1.5 Použité technológie a nástroje	8
1.5.1 YARP	8
1.5.2 Robot iCub	9
1.5.3 Reprezentácia tela	10
1.5.4 Vnímanie dotyku a syntetická pokožka	12
1.5.5 Simulátor iCub	12
1.5.6 Moduly iCub simulátora	13
1.5.7 iCubSkinGui	13
1.5.8 MotorGui	13
1.5.9 Robot Nao	14
2 Implementácia	17
2.1 Naš neurónový model	17
2.1.1 Samoorganizujúce sa mapy (SOM)	17
2.1.2 MRF SOM	18
2.2 Naše datasety	18
2.2.1 Dáta z robota iCub	18
2.2.2 Dáta z robota Nao	18
3 Experimenty	19
3.1 Experimenty so SOM	19
3.2 Experimenty s UBAL-om	19

Zoznam obrázkov

1.1	Umiestnenie somatosenzorickej kôry v mozgu	4
1.2	Somatosenzorický homonkulus	5
1.3	Humanoidný robot iCub.	10
1.4	Kinematická štruktúra	11
1.5	Umiestnenie taktilných senzorov	12
1.6	MotorGui	13
1.7	Robot Nao [5]	14
1.8	Detail kinematiky robota Nao	15
1.9	Panva robota Nao [10]	16

Zoznam tabuliek

1.1	Typ kľbu a jeho rozsah	16
-----	----------------------------------	----

Úvod

Kapitola 1

Kognitívna robotika a modelovanie vnímania vlastného tela

1.1 Biologická motivácia

Kľúčovým pojmom v tejto diplomovej práci je reprezentácia ľudského tela v našej mysli. Táto reprezentácia úzko súvisí s propiocepciou, ktorej sa budeme venovať v nasledujúcej podkapitole. Výskumy na deťoch vo veku 2 až 11 mesiacov ukázali [8], že deti si mapu svojho tela vytvárajú pomocou nahodných pohybov končatín. Okrem mapy vlastného tela sa učia ako sa pohnúť, tak aby nastal dotyk na konkrétnom mieste. Vo výskume vykonanom M.Hoffmannom [8] boli v priebehu niekoľkých týždňov testovaným deťom prikladané na telo vibrujúce zariadenia, na ktoré mali reagovať. Presnosť lokalizovania stimulu na tele sa každým týždňom zvyšovala. Zo začiatku bol úspech ak akoukoľvek končatinou dieťa trafilo stimulované miesto. Postupom času sa dieťa začalo dotýkať konkrétnej oblasti dlaňou, či prstami. Výskumy teda dokazujú, že v priebehu prvého roku sa vytvára v ľudskom mozgu mapa vlastného tela.

1.2 Reprezentácia obrazu ľudského tela

Koncept obrazu ľudského tela v mozgu bol predstavený Headom a Holmesom [12]. Navrhli koncept reprezentácií ľudského tela na základe neurologických pacientov, so selektívnou stratou určitých pocitov. Z ich pohľadu existujú dve odlišné reprezentácie tela. Prvá hovorí o tom, že obraz tela je kognitívna reprezentácia tela založená na získaných vedomostiach a skúsenostiach. Predpokladá sa, že je základom pre percepčné úsudky. Kognitívna reprezentácia nám pomáha lepšie porozumieť, ako naša mentálna reprezentácia fyziologických pocitov ovplyvňuje naše rozhodovanie, správanie a povedomie o sebe samých. Druhou reprezentáciou je schéma tela, ktorá je závislá od aktuálneho propioceptívneho vstupu. Funguje prevažne podvedome a zaoberá sa

spracovaním fyziologických stavov tela.

Sherrington [26] rozdelil vnímanie do troch kategórií : *exterocepcia*, *interocepcia* a *propriocepcia*.

1. *Exterocepcia* - Zachytávanie podnetov z vonkajšieho prostredia. Vnemy môžu byť zrakové, sluchové, a pod.
2. *Interocepcia* - Zachytávanie podnetov z vnútra tela. (napr. smäd, hlad, emócie)
3. *Propriocepcia* - Vnemy zachytené proprioreceptormi si zvyčajne neuvedomujeme. Napriek tomu vieme určiť polohu tela a končatín v priestore aj bez toho, že by sme sa na ne pozerali.

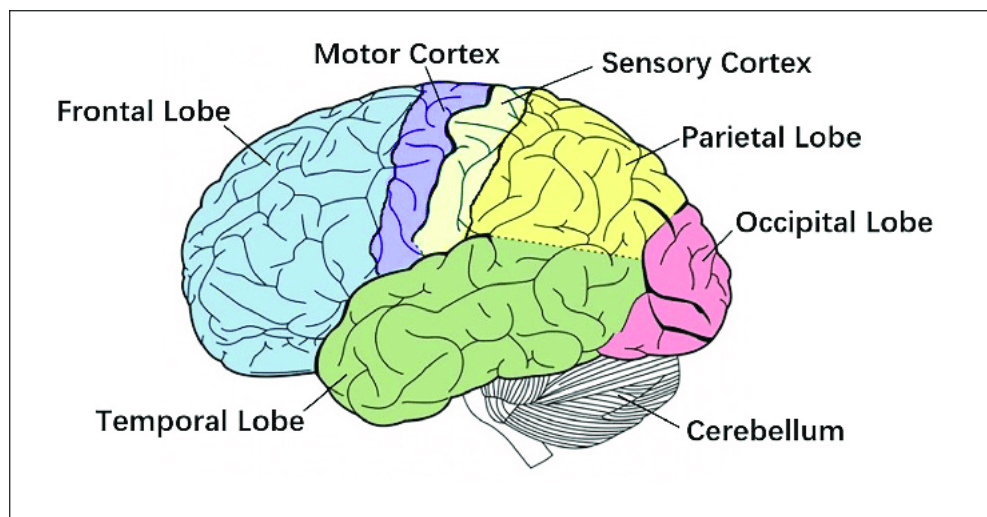
1.2.1 Propriocepcia

Propriocepcia je zmysel, ktorý nám umožňuje vnímať pozíciu a pohyb nášho tela v priestore. Vzhľadom na to, že propriocepcia sa vyvíja už u batoliat, kedy nemajú ešte dobre vyvinutý zrak, vieme povedať, že sa táto schopnosť vytvára bez prítomnosti zrakových vnemov. Všeobecný koncept v senzorickej fyziológii hovorí, že to, čo cítime, obvykle predstavuje rozdiel medzi tým, čo očakávame, a tým, čo sa skutočne stalo. Počas vykonania pohybu na základe nejakého plánu dochádza k rozdielu medzi signálmi, ktoré telo očakáva a tými, ktoré naozaj vygeneruje. Pri vykonaní nevzniká žiadna senzácia, ale napriek tomu človek presne vie kde sa nachádza jeho pohybujúca sa končatina [6]. Je možné umelo vytvoriť proprioceptívny vnem pomocou svalových vibrácií [9]. Vibrácia vyvolá pocity ako pri pohybe, ktoré vyúsťujú do pocitov prekvapenia človeka, ktorému boli vyvolané, pretože nerozumie odkiaľ takéto pocity pramenia. To naznačuje, že vôľa pohnúť sa a následné proprioceptívne pocity sú úzko prepojené.

Propriocepcia bola predmetom diskusie už stovky rokov. Aristoteles veril, že existuje 5 zmyslov : zrak, sluch, čuch, chuť a hmat. Špecificky vylúčil existenciu nejakého šiesteho zmyslu [25].

V 20.storočí prevládal názor, že keď hovoríme o vneme polohy končatiny, zrejším miestom na hľadanie receptorov, ktoré signalizujú polohu končatiny, by mal byť kĺb okolo, ktorého sa končatina pohybuje [24] . Prvé úvahy o svalovom vnímaní sa datujú do 17.storočia [11]. Objav šiesteho, svalového, zmyslu sa pripisuje Bellovi [7]. Dnes prevláda názor, ktorý považuje kožné tkanivá a svalové vlákna za receptory citlivé na natiahnutie a kĺby a šľachy za mechanoreceptory. Tieto sú dokopy považované za receptory propriocepce, tzv. proprioceptory [24].

Neuróny, ktoré posúvajú vnemy z proprioreceptorov do mozgu sa nazývajú aferentné neuróny. *Aferentný* znamená prinášať smerom k nervovému systému. Tento výraz sa používa pre všetky informácie prinášané do centrálného nervového systému z periférií, či už táto informácia vedie k pocitom alebo nie [16].

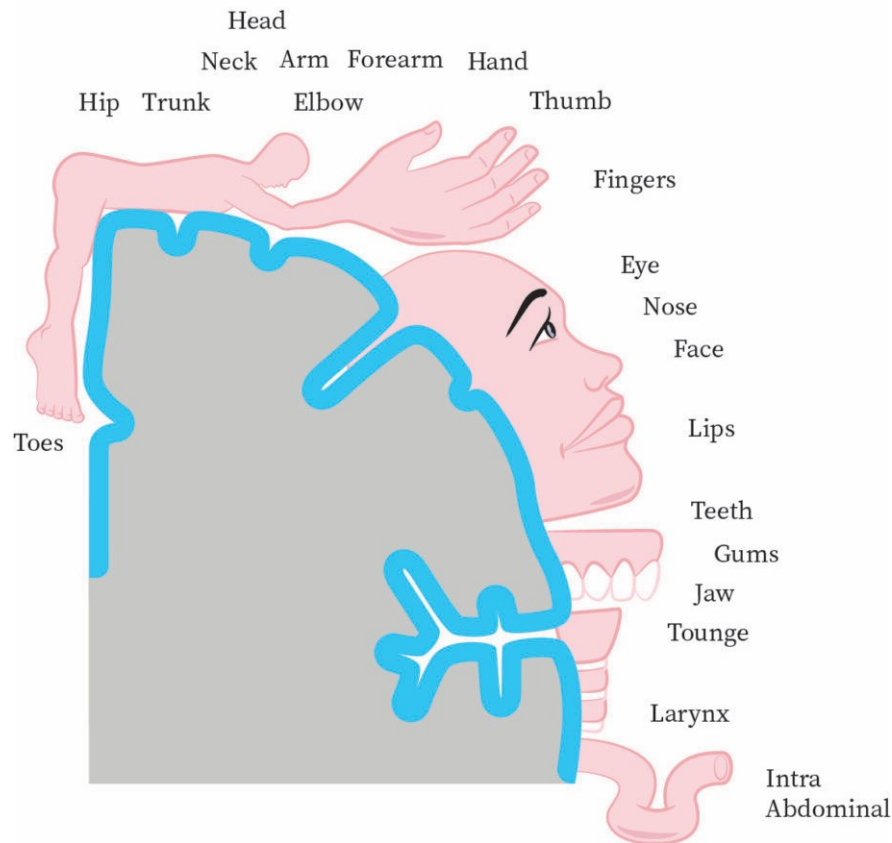


Obr. 1.1: Umiestnenie somatosenzorickej kôry v mozgu. Motorická kôra je zodpovedná za plánovanie, kontrolu a vykonávanie vedome ovládaných pohybov. Senzorická kôra zodpovedá za taktilné vnemy na celom tele. Cerebellum je zodpovedné za kontrolu pohybu.[17]

1.2.2 Somatosenzorická kôra a reprezentácia dotyku

Somatosenzorická kôra Penfield a Rasmussen je oblasť mozgu, ktorá prijíma a spracúva senzorické informácie z celého tela. Nachádza sa v parietálnej časti mozgového laloku a leží za primárnou motorickou kôrou frontálneho laloku. Prvýkrát vytvoril mapu somatosenzorickej kôry Penfield v roku 1950. Vykonával operáciu mozgu pacientovi s epilepsiou a inými poruchami. Vďaka tomu, že pacient bol počas celej operácie pri vedomí mal Penfield možnosť si všimnúť, že niektoré časti mozgu aktivovali vnemy vždy na korešpondujúcich opačných stranách mozgu [1]. Kôra interpretuje taktilné vnemy ako dotyk, teplo, bolesť a informuje o pozícii tela v priestore [22].

Časť mozgu zameranú na jednotlivé časti tela reprezentuje somatosenzorický homonkulus. Slovo *homonkulus* pochádza z latinčiny a znamená 'malý muž', ktorého si vieme predstaviť na základe obrázku 1.2. V somatosenzorickej kôre sú jednotlivé časti tela topologicky usporiadané. Polohy jednotlivých častí tela nemusia byť u všetkých rovnaké. Zaujímavosťou je aj to, že veľkosť oblasti priradenej k jednotlivým častiam tela nezodpovedá ich veľkosti, ale frekvencii s akou ich používame a množstvu somatosenzorických receptorov, ktoré sa v nich nachádzajú. Napríklad ruky a pery sú veľmi citlivé, preto zaberajú aj väčšiu časť somatosenzorickej kôry. Naopak napríklad chrbát spracováva menej vnemov, takže zaberá menšiu oblasť. Prijaté signály sú prenášané do medzimozgového lôžka (thalamusu).



Obr. 1.2: Somatosenzorický homonkulus[1]

1.3 Kognitívna robotika

V preošlých podkapitolách sme si predstavili ľudskú, biologickú, stránku problematiky, ktorej sa táto práca venuje. V tejto kapitole si opísané procesy, pre prírodu bežné skúsime premietnuť do robotickej roviny. Priblížime si čo je to kognitívna robotika a ako modelovať spomínané procesy vnímania vlastného tela u humanoidných robotov.

V kognitívnej robotike sa venujeme štúdiu a implementácii procesov, mechanizmov a architektúr, ktoré umožňujú robotom vykazovať schopnosti pripisované kognitívnym funkciám. Tieto kognitívne funkcie zahŕňajú schopnosti ako učenie, pamäť, rozpoznávanie vzorov, rozhodovanie, porozumenie prostrediu a schopnosť interakcie s ním. Cieľom kognitívnej robotiky je vybaviť roboty schopnosťami, ktoré sú podobné ľudskej mysli. Na to, aby sme takýchto robotov vedeli navrhnuť, zostrojiť a vyvíjať potrebujeme ako prvé pripraviť kognitívnu architektúru pre daného robota. Kognitívna architektúra je infraštruktúra, ktorá robotovi umožňuje vnímať, uvažovať a konať v jeho prostredí. Kognitívna architektúra zahŕňa aspekty kognitívneho robota, ktoré sú konštantné v čase a v rôznych doménach jeho aplikácií. Takáto architektúra zvyčajne zahŕňa krátkodobé a dlhodobé spomienky robota, ktoré obsahujú informácie o presvedčeníach, cieľoch a znalostiach robota. Architektúra ďalej rieši reprezentáciu prvkov, ktoré sú obsiahnuté v týchto spomienkach a ich organizáciu do väčších mentálnych štruktúr. V neposlednom

rade rieši funkčné procesy, ktoré na týchto štruktúrach operujú. Medzi tieto procesy patria výkonné mechanizmy, ktoré ich využívajú, a učiace sa mechanizmy, ktoré ich menia [23].

Kognícia neexistuje v izolácii, inteligentný robot existuje v kontexte nejakého externého prostredia ktoré musí zaznamenávať, vnímať, a interpretovať. Robot môže informácie o svete získať rôznymi modalitami, rovnako ako človek má prístup k zraku, sluchu a hmatu. Senzory na snímanie takýchto vnemov sa môžu pohybovať od jednoduchých zariadení ako je napríklad teplomer až po zložitejšie mechanizmy ako je stereoskopické videnie alebo sonar, ktoré generujú hĺbkovú mapu lokálneho prostredia v zornom poli robota. Percepcia môže tiež zahŕňať integráciu výsledkov z rôznych modalít do jedného hodnotenia alebo popisu situácie, ktorú architektúra môže reprezentovať pre využitie inými kognitívnymi procesmi [23].

Percepcia je široký pojem, ktorý pokrýva veľa typov spracovania. Od nenáročných, ktoré architektúra podporuje automaticky až po také čo potrebujú vymedzené zdroje a musia byť úmyselne vyvolané. Napríklad ľudský zrakový systém vie detekovať pohyb v periférii bez špeciálneho úsilia. Avšak fovea môže extrahovať detaily iba z malej oblasti, na ktorú je zameraná. Kognitívna architektúra, ktorá zahŕňa druhý typ senzora, musí čeliť otázke pozornosti, teda rozhodovaniu, ako prideliť a smerovať svoje obmedzené percepčné zdroje na detekciu relevantných informácií v komplexnom prostredí. Výzvou je taktiež dynamické prostredie kde sa podmienky rýchlo menia a robot musí vedieť na ne reagovať [23].

1.4 Predošlé výskumy v danej oblasti

V tejto podkapitole sa budeme v skratke venovať aktuálnemu stavu v oblasti výskumu humanoidných robotov, propiocepce a reprezentácie vlastného tela. Zároveň sa pozrieme bližšie na články a práce, z ktorých vychádza aj táto záverečná práca.

Prvou prácou, ktorú by som spomenula je výskum *Somogyi a spol.* z roku 2023. Štúdia sa zameriava na prirodzený ľudský vývoj, konkrétne na formovanie schémy vlastného tela u dojčiat. Výskum sa zaoberá počiatočnými fázami vývinového procesu, s dôrazom na integráciu propioceptívnych vstupov s taktilnými informáciami počas obdobia kedy dojča vykonáva náhodné pohyby a dotýka sa vlastného tela.

Štúdia využila dlhodobý prístup a porovnávala skupinu dojčiat, ktorá dostávala týždennú taktilnú stimuláciu pomocou bzučiek, s kontrolnou skupinou, ktorá takúto stimuláciu nedostávala. Štúdia hodnotila úspešnosť dosahovania, trvanie odpovedí a správanie spojené s pozorovaním reakcií na stimuláciu bzučiek. Celkovo bolo do výskumu začlenených 21 detí. Dojčatá v skupine so stimuláciou bzučiek preukázali vyššiu pravdepodobnosť úspešného dosahovania po bzučiakoch v mladšom veku v po-

rovnaní s kontrolnou skupinou. Obidve skupiny sa stali rýchlejšími vo svojich reakciách medzi hodnotiacimi návštevami, s výnimkou posledných návštev medzi 7. a 8. mesiacom. Taktilná stimulácia podporila vznik schopnosti dojčiat dosahovať po bzučiakoch na ich tele. Nebol zaznamenaný signifikantný rozdiel v správaní spojenom s pozorovaním medzi dvomi skupinami pred 8. mesiacom. V 8. mesiaci mala kontrolná skupina výrazne väčšiu tendenciu *pozerať sa* na ciele, než skupina so stimuláciou bzučiakov. Dojčatá v oboch skupinách mali s narastajúcim vekom vyššiu tendenciu *pozerať sa* na ciele a zapojenie zraku bolo spojené s úspešným dosahovaním na ciele. Existovala teda významná asociácia medzi pozorovaním a úspešnosťou dosahovania, pričom bolo pravdepodobnejšie, že dojčatá úspešne dosiahnu ciele, keď sa na ne pozerú. Štúdia kvôli svojmu dlhému trvaniu priebehu zahŕňa pomerne malú vzorku detí, a teda naznačuje potrebu ďalšieho skúmania[27].

Ďalšou prácou, ktorú by sme chceli spomenúť, je výskum somatosenzorického homonkulusu, ktorý vykonal *Hoffman a spol* v roku 2015. Hlavným cieľom práce bolo pomocou iCuba vybaveného umelou kožou, citlivou na tlak, skúmať formovanie reprezentácie celej plochy kože, pripomínajúcej tú, ktorá sa nachádza v somatosenzorickej kôre primátov. Práca sa zameriava na aplikáciu modifikovaného algoritmu samoorganizujúcich sa máp (SOM). Modifikácia známeho algoritmu SOM spočíva v obmedzení maximálnej veľkosti citlivého poľa (MRF) neurónových skupín na výstupnej vrstve. Skúma rôzne nastavenia veľkosti MRF a zároveň vplyv mechanizmov, ktoré sú nezávislé na aktivite (obmedzenia vstupno-výstupných spojení implementované pomocou MRF) a tých, ktoré sú závislé od aktivity (učenie zo stimulácie kože) na formovaní taktilnej mapy. Práca kladie dôraz na schopnosť frameworku umožniť špecifikáciu predošlých vedomostí o topológii kože a efektívne iniciovať konkrétnu reprezentáciu, ktorú následné tréningy ďalej formuje. Výsledky naznačujú robustnosť postupu a jeho aplikovateľnosť na rôzne roboty, kde je žiaduca reprezentácia ich "kože"[15].

Ďalšia práca zaoberajúca sa tvorbou schémy tela je výskum *Malinovskej a spol.* z roku 2022. Výskum vychádza z prirodzeného ľudského vývinu, konkrétne sa tiež zameriava na tvorbu obrazu svojho tela u dojčiat v postnatálnom období. Formovanie obrazu svojho tela prebieha prostredníctvom integrácie informácií z rôznych modalít. Práca sa zaoberá ranou fázou tohto procesu, ktorá zahŕňa spájanie propioceptívnych vstupov s taktilnými informáciami v čase, keď dieťa vykonáva náhodné pohyby a dotýka sa vlastného tela. Cieľom je pochopiť ako tieto procesy fungujú a následné možné začlenenie kognitívneho učenia u humanoidných robotov.

V práci sa snažia o následné prenesenie týchto poznatkov do oblasti robotiky vo forme pripájacieho modelu zloženého z neurónových sietí, ktorý sa učí propioceptívno-taktilné reprezentácie na simulovanom humanoidnom robotovi iCub-ovi. Cieľom je vytvoriť model, ktorý dokáže napodobniť schopnosť dojčiat spojiť pohyby svojho tela s dotykmi. Vstupné signály z oboch modalít - kĺbové uhly a dotykové stimuly na oboch

horných končatinách - sa najprv samoorganizujú v neurónových mapách a potom sa spoja pomocou univerzálnej dvojstrannej asociatívnej siete (UBAL).

Prezentovaný model je pilotná štúdia s cieľom preskúmať potenciál algoritmu UBAL pri spojení proprioceptívnych a taktilných modalít[19].

1.5 Použité technológie a nástroje

V tejto kapitole si priblížime technológie a prístroje, ktoré sme pri tvorbe tejto práce použili. Hlavnými nástrojmi bol robot iCub a YARP. Zdrojový kód práce je napísaný v jazyku Python 3.7.

1.5.1 YARP

YARP(Yet Another Robot Platform) je open-source middleware a softvérový framework navrhnutý na vývoj aplikácií pre robotov. Pôvodne bol vyvinutý výskumnou skupinou zameranou na robotiku a percepciu z Janovskej Univerzity v Taliansku. Poskytuje množstvo knižníc a nástrojov, ktoré umožňujú komunikáciu, ovládanie a percepciu v robotických systémoch [4].

Základnými črtami sú :

1. *Abstrakcia zariadení* - YARP poskytuje rámec ovládačov zariadení, ktorý umožňuje jednoduchú integráciu robotického hardvéru do systému. Táto abstrakcia zjednodušuje proces pripojenia a ovládania rôznych senzorov, ovládacích prvkov a iných bežne používaných zariadení.
2. *Middleware pre komunikáciu* - YARP využíva middleware vrstvu na medziprocesovú komunikáciu, ktorá umožňuje rôznym komponentom robotického systému efektívnu výmenu dát. Podporuje rôzne komunikačné protokoly vrátane TCP/IP, UDP, zdieľanej pamäte a ďalších.
3. *Kinematika a dynamika robota* - YARP obsahuje nástroje na manipuláciu s kinematikou a dynamikou robotov, ktoré sú nevyhnutné pre úlohy, ako je plánovanie pohybu, riadenie a simulácia, resp. modelovanie fyzikálnych vlastností robota a jeho správania.
4. *3D vizualizácia* - YARP poskytuje nástroje na 3D vizualizáciu, ktoré majú význam pri vývoji a debugingu robotických aplikácií.
5. *Podpora pre rôzne programovacie jazyky* - YARP není viazaný na žiaden špecifický programovací jazyk. Pôvodne bol YARP napísaný pre C++, avšak použitím

technológií akou je napríklad SWIG umožníme ovládanie aj pomocou iných jazykov. Medzi vyššie jazyky, ktoré môžu ovládať YARP patria napríklad Python, Ruby, Matlab a iné.

SWIG je nástroj na vývoj softvéru, ktorý umožňuje prepojenie medzi zdrojovým kódom napísaným v C/C++ a rôznymi vysoko úrovňovými programovacími jazykmi (skriptovacími aj neskriptovacími). SWIG sa zvyčajne používa na parsovanie rozhraní v C/C++ a následné generovanie kódu, ktorý spojí nižší jazyk s vyšším [3].

Komunikácia medzi jednotlivými YARP procesmi prebieha pomocou portov. Porty je možné otvárať, prepájať s inými portami a vytvárať data streams, ktoré sa dajú čítať z iných portov.

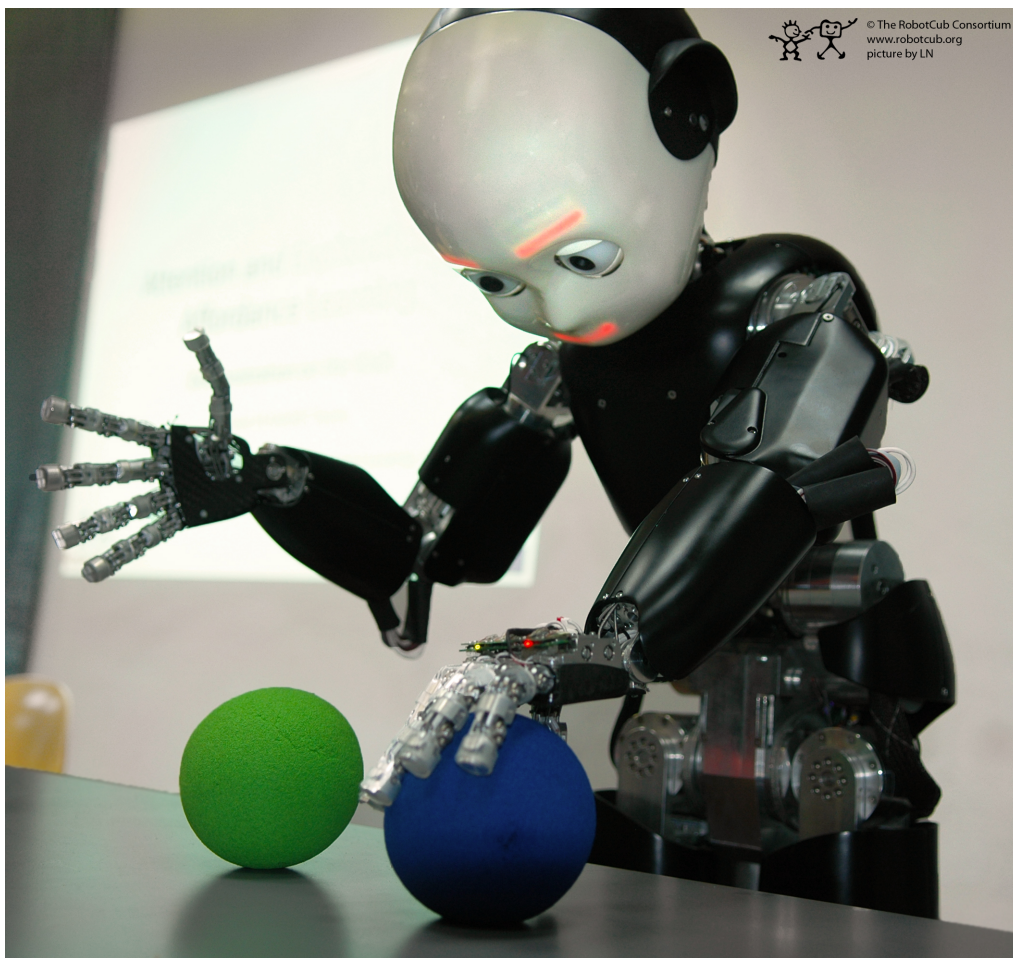
Základné príkazy na ovládanie YARP-u sú :

- `yarpserver` - základný príkaz, ktorého zadáním spustíme samotný YARP
- `yarp read /port_name` - príkaz, ktorý vytvorí port na čítanie
- `yarp write /port_name` - príkaz, ktorý vytvorí port kde sa budú dáta nachádzať, bude možné ich čítať z iných portov
- `yarp connect /port1 /port2` - príkaz, ktorý vytvorí spojenie medzi portom1 a portom2, porty budú následne môcť medzi sebou komunikovať
- `yarp disconnect /port1 /port2 that is reading` - príkaz, ktorý odstráni spojenie medzi portami, port1 je ten, ktorý do spojenia zapisoval a port2 ten, ktorý čítal

Uvedené príkazy sa zadávajú do príkazového riadku. Jednotlivé programovacie jazyky, obsahujú knižnice, ktoré zahŕňajú funkcie, ktorých volanie umožňuje používať tieto príkazy.

1.5.2 Robot iCub

iCub je humanoidný robot navrhnutý na výskumné účely, na pomoc pri vývoji a testovaní algoritmov umelej inteligencie. iCub bol vyvinutý v rámci projektu RobotCub, ktorý skončil v roku 2010. Výsledkom tohto päť rokov trvajúceho projektu je práve robot iCub. Projekt bol financovaný zo zdrojov Európskej komisie prostredníctvom jednotky E5 "Kognitívne systémy, interakcia a robotika". Hlavným cieľom tohto projektu bolo skúmanie kognitívnych schopností pomocou humanoidného robota iCuba. Projekt je otvorený vo všetkých zmysloch tohto slova. To znamená, že platforma je voľne distribuovaná na internete, softvér je vyvíjaný ako open-source a noví partneri na vývoj sú vítaní[2].

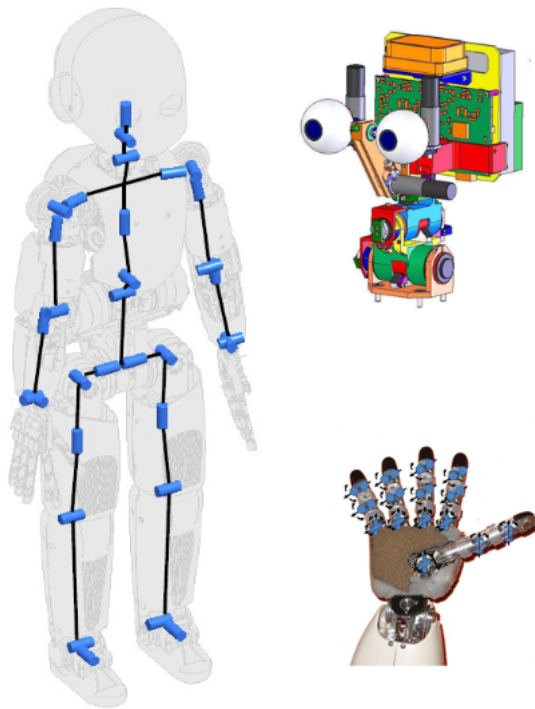


Obr. 1.3: Humanoidný robot iCub.

1.5.3 Reprezentácia tela

iCub má 53 stupňov voľnosti, ktoré hýbu kĺbmi na celom tele, vysoký je 105cm a váži 24 kilogramov. Aby robot vedel reagovať na svoje okolie, musí najprv konať, nie sa len náhodne pohybovať, vnímať, kategorizovať a tým pádom rozumieť svojmu okoliu. Takéto správanie nie je možné dosiahnuť vopred skompilovanými softvérovými rutinami. Práve naopak, učenie je realizované pomocou ontogenetického procesu, ktorý simuluje učenie sa batoliat. Skutočne poznať prostredie neznamena ho len vnímať a kategorizovať, je potrebné porozumieť následkom vykonaných akcií. Počas získavania takýchto poznatkov sú omyly rovnako dôležitým učebným faktorom ako správne odpovede, pretože rozširujú pole skúmania humanioda. Takýto prístup je aj zásadným rozdielom medzi automatickým systémom a humanoidom. Pre automatický systém nie sú chyby povolené už z jeho samotnej definície[20].

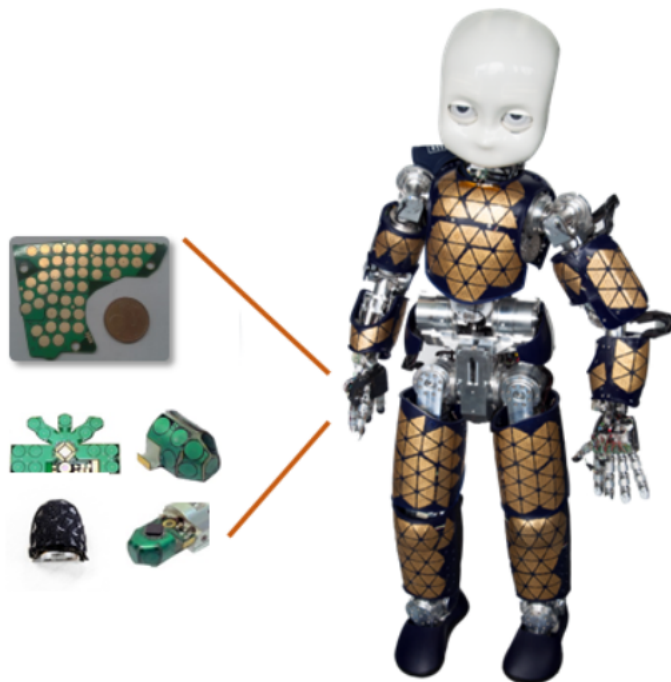
Simulácie ľudského tela umožnili určiť, ktoré vlastnosti skutočného tela je potrebné zreplikovať na to, aby iCub vedel vykonávať požadované typy pohybov. Stupeň voľnosti je pojem označujúci rozsah pohybu kĺbov robota, vyjadruje sa v stupňoch a uhloch. Každá ruka má 7 stupňov voľnosti, ktoré zabezpečujú obratnosť a dosah robota. Ruky



Obr. 1.4: Kinematická štruktúra humanoidného robota iCub-a a stupne voľnosti očí a ruky[21].

robota boli navrhnuté tak, aby čo najviac pripomínali tie ľudské, preto má aj robot 5 prstov. V palci sa nachádzajú 4 kĺby, v ostatných prstoch sú len 3. Celkovo má každá ruka 19 kĺbov ovládaných 9 motormi. Enkodéry poskytujú spätnú väzbu o polohe motorov a všetkých 19 kĺbov, takže je možné merať konfiguráciu ruky. Ruka je kompaktná, je dlhá približne 150mm, široká 60mm a hrubá 25mm. Rameno iCuba má tri stupne voľnosti, ktoré ovládajú motory umiestnené v trupe robota. Na nohách sa nachádza po 6 stupňov voľnosti na každej, dokopy 12. Väčšina kĺbov sa môže hýbať v rozsahu od 44° po 270° , nie každý kĺb rovnako. Väčšina dielov bola vyrobená z hliníkových zliatin. Hriadle kĺbov, ktoré sú vystavované vyššiemu mechanickému zaťaženiu sú vyhotovené z nerezovej ocele s vyššou pevnosťou. Krk robota má taktiež tri stupne voľnosti, zabezpečujúce naklonenie, prevrátenie a otočenie hlavy. Oči sú dve kamery, poháňané tromi motormi, ktoré reprezentujú ľudský zrakový systém [21].

ICub v každej chvíli pozná všetky stupne voľnosti na svojom tele. Pre ľudské vnímanie ide o bežný jav a tieto informácie spracúvame v mozgu. Informácie dostávame zo svalov, šliach a kĺbov, robot ich však získava práve z uhlov, ktoré končatiny zvierajú. Takúto polohu končatín označujeme ako konfiguráciu končatín.



Obr. 1.5: Umiestnenie taktilných senzorov na tele robota a na jeho ruke a prstoch. Na celom tele má dokopy 4488 senzorov[21].

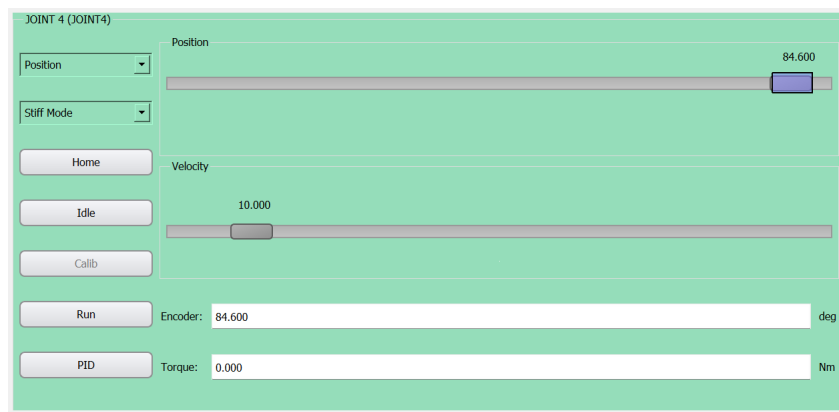
1.5.4 Vnímanie dotyku a syntetická pokožka

Väčšina tela iCuba je pokrytá systémom kapacitných taktilných prvkov. Tieto prvky dokopy vytvárajú "pokožku". Umelá pokožka sa skladá z trojuholníkov. Jeden takýto trojuholník obsahuje 10 senzorov, tzv. taxelov, ktoré snímajú tlak vytvorený pri dotyku.

1.5.5 Simulátor iCub

Ide o open-source softvér vyvinutý na účely vývoja samotného robota. Bol vyvinutý z praktických dôvodov, lebo dostať sa k fyzickému robotovi je kvôli cene náročné. Taktiež má bezpečnostné opodstatnenie pri testovaní zdrojových kódov, ktoré sa najprv testujú na simulátore a až neskôr na robotovi. Týmto zabránime nezvratiteľným poškodeniam, ktoré by nevhodný kód a následné nesprávne zaobchádzanie mohli spôsobiť. Simulátor sa snaží o dôverné modelovanie správania skutočného robota.

Simulátor je možné spúšťať na viacerých operačných systémoch (Linux, Mac OS, Windows). Podrobný návod na inštaláciu sa nachádza na stránke: http://wiki.icub.org/wiki/ICub_Simulator_Installation. Dostupnejší variant pre Windows sa nachádza na stránke: <https://github.com/andylucny/iCubSimOnWindows>, ktorý sme pri tvorbe tejto práce využili aj my.



Obr. 1.6: Vzhľad grafického rozhrania modulu MotorGui pre nastavovanie stupňov voľnosti v iCubSimulátore.

1.5.6 Moduly iCub simulátora

Vďaka verzii simulátora, ktorú sme si nainštalovali my, nebolo nutné spúšťať najprv yarpserver a následne simulátor, stačilo nám spustiť jeden súbor `run-iCubSim.bat`, ktorý spustil yarpserver, ktorý si však je potrebné dopredu nainštalovať, a nastavil všetky porty. Okrem zobrazovania samotnej simulácie má simulátor rôzne moduly potrebné na vizualizáciu a pomoc pri ovládaní pohybu robota. Tieto moduly poskytujú príjemné používateľské rozhranie na prácu s dátami.

1.5.7 iCubSkinGui

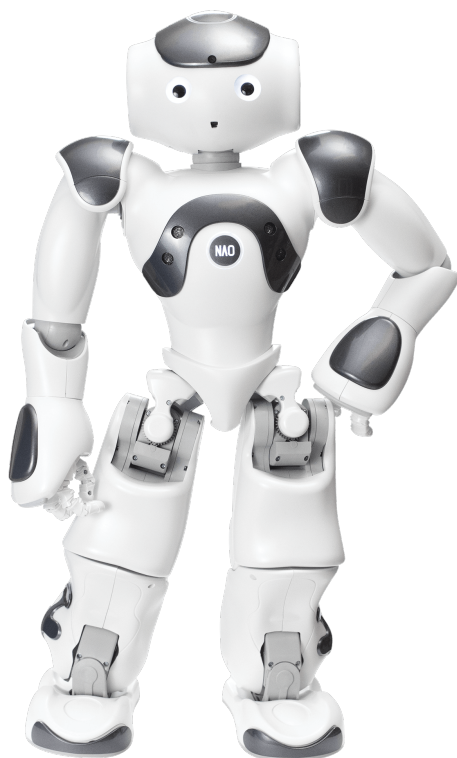
Modul iCubSkinGui je zameraný na vizualizáciu a interakciu s povrchovými senzormi (tj. "kožou" robota). Tento modul umožňuje používateľom monitorovať a následne analyzovať dáta z týchto senzorov, čo je kľúčové pre porozumenie interakcie robota s jeho okolím a jeho schopnosti vnímať dotyk.

Porty je potrebné ručne pospájať. Naraz vie zobrazíť tento modul len jednu časť tela robota. Takže ak chceme vidieť viaceré časti v tom istom čase je potrebné spustiť viacero inštancií tohto modulu. Na zvolenie nami požadovanej časti tela je potrebné zadať príkaz v tvare - `from [meno časti kože]`.

1.5.8 MotorGui

Modul iCubMotorGUI sa zameriava na vizualizáciu a ovládanie pohonov a aktuátorov, ktoré riadia pohyby iCub-a. Poskytuje používateľom nástroje na sledovanie stavu motorov, ladenie ich parametrov a simuláciu rôznych pohybových scenárov.

Tento modul sa po spustení sám pripne na zapisujúce porty iCub simulátora. Grafické rozhranie modulu umožňuje jednoduché a rýchle zadávanie hodnôt pre stupne voľnosti a tým efektívne ladiť robota.



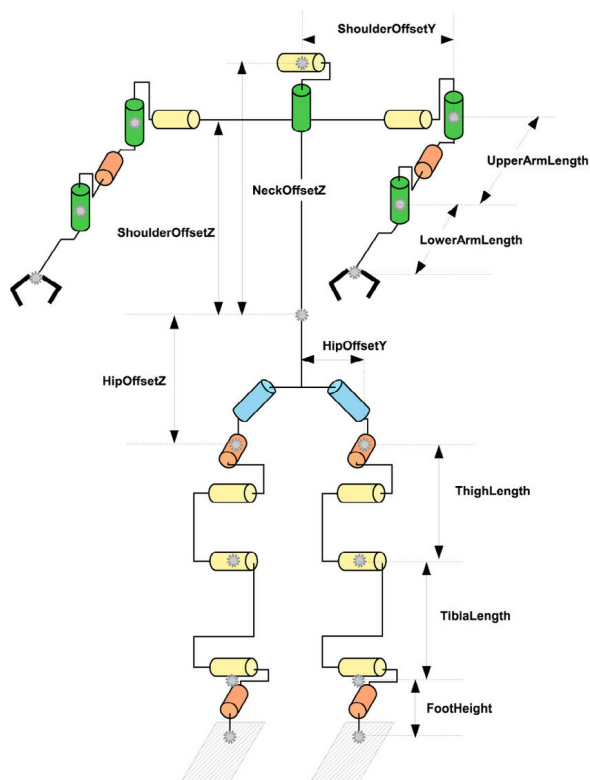
Obr. 1.7: Robot Nao [5]

1.5.9 Robot Nao

Druhým robotom, z ktorého pohybu čerpáme dáta na tréovanie našej neurónovej siete je humanoidný robot Nao. Bol vyvinutý v roku 2008 francúzskou firmou Aldebaran Robotics ako ich prvý robot. Aldebaran Robotics skúpila v roku 2012 japonská firma SoftBank, ktorá odvtedy pokračuje v vývoji a podpore robotov NAO.

Nao je vysoký 57cm a váži 4,5kg, vzhľad má navrhnutý tak, aby pripomínal ľudskú postavu. Tento inovatívny robot je teda veľmi ľahký a kompaktný vzhľadom na jeho výšku a váhu. Od ostatných humanoidných robotov sa odlišuje najmä vďaka kinematickému dizajnu jeho panvy, vlastnému aktivačnému systému založenému na jednofázovom komutátorovom motore, jeho elektronike, počítačovej a distribuovanej softvérovej architektúre. Robot bol navrhnutý tak, aby bol dostupný, bez toho, aby sa znížili nároky na jeho kvalitu a výkon. Preto je možné ho využívať aj na školách a pri realizácii rôznych projektov. Jeho cena sa pohybuje okolo 10K EUR pre akademické inštitúcie, pri masovejšej výrobe a zredukovaní funkcionality je možné stlačiť jeho cenu na 4K EUR [10].

Robot Nao je veľmi ľahký v porovnaní s inými robotmi s jeho výškou. Čo znamená, že oproti ťažším robotom má menšie a slabšie motory, menší únik tepla, väčší rozsah akcelerácie a lepšie dynamické schopnosti. Taktiež kvôli menšej hmotnosti sú ľahké roboty menej nebezpečné a taktiež sa menej kazia. Dokopy má Nao 25 stupňov voľnosti. 11 stupňov voľnosti je pre dolnú časť tela a panvu, 14 stupňov voľnosti prislúcha

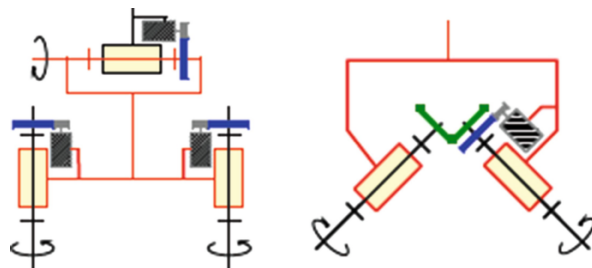


Obr. 1.8: Detail kinematiky robota Nao [18]

horným končatinám, hlave a trupu. Každá noha má 2 stupne voľnosti v členku, 1 v kolene a 2 v bedre [10].

Špeciálny mechanizmus, ktorý pozostáva z dvoch spojených kĺbov na každom bedre tvorí panvu. Os rotácie týchto dvoch kĺbov je naklonená o 45 stupňov smerom k telu. Tento mechanizmus nahrádza klasické zoskupenie troch aktívnych rotačných kĺbov, ktoré sa nachádzajú u väčšiny humanoidných robotov (viď. obrázok 1.9) : rotačný kĺb horizontálnej osi v páse a rotačné kĺby vertikálnej osi pre každé bedro končatiny. Spájanie kĺbov panvy bráni trupu v rotácii okolo vertikálnej osi vo chvíli keď sú obidve nohy na zemi, ale to nie je problém pre chôdzu a iné pohybové správanie. Navrhovaný mechanizmus má výhodu v tom, že na pohyb panvy je potrebný len jeden motor, namiesto troch ako pri klasickej architektúre [10].

V každom ramene sú umiestnené 2 stupne voľnosti, 2 sú v lakti a jeden v zápästí. 1 prídavný stupeň voľnosti slúži na úchop. Robot Nao je od verzie 6 vybavený aj dotykovými senzormi.



Obr. 1.9: Panva robota Nao [10]

Časť tela	Pohyb	Rozsah(°)
Noha (ľavá)	otáčanie boku	-68 až 44
	otáčanie bedra	-25 až 45
	naklonenie bedra	-100 až 25
	naklonenie kolena	0 až 130
	naklonenie členku	-75 až 45
	otáčanie členku	-45 až 45
Ruka (ľavá)	otáčenie ramena	0 až 95
	naklonenie ramena	-120 až 120
	otáčanie lakťa	-120 až 120
	kývanie lakťa	0 až 90
Hlava	krútenie hlavou	-90 až 120
	kývanie hlavou	-37 až 31

Tabuľka 1.1: Typ kĺbu a jeho rozsah

Kapitola 2

Implementácia

V tejto kapitole sa budeme venovať nami zvoleným modelom neurónových sietí, ktoré využívame pri našom tréňovaní a testovaní na nazbieraných dátach z už spomínaných robotov iCub a Nao.

2.1 Náš neurónový model

2.1.1 Samoorganizujúce sa mapy (SOM)

Samoorganizujúce sa mapy (ang. Self-Organizing Maps alebo SOMs) sú typom neurónových sietí, ktoré patria medzi neskôr vytvorené neurónové siete, tzv. konkurenčné neurónové siete. Tento model bol vyvinutý v roku 1982 fínskym vedcom Teuvo Kohonenom. Ako už z názvu vidno, ide o neurónové siete, ktoré sa učia bez učiteľa (samoorganizovane, ang. unsupervised learning). Čo znamená, že počas procesu učenia nemajú žiadnu informáciu o hodnotách výsledných neurónov.

Samoorganizujúce sa mapy majú jedinečnú vlastnosť, že dokážu realizovať zobrazenie, ktoré zachováva topológiu, a tým zobrazuje charakteristické príznaky alebo vlastnosti tréňovacej množiny dát. To znamená, že ak boli dva body v pôvodných dátach blízko seba, budú aj ich odrazy na SOM blízko seba. Takéto zobrazenie je užitočné na odhalenie vzorov, štruktúr a vzťahov v dátach bez potreby prevedenia dôkladnej analýzy vstupných údajov. Táto vlastnosť je nápomocná pri modelovaní propriocepcie a vytváraní schémy tela pri našom výskume. Vieme, že schéma tela predstavuje vnímanie a pochopenie vlastného tela. A teda na základe tohto faktu využívame samoorganizujúce sa mapy na zobrazenie takéhoto vnímania tak, že jednotlivé body na mape predstavujú rôzne časti tela a ich vzájomné vzťahy v priestore. Tréňovanie SOM je zamerané na vytvorenie priestorovej organizácie, ktorá odráža vnímanie jednotlivých častí tela a ich vzájomných vzťahov.

2.1.2 MRF SOM

2.2 Naše datasety

2.2.1 Dáta z robota iCub

2.2.2 Dáta z robota Nao

Kapitola 3

Experimenty

3.1 Experimenty so SOM

3.2 Experimenty s UBAL-om

Záver

Literatúra

- [1] Motor Homunculus | bartleby — bartleby.com. <https://www.bartleby.com/subject/science/biology/concepts/motor-homunculus#context-and-applicationse280afe280afe280af>. [Accessed 08-10-2023].
- [2] Robotcub. <http://www.robotcub.org/>. [Accessed 14-11-2023].
- [3] Swig. <https://www.swig.org/>. Accessed on [8.11.2023].
- [4] Yarp - yet another robot platform. <https://www.yarp.it/>. Accessed on [1.11.2023].
- [5] Nao. <https://www.aldebaran.com/en/nao>, 2022. [Accessed 06-12-2023].
- [6] Paul M Bays and Daniel M Wolpert. Computational principles of sensorimotor control that minimize uncertainty and variability. *The Journal of physiology*, 578(2):387–396, 2007.
- [7] Charles Bell. Xii. on the nervous circle which connects the voluntary muscles with the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, (116):163–173, 1826.
- [8] Lisa K. Chinn, Claire F. Noonan, Matej Hoffmann, and Jeffrey J. Lockman. Development of infant reaching strategies to tactile targets on the face. *Frontiers in Psychology*, 10, 2019.
- [9] G Mo Goodwin, DI McCloskey, and PBC Matthews. The contribution of muscle afferents to kinaesthesia shown by vibration induced illusions of movement and by the effects of paralysing joint afferents. *Brain*, 95(4):705–748, 1972.
- [10] David Gouaillier, Vincent Hugel, Pierre Blazevic, Chris Kilner, Jérôme Monceaux, Pascal Lafourcade, Brice Marnier, Julien Serre, and Bruno Maisonnier. Mechatronic design of nao humanoid. pages 769 – 774, 06 2009.
- [11] W. Harvey. *Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis. In: Animalibus*. Whitteridge G.. Oxford, 1976.

- [12] Henry Head and Gordon Holmes. Sensory disturbances from cerebral lesions. *Brain*, 34(2-3):102–254, 1911.
- [13] M. Hoffmann. *Learning Body Models: From Humans to Humanoids*. PhD thesis, Prague CZ, 2021.
- [14] M. Hoffmann, H. Marques, A. Arieta, H. Sumioka, M. Lungarella, and R. Pfeifer. Body schema in robotics: A review. *IEEE Trans. on Auton. Ment. Dev.*, 2(4):304–324, dec 2010.
- [15] M. Hoffmann, Z. Straka, I. Farkaš, M. Vavrečka, and G. Metta. Robotic homunculus: Learning of artificial skin representation in a humanoid robot motivated by primary somatosensory cortex. *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems*, 10:163–176, 2018.
- [16] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. D. Jessell, M. B. T. Jessell, S. Siegelbaum, and A. Hudspeth. *Principles of Neural Science, Fifth Edition*. McGraw-Hill Education, New York, NY, 2014.
- [17] Jinbiao Liu, Yixuan Sheng, and Honghai Liu. Corticomuscular coherence and its applications: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 13, 03 2019.
- [18] Augusto Loureiro da Costa, Diego Ferreira, Andre Scolari Conceicao, and George Pappas. Embedding the concurrent autonomous agent into a humanoid robot**this work was supported by capes (coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior, process number 9174-11-7), cnpq (conselho nacional de desenvolvimento científico e tecnológico) and fapesb (fundação de amparo à pesquisa do estado da bahia). *IFAC-PapersOnLine*, 48:203–208, 12 2015.
- [19] Kristína Malinovská, Igor Farkaš, Jana Harvanová, and Matej Hoffmann. A connectionist model of associating proprioceptive and tactile modalities in a humanoid robot. In *2022 IEEE International Conference on Development and Learning (ICDL)*, pages 336–342, 2022.
- [20] Giorgio Metta, Lorenzo Natale, Francesco Nori, Giulio Sandini, David Vernon, Luciano Fadiga, Claes von Hofsten, Kerstin Rosander, Manuel Lopes, José Santos-Victor, Alexandre Bernardino, and Luis Montesano. The icub humanoid robot: An open-systems platform for research in cognitive development. *Neural Networks*, 23(8):1125–1134, 2010. Social Cognition: From Babies to Robots.
- [21] Lorenzo Natale, Chiara Bartolozzi, Francesco Nori, Giulio Sandini, and Giorgio Metta. *iCub*, page 291–323. Springer Netherlands, October 2018.

- [22] MSc Olivia Guy-Evans. Somatosensory cortex function and location — simplypsychology.org. <https://www.simplypsychology.org/somatosensory-cortex.html#Homunculus-Map>, 2023. [Accessed 09-10-2023].
- [23] Seth Rogers Pat Langley, John E. Laird. Cognitive architectures: Research issues and challenges. *Cognitive Systems Research*, 2008. [Accessed 04-12-2023].
- [24] Uwe Proske and Simon C. Gandevia. The proprioceptive senses: Their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force. *Physiological Reviews*, 92(4):1651–1697, 2012. PMID: 23073629.
- [25] William David Ross, John Alexander Smith, et al. *The works of Aristotle*, volume 11. Clarendon Press, 1910.
- [26] Charles S Sherrington. On the proprioceptive system, especially in its reflex aspect. *Brain*, 29(4):467–482, 1907.
- [27] Eszter Somogyi, Mollie Hamilton, Lisa K. Chinn, Lisa Jacquey, Tobias Heed, Matej Hoffmann, Jeffrey J. Lockman, Jacqueline Fagard, and J. Kevin O’Regan. Tactile training facilitates infants’ ability to reach to targets on the body. *Child Development*, 94(3):e154–e165, 2023.