

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
DATORIKAS FAKULTĀTE

**ATDARINOŠĀS MAŠĪNMĀCĪŠANĀS PIELIETOJUMS
ROBOTIKĀ**

MAGISTRA DARBS

Autors: **Pēteris Račinskis**

Stud. apl. Nr. pr20015

Darba vadītājs: Dr. sc. comp. Modris Greitāns

RĪGA 2022

Saturs

IEVADS	3
Darba mērķis un struktūra	4
Terminoloģijas tulkojumi, apzīmējumi, saīsinājumi	4
Motivējošais uzdevums	5
1. VISPĀRĪGI TEORETISKIE PAMATI	7
1.1 Parametriski modeļi, šabloni	7
1.1.1 Neironu tīkli – vispārīgi	9
1.1.2 Laikrindu modelēšana, autoregresori, rekurentie neironu tīkli	9
1.2 Markova lēmumu procesi	10
1.3 Stimulētā mašīnmācīšanās	11
1.4 Robotikas teorētiskie pamati	12
1.4.1 Robota matemātiskais modelis – kinemātiska, kvaternioni	13
1.4.2 Trajektoriju plānošana	16
2. ATDARINOŠĀ MAŠĪNMĀCĪŠANĀS – PĀRSKATS	18
2.1 Labi definētu trajektoriju kopēšana	18
2.1.1 Vienkāršas metodes	19
2.1.2 Statistiskas korekcijas	21
2.1.3 Inversā stimulētā mācīšanās	22
2.1.4 Ģeneratīvie pretinieku tīkli	22
2.1.5 Uzdevumu simboliska dekompozīcija	23
2.2 Novērojumu iegūšana, interpretācija, papildināšana	24
2.2.1 Nezināmas darbības	24
2.2.2 Dinamikas novērojumu iegūšana, izmantošana, vispārināšana	25
2.2.3 Demonstrācijas no cilvēka darbībām	26
2.2.4 Video demonstrācijas, perspektīvu pārbīde	27
2.2.5 Datu sintēze, telpiski modeļi	27
2.3 Atdarināšana un adaptācija, vispārināšana	29
2.3.1 Neoptimālu demonstrāciju uzlabošana	29
2.3.2 Demonstrācija — sākumpunkts apmācību procesam	30
2.3.3 Tūlītēja trajektoriju atdarināšana	30
2.3.4 Nestukturētas demonstrācijas, plānu veidošana no galamērķiem	31
2.3.5 Ļoti lielu, vispārināmu laikrindu regresoru pielietošana	33
3. PRAKTISKĀ REALIZĀCIJA	35
3.1 Izmantotie rīki, aprīkojums un platformas	35
3.1.1 ROS	35
3.1.2 Optitrack – aprīkojums un programmatūra	35
3.1.3 Programmēšanas valoda, bibliotēkas	35
3.2 Izvēlētā pieeja	35

3.3	Datu priekšapstrāde	38
3.3.1	Ierakstu veikšana, sākuma datu kopas ieguve	38
3.3.2	Laika ass reparametrizācija	39
3.3.3	Atsevišķu demonstrāciju atdalīšana	39
3.3.4	Trajektoriju gludināšana	40
3.3.5	Kritisko punktu noteikšana un papildu signāli	41
3.3.6	Brīvā kritiena ekstrapolācija, mērķa koordināšu noteikšana	42
3.3.7	Sākuma koordināšu kompensācija	43
3.3.8	Apvienošana, stāvokļu pāreju veidošana, jaukšana	44
3.4	Modeļu realizācija	45
3.4.1	Parastais neironu tīkls	45
3.4.2	Rekurentais neironu tīkls	47
3.4.3	Tālāka darbība – GAN	48
3.5	Validācijas datu ģenerēšana, simulācija, vizualizācija	50
3.5.1	Modeļu pārbaude ar gadījuma sākuma stāvokļiem	50
3.5.2	Validācija – demonstrāciju un autoregresoru salīdzinājumi	52
3.5.3	Trajektoriju telpiska vizualizācija	52
3.6	Trajektoriju izpilde uz robota	54
3.6.1	Kā savietot modeli ar kontroleri?	54
3.6.2	Robota trajektorijas plānošana un izpilde	56
3.6.3	Asinhrona satvērējmehānisma vadība, ātrdarbība	57
4.	REZULTĀTU ANALĪZE	59
4.1	Novērtējumi, to aprēķins	59
4.1.1	Datu kopu tuvības mēri	59
4.1.2	Vidējās novirzes laika soļa ietvaros	60
4.1.3	Metiena parametru aplēšana	61
4.2	Sasniegtie rezultāti dažādām modeļu klasēm	63
4.3	Parastie neironu tīkli	64
4.4	Rekurentie neironu tīkli	66
SECINĀJUMI	69	
Svarīgākās atziņas	69	
Vieta tālākai darbībai	70	
Risinājums	70	
Magistra darba izstrādes plāns	70	
ATSAUCES	72	

IEVADS

Mašīnmācīšanās šobrīd tiek plaši uzskatīta par vienu no aktuālākajām datorzinātņu pētniecības nozarēm [14]. Pēdējās desmitgades laikā šī pētniecības lauciņa popularitāte ir daudzkarīt pieaugusi, pateicoties galvenokārt diviem faktoriem: ļoti vispārīgiem neironu tīklu modeļiem un skaitlošanas resursu veikspējai, kas beidzot ļāvusi šos, teorētiski jau ļoti sen [34, 30, 15] iedomātos, mākslīgā intelekta uzbūves elementus realizēt praksē. Tā risināti uzdevumi, ko izsenis daudzi uzskatījuši par neiespējamiem, un lietojuši kā argumentu pret mašīnmācīšanos kā rīku, kas spētu konkurēt ar bioloģiskas izcelsmes prātiem — semantiskas nozīmes meklēšana attēlos [28], tekstu korpusu analīze un ģenerēšana ar "izpratni" par to saturu [64] un visspējīgāko spēlētāju pārspēšana nepilnīgas informācijas spēlēs ar neaptverami milzīgiem iespējamo stāvokļu permutāciju skaitem [53].

Nav arī īpaši grūti atrast vēsturisko saikni starp mākslīgo intelektu un robotiku. Tautas iztēlē termins "robots" drīzāk droši vien iezīmēs zinātniskās fantastikas radītos personāžus — mehāniskas būtnes, kas spēj patstāvīgi darboties neierobežotā vidē un risināt sarežģītus uzdevumus — nevis pieticīgākus, reāli pastāvošus un ražotnēs rodamus industriālos robotus. Un šī pati zinātniskā fantastika radījusi arī nesaraujamu saiti starp robotiem un mākslīgo intelektu [3] — diskusijas par mākslīgo intelektu bieži plūstoši pāriet diskusijās par ar šādu intelektu aprīkotiem robotiem, un šo robotu neizbēgami kareivīgajām ambīcijām attiecībā pret cilvēci. Protams, zinātne ne vienmēr seko populārzinātniskās iedomas lidojumam, taču šāda saikne ir visnotaļ pamatota — spēja mācīties no paraugiem vai patstāvīgi un pielāgoties savai apkārtnei ir ārkārtīgi noderīga, jo daudzi uzdevumi, kuru risināšanai varētu pielietot robotus, ir sarežģīti nevis to fizikālajā izpildē, bet tiesi vadības uzdevuma formulēšanā un realizācijā — lai to redzētu pietiek vien aplūkot kādu nejauši izvēlētu sarakstu ar robotikā aktuālām problēmām [10].

Atdarinošā mašīnmācīšanās (*imitation learning*) ir viens no paņēmieniem, ar kuriem tiek mēģināts risināt šādas sarežģītas vadības problēmas. Lai gan pamatu pamatos nevar apgalvot, ka tā ir tikai robotikai piemērota metožu saime, lielākā daļa izpētes virzīta tieši šajā virzienā — problēmas tiek formulētas kā fizikālu (vai nosacīti fizikālu — virtuālās vidēs simulētu) procesu kontroles uzdevumi, un risinājumi tiek rasti no pēc iespējas mazāka skaita veiksmīgas darbības piemēru [4]. Mašīnmācīšanās nozarē bioloģiskas analogijas un iedvesma nav nekāds retums, un savā ziņā šāda mācīšanās atspoguļo vienu no izplatītiem paņēmieniem, kā cilvēki vai sabiedriski dzīvnieki nodod prasmes viens otram - demonstrējot. Nevar nepieminēt, ka izpēte šajā jomā bieži aizņemas pieejas un iespaidojas no rezultātiem, kas gūti ar stimulēto mašīnmācīšanos (*reinforcement learning*) - savā ziņā vispārīgu, pašmācībai un treniņam analogisku paņēmieni. Arī abu metožu apvienojums ir ideja, kas pavīd visai regulāri — cerībā, ka, attarinot eksperthus, var ātrāk nonākt pie derīgām stratēģijām, kas var kalpot kā sākumpunkts dzīlākai pašmācībai [23]; vai arī izmantot šādu stimulēto metodi, lai precīzāk imitētu treniņa datus [1].

Darba mērķis un struktūra

Kopējā magistra darba tēma izvēlēta ar Elektronikas un datorzinātņu centra ekspertu palīdzību, meklējot šobrīd aktuālu pētniecības virzienu. Izvērtējot dažādus pieejamos variantus, izvēlēts pētniecības virziens — attdarinošā mašīnmācīšanās — un konkrēts motivējošais uzdevums — atkritumu šķirošanas līnijas robots, kas spēj nogādāt pudeles vai citus objektus tiem atbilstošajās tvertnēs, izmantojot mešanas kustības. Faktiski līdz šim galvenokārt veikta nozares literatūras avotu izpēte un nepieciešamo pamatzināšanu apguve. Līdz ar to šī darba mērķis ir noskaidrot, vai attdarinošās mācīšanās metodes ir piemērotas motivējošās problēmas risināšanai, atrast piemērotākos paņēmienus un aktuālākos rezultātus jau eksistējošajā zinātniskās literatūras korpusā un ieskicēt risinājuma plānu, kura praktiska izpilde un novērtēšana tad arī veidotu noslēguma darba pētniecisko jaunpienesumu. Attiecīgi, kursadarbs sastāv no trijām daļām:

- 1) ievada, kurā īsi izklāstīti vispārīgi jēdzieni, kas nepieciešami, lai izprastu zinātnisko literatūru nozarē, kā arī aprakstīts motivējošais uzdevums;
- 2) literatūras analīzes, kur izdalīti daži galvenie pētnieciskās darbības virzieni nozarē, aplūkoti konkrēti algoritmi un pētījumi kā piemēri;
- 3) secinājumiem, kur literatūras analīzē gūtās atziņas īsi apkopotas un izmantotas, lai piedāvātu provizorisku formu motivējošā uzdevuma risinājumam.

Terminoloģijas tulkojumi, apzīmējumi, saīsinājumi

Viena no īpatnībām, ar ko ir nācies saskarties, strādājot tieši ar mašīnmācīšanās nozari, ir nepārprotamas terminoloģijas trūkums latviešu valodā. Pati zinātnes nozare, lai arī nebūt ne tik jauna kopumā, piedzīvojusi milzīgas izmaiņas un nepieredzētu uzplaukumu pēdējās desmitgades laikā. Protams, datorzinātnes laukā pirmā un galvenā saziņas valoda ir angļu. Attiecīgi novērojami divejādi un saistīti fenomeni - publikācijas un terminoloģija, kas radītas senāk, veidojušas dziļi specifisku nišu, kas nav iedvesmojusi daudz mēginājumu tulkot to uz citām valodām, savukārt uzplaukuma laikos vēl ir ļoti daudz materiāla, ko vienkārši neviens nav paguvis iztulkot.

Patvalīgi izvēloties tulkojumu, pastāv risks mulsināt lasītāju un sadrumstalot jau tā nelielo literatūras kopu dažādu atslēgas vārdu izvēles rezultātā. Kur vien iespējams, ieteicams izmantot oficiālā terminu datubāzē pieejamus tulkojumus, taču ne vienmēr tādi ir pieejami. Tāpēc šeit izveidots saraksts ar potenciāli mulsinoši tulkoto terminologiju tās originālajā formulējumā angļu valodā, izvēlētajiem tulkojumiem un īsiem pamatojumiem.

- 1) **policy — stratēģija.** Šis termins pamatā tiek lietots, lai aprakstītu kādu funkciju, kas novērojumus attēlo lēmumu telpā. Pirmais ieraksts tieši tāpēc, ka varētu būt strīdīgākais. Angļu valodā pastāv divi termini, *policy* un *politics*, kas parasti latviski tiek tulkoti vienādi — politika — par spīti radikāli atšķirīgām nozīmēm. Terms *strategy* tiek lietots kā sinonīms pirmajam abās valodās, un arī piemērojams tieši šādām lēmumu pieņemšanas funkcijām, piemēram, spēļu teorijā.
- 2) **reinforcement learning — stimulētā mašīnmācīšanās.** Meklējumi tiešsaistē atklāj

[44], ka šis tulkojums jau ir apstiprināts standartā, taču varētu būt nezināms lasītājiem, kas ar to sastopas pirmo reizi — pat ja zināms metodes anglikais nosaukums.

- 3) *imitation learning* — **atdarinošā mašīnmācīšanās**. Paša autora piedāvāts tulkojums, izmantojot iepriekšējo kā piemēru, jo nav izdevies atrast alternatīvas. Latviskais vārds ”atdarināt” izvēlēts pār internacionālismu ”imitēt”, jo to vieglāk izlocīt formā, kas neizklausās lauzīta un neveikla. Taču procesā zūd spēja viegli atrast sākotnējo vārdu svešvalodā, kas ļoti svarīga zinātniskajā vidē, kurā latviski pieejamo resursu ir maz.
- 4) *reward function* — **atalgojuma funkcija**. Oficiālā terminu datubāzē tulkojuma šim terminam nav. Tuvākie tulkojumi lietojumam, ar kādu šis termins parasti sastopams tekstos angļu valodā, būtu ”lietderība” vai ”atdeve”, taču ”atalgojums” labi ietver sevī faktu, ka šo funkciju paredzēts maksimizēt.
- 5) *generative adversarial network* — **ģeneratīvie pretinieku tīkli**. Šim terminam arī pastāv vairāki konkurējoši tulkojumi, un terminu datubāzē skaidru atbildi nevar rast. Taču ir atrodams jau 2019. gadā sagatavotais kolēges Lianas Blumbergas kursa darba plakāts, kur šis tulkojums ir lietots [7], tāpēc tas pats tiks lietots arī šeit.

Tekstā var bez paskaidrojuma tikt izmantoti šādi saīsinājumi:

- 1) RL — stimulētā mašīnmācīšanās (*Reinforcement Learning*)
- 2) IRL — inversā stimulētā mašīnmācīšanās (*Inverse Reinforcement Learning*)
- 3) GAN — ģeneratīvais pretinieku tīklis (*Generative Adversarial Network*)
- 4) VR — virtuālā realitāte
- 5) MDP — Markova lēmumu process (*Markov Decision Process*)
- 6) EDI — Elektronikas un datorzinātņu institūts
- 7) LIDAR — attāluma lāzermērišana

Biežāk izmantoti matemātiskie apzīmējumi:

- 1) π, π_θ, π^* — stratēģija, stratēģija ar parametriem θ , instruktora stratēģija
- 2) s — sistēmas stāvoklis vai tiešais novērojums
- 3) s_t, s' — s laika solī t , nākamais s
- 4) a, a_t — darbība, darbība laika solī t
- 5) o_t — netiešais novērojums
- 6) trajektorija — laikrinda ar elementiem $s_t, o_t, (s_t, a_t)$ vai (o_t, a_t) , ja nav norādīts
- 7) $R(s), R(s, a)$ — atalgojuma funkcija
- 8) θ, ϕ, ψ — modeļu parametru vektori
- 9) \mathbb{E} — matemātiskā cerība

Motivējošais uzdevums

Nevarētu apgalvot, ka atdarinošā mašīnmācīšanās kā tēma šim kursa darbam un magistra darbam kopumā tikusi izvēlēta tīri inženiertehniskā procesa rezultātā — sākot ar problēmas definīciju un nonākot pie tai piemērotākā risinājuma, pārbaudot un atsīojot visas iespējamās pieejas, priekšlaicīgi neieguldot pārāk daudz pūļu un resursu

kādas konkrētas metodes pielietošanā. Daļēji orientē vēlme — gan no EDI, gan autora puses — izzināt jaunas kompetences un likt pamatu tālākiem pētījumiem. Tomēr vienu šobrīd aktuālu praktisku problēmu, kas šķiet piemērota tieši atdarinošās mašīnmācīšanās metodēm, var izteikt kā motivējošu uzdevumu. Bruņojoties ar šādu konkrētu mērķi, nozares literatūras pārskatu un teorētisko zināšanu apguvi iespējams strukturēt un prioritizēt.

Situāciju var aprakstīt sekojoši. Atkritumu šķirošanas līnijas ir cilvēkam nedraudzīga un nepatīkama darba vide. Šobrīd tiek aktīvi meklēti veidi, kā palielināt to automātizācijas pakāpi — gan izmaksu samazināšanas, gan darba drošības nolūkos [55]. Konkrēti aplūkojot plastmasas iepakojumu šķirošanu, jau izstrādātas metodes to klasifikācijai un satveršanai [55]. Viens no virzieniem, kurā varētu pilnveidot šo un citādu robustu, neregulāras formas objektu *pick-and-place* uzdevumu risinājumus, ir metienu iestrādāšana trajektorijās. Ja pārvietojamais objekts ir noturīgs pret trieciena slodzēm vai tā stāvoklis nav svarīgs, un tā masa salīdzinot ar robota pašmasu ir neliela, potenciāli iespējams ievērojami paātrināt satveršanas un pārvietošanas ciklu laikus, jo nav nepieciešams visu robotu pārvietot līdz galamērķim. Turklat paveras iespējas tieši šķirošanas uzdevumos, jo iespējams telpā brīvāk izvietot tvertnes, uz kurām objekti jānogādā — metiens var nogādāt objektu tālāk, nekā maksimāli izstiepies robots. Protams, mēginot manuāli programmēt katru metienu rodas virkne problēmu — dažādi trajektoriju sākumpunkti, dažādi galamērķi un to iespējamā mainība, objektu neregularitāte, u.c. Tāpēc analītisku risinājumu atrast varētu būt ļoti nepraktiski, un tiek apsvērts mašīnmācīšanās metožu lietojums.

Attiecīgi var uzskaitīt šādus nosacījumus uzdevumam:

- 1) var pieņemt, ka sākuma stāvoklī robots jau ir satvēris objektu, ja nepieciešams;
- 2) trajektorijas sākumpunkti ir mainīgi — jāspēj izdarīt metiens no dažādām pozīcijām;
- 3) ir zināma objekta klasifikācija un līdz ar to — tā vēlamais galamērķis;
- 4) vēlamie galamērķi var būt dažādi un mainīgi;
- 5) rezultējošo modeli jāspēj pielāgot apstākļiem darba vidē bez pārlieku darbietilpīgas un dārgas treniņa procedūras.

Nav grūti redzēt, ka šādam uzdevumam par atalgojuma kritēriju pieņemot trāpīšanu pareizajā tvertnē, funkcijas vērtības būs ļoti retinātas, kas apgrūtina klasisko stimulētās metožu pielietojumu. Nākamās nodaļas ietvaros tiek veikts vispārīgs atdarinošās mašīnmācīšanās metožu pētniecības pārskats, paturot prātā izvēlētā uzdevuma specifiku — pievēršot uzmanību tiem rezultātiem un secinājumiem, kas varētu būt nozīmīgi problēmas risināšanā. Noslēgumā tiek izdarīti secinājumi par to, kuras citur gūtās atziņas ir svarīgākās, un piedāvāts rīcības plāns motivējošā uzdevuma izpildei.

1. VISPĀRĪGI TEORĒTISKIE PAMATI

Pētot un veidojot spriedumus par zinātnisko literatūru viens no lielākajiem šķēršļiem lasītājam “no malas” ir katrā nozarē pieņemtais tehnisko priekšzināšanu kopums, ko autori sagaida no auditorijas. Tas, protams, ir logiski, jo publikācija, kas apraksta jaunākos atklājumus kādā dzīļi specifiskā lauciņā, nevar veltīt visu sev atvēlēto drukas apjomu elementāras un vispārzināmas terminoloģijas skaidrojumiem. Tāpat, tālāk atskaitē iztirzājot šos rakstus, noderīgi ir ieviest tiem kopīgus apzīmējumus un definēt visus vienuviet. Tāpēc šajā nodaļā tiek īsi aprakstīti jēdzieni, kas jāizprot, lai varētu veikt literatūras analīzi un izdarīt secinājumus.

1.1. Parametriski modeļi, šabloni

Viens no visplašāk izmantotajiem formālismiem datizraces un mašīnmācīšanās laukos ir parametriskais modelis. Pamatā tam ir ideja, ka nezināmu funkciju, kuras rezultātus vēlamies paredzēt, var aproksimēt ar citu funkciju jeb modeli:

$$M(x) \approx f(x) \quad (1.1)$$

Protams, šādu modeļu varētu būt bezgalīgi daudz, un tie visi var atšķirties pēc tā, cik labi spēj paredzēt nezināmās funkcijas vērtības. Tāpēc modeļu meklēšanai parasti izmanto šablonus - funkcijas, kuru argumentā papildus ievades datiem ir brīvi maināmi un kopīgi (tātad ”apmācāmi”) parametri θ :

$$\text{Meklē } \theta : M(x|\theta) = M_\theta(x) \approx f(x) \quad (1.2)$$

Iegūtā šablona funkcijas un apmācīto parametru kombinācija $\{M, \theta\}$ tad veido konkrētu modeli. Labs šablonis ir tāds, kas spēj pielāgoties ļoti daudzām dažādām funkcijām:

$$\forall f \forall x \exists \theta : M_\theta(x) \approx f(x) \quad (1.3)$$

Atkarībā no uzdevuma specifikas, izplatīti modeļi mēdz būt regresori, kas aproksimē funkcijas ar k -dimensionālām reālām (vai citādi skaitliskām) vērtībām,

$$f : x \rightarrow \mathbb{R}^k \quad (1.4)$$

$$M : x \times \theta \rightarrow \mathbb{R}^k \quad (1.5)$$

un klasifikatori, kas paredz ievades datu punkta piederību kādai diskrētai klasei

$$f : x \rightarrow C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\} \quad (1.6)$$

$$M : x \times \theta \rightarrow C \quad (1.7)$$

Bieži vien noderīgi ir ne tikai spēt attēlot datu punktu kā diskrētu klasi, bet iegūt varbūtību sadalījumu, kas apraksta tā iespējamību piederēt jebkurai no klasēm:

$$M : x \times \theta \times c_i \rightarrow [0; 1] \quad (1.8)$$

$$M_\theta(x, c_i) = P_i \quad (1.9)$$

$$\sum_{i=1}^m P_i = 1 \quad (1.10)$$

Lai varētu novērtēt, cik labi modelis aproksimē nezināmo funkciju, un vadīt parametru apmācības procesu, tiek izmantotas mērķa funkcijas (*loss functions*) [2]:

$$\ell : M_\theta(x) \times f(x) \rightarrow \mathbb{R} \quad (1.11)$$

Strādājot ar reāliem datiem, datu punkti veido datu kopu, kas parasti tiek uzskatīta par gadījuma izlasi no punktus ģenerējošā varbūtību sadalījuma. Praktiskiem apmācības uzdevumiem datu kopa parasti jāiegūst formā, kas satur gan sagaidāmos ievades datus, gan pareizu rezultātu:

$$s \sim \mathcal{D} \Leftrightarrow s \text{ ir no varbūtību sadalījuma } \mathcal{D} \quad (1.12)$$

$$y_i = f(x_i) \quad (1.13)$$

$$s_i = (x_i, y_i) \quad (1.14)$$

$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n | s_i \sim \mathcal{D}\} \quad (1.15)$$

Datu kopai var aprēķināt empīrisku mērķa funkcijas novērtējumu,

$$L_S(\theta) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ell(M_\theta(x_i), y_i) \quad (1.16)$$

bet apmācības process parasti kādā veidā tiecas minimizēt šīs vērtības matemātisko cerību ģenerējošam sadalījumam (nevis tikai pašai datu kopai - ja modelis ļoti cieši pielāgots konkrētai datu izlasei bet zaudē precizitāti sadalījumam kopumā, to sauc par pārpielāgošanos — *overfitting*)

$$L_{\mathcal{D}}(\theta) = \mathbb{E}_{\mathcal{D}}[\ell(M_\theta(x_i), y_i)] \quad (1.17)$$

$$\text{Apmāca } M_\theta \text{ uz } \mathcal{D} \rightarrow \text{Minimizē } L_{\mathcal{D}}(\theta) \quad (1.18)$$

Ja modelis ir stratēģija (*policy*), stimulētās vai atdarinošās mašīnmācīšanās literatūrā to ļoti bieži izsaka kā $\pi_\theta(x)$. Mazliet mulsinoš ir tieši ar imitējošām metodēm saistītos rakstos lietotais apzīmējums π^* , ar ko apzīmē t.s. “ekspertu stratēģijas” — kas pašas ir nezināmās funkcijas, ko cenšamies aproksimēt pēc to ģenerēto punktu kopām.

1.1.1. Neironu tīkli – vispārīgi

Neironu tīkli ir izplatīta modeļu šablonu saime, ko var izmantot dažādas formas funkciju aproksimēšanai — tie var būt gan klasifikatori, gan regresori. Neironu tīklu kopīgais elements ir t.s. perceptorns, kas izteikts jau pašos pirmsākumos [34]. Perceptrons funkcija, kas piemēro nelineāru aktviācijas funkciju σ argumentu vektora \vec{x} elementu savstarpējai lineārai kombinācijai, t.i,

$$f_{\text{perceptron}}(\vec{x}) = \sigma(\vec{w} \cdot \vec{x} + b) \quad (1.19)$$

kur \vec{w} ir t.s. svaru vektors, bet b — nobīde. Perceptrona parametri tātad ir brīvie mainīgie \vec{w} un b . Neironu tīkls parasti sastāv no slāņiem — perceptronu f_i kopām, kas visi apstrādā to pašu argumentu vektoru, bet katrs ar saviem parametriem \vec{w}_i, b_i . Tad slāni algebriski izsaka formā

$$W = \begin{bmatrix} w_1^T \\ w_2^T \\ \dots \\ w_k^T \end{bmatrix}; \vec{b} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_k \end{bmatrix}; \quad (1.20)$$

$$f_{\text{layer}}(\vec{x}) = \sigma(W\vec{x} + \vec{b}) \quad (1.21)$$

Ja slānis tīklā ir pēdējais un tā vērtības ir modeļa izvadē, to sauc par izvades (*output*) slāni. Ievades datu vektoru sauc par ievades (*input*) slāni. Pārējos slāņus sauc par slēptajiem (*hidden layers*). Saka, ka slāņi savā starpā pilnīgi savienoti (*fully connected*), ja katram viena slāņa perceptronam argumentā parādās visi iepriekšējā slāņa izvades elementi. Svarīga neironu tīkla īpašība — ja tā aktivācijas funkcijas ir diferencējamas, tad arī tīkls kopumā ir diferencējams pēc katras tā parametra, pat ar perceptroniem daudzos slāņos. Līdz ar to var izmantot atpakaļizplatīšanas algoritmu, kas atrod mērķa funkcijas parciālos atvasinājumus pēc modeļa parametriem un izmanto kādu gradientu optimizācijas metodi apmācībai.

Pastāv dažādas šo tīklu arhitektūras. Vienkāršākās sastāv no viena vai vairākiem slāņiem (neskaitot ievades slāni), taču ir plaši izplatīti arī, piemēram, konvolūciju neironu tīkli [28], ko izmanto attēlu apstrādē, tai skaitā šajā atskaitē aplūkotajos pētījumos, kur nepieciešams gūt informāciju no video datiem. Galvenā atšķirība konvolūcijā tīklā ir kodolu (*kernel*) izmantošana - konvolūciju slāņi vienā līmenī piemēro identiskas perceptrona funkcijas nelieliem iepriekšējā slāņa (matricas vai tenszora formā) reģioniem. Tas palīdz identificēt dažādas lokālas struktūras, piemēram, attēlā.

1.1.2. Laikrindu modelēšana, autoregresori, rekurentie neironu tīkli

Ja modelējamā parādība vai datu kopa izsakāma formā

$$(x_1, x_2, \dots) \quad (1.22)$$

kur starp punktiem pastāv izteikta secības sakarība — piemēram, tie ir novērojumi laikā vai simboli teksta korpusā — šādam fenomenam var piemērot t.s. laikrindu datu

kopu analīzes metodes [67]. Šī darba ietvaros plaši tiek izmantots autoregresora jēdziens [54]. Principā ar šo terminu var apzīmēt jebkuru laikrindu regresijas metodi, kas balstīta uz pieņēmumu, ka nākotnes vērtības var modelēt kā funkciju no pagātnes vērtībām vai kādas to apakškopas, t.i.

$$x_t = \pi_\theta(x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_1) \quad (1.23)$$

turklāt šo procesu var atkārtot ar paša modeļa ģenerētiem rezultātiem

$$x_{t+m} = \pi_\theta(x_{t+m-1}, x_{t+m-2}, \dots, x_1) \quad (1.24)$$

kur $x_t = \pi_\theta(x_{t-1}, x_{t-2}, \dots, x_1)$, $x_{t+1} = \pi_\theta(x_t, x_{t-1}, \dots, x_1)$ u.t.t. Autoregresoru modeļus šādi var izmantot laikrindu generēšanā, izmantojot zināmu sākuma stāvokli vai sākuma stāvokļu virkni. Principā ir iespējams jebkuru modeli ar pietiekami lielas dimensijas datu izvadu izmantot kā autoregresoru-ģeneratoru – ja tas ir formā

$$\pi_\theta : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, m \geq n \quad (1.25)$$

tad šī darba ietvaros tiek sacīts, ka “modelis lietots autoregresijā”, ja iegūta sekojošās formas datu virkne

$$(s_1, \pi_\theta(s_1), \pi_\theta(\pi_\theta(s_1)), \dots) \quad (1.26)$$

1.2. Markova lēmumu procesi

Pastāv dažādi formālismi procesu definēšanai vadības sistēmu izstrādes mērķiem, lai ar tiem varētu veikt matemātiskas operācijas. Izplatīti atdarinošās un stimulētās mašīnmācīšanās literatūrā ir Markova lēmumu procesi (MDP — *Markov decision processes*). Šis formālisms ir piemērojams situācijām, kurās, lai paredzētu procesa atribūtu vērtības pēc laika soļa t , netiek izmantota nekāda informācija par to vērtībām pagātnē — laika solos $t' < t$. Dažādi autori, kas darbojas dažādos izpētes virzienos, mēdz piedāvāt atšķirīgus tā formulējumus, taču parasti tie ir ekvivalenti sekojošam [4]

$$MDP = (S, A, R, T, \gamma) \quad (1.27)$$

kur S — sistēmas iespējamo stāvokļu s kopa; A — kontrolētajam procesam (“āgentam”) pieejamo darbību a kopa; $R : S \times A \rightarrow \mathbb{R}$ vai $R : S \rightarrow \mathbb{R}$ — atalgojuma (*reward*) funkcija, kas ļauj kārtot sasniegtos stāvokļus pēc to lietderības; $T : S \times A \rightarrow S$ vai $P(s' \in S)$ — pārejas (*transition*) funkcija, kas nosaka nākamo stāvokli s' vai tam atbilstošu varbūtību sadalījumu, ja pie iepriekšējā stāvokļa s izvēlēta darbība a ; γ — koeficients nākotnes atalgojumu vērtību samazināšanai. MDP ir *galīgs* ja S, A ir galīgas kopas. Ja $s' = T(s, a)$ ir determinēts, MDP ir *determinēts*. Ja s' ir gadījuma lielums, kas pieder sadalījumam $P(s') = T(s, a)$, MDP ir *stohastisks*.

Atdarinošās mašīnmācīšanās metodēm ne vienmēr ir nepieciešams definēt atalgojuma funkciju un attiecīgi arī γ , taču tie ir nepieciešami metodēm, kas lieto stimulēto

mašīn-mācīšanos. Tā kā parasti spriests tiek par stratēģijām π_θ , kas izvēlas nākamo darbību a atkarībā no sistēmas stāvokļa s , tad bieži vien faktiskā pārejas funkcija ir formā $P(s') = T(s, \pi_\theta(s), s')$, t.i., pārejas funkcija apraksta “vides” (*environment*) reakciju uz aģenta (modela, stratēģijas) darbību. Pie sākotnējo stāvokļu kopas S_0 un stratēģijas π var spriest par stratēģijas inducēto stāvokļu sadalījumu $s_t \sim P(S|S_0, \pi)$ — tas nosaka, kādas trajektorijas vispār ir iespējamas pie šādiem nosacījumiem.

Faktiski gandrīz nekad nav pieejams vides momentānā stāvokļa pilns raksturojums. Tā vietā zināma ir kāda to aprakstošu atribūtu apakškopa — novērojums $o_t = g(s_t)$. Gadījumos, kad šie novērojumi veido vadības algoritma vajadzībām pietiekami precīzu un tieši pielāgojamu stāvokļa aprakstu, nekādi papildu formālismi nav nepieciešami — tos var saukt par *tiešiem novērojumiem* un uztvert kā ekvivalentus stāvoklim s_t . Ja nepieciešami papildu soļi, lai no novērojuma iegūtu vadības algoritmam derīgu stāvokļa raksturojumu, tos sauc par *netiešiem novērojumiem*.

Trajektoriju caur sistēmas stāvokļu (konfigurāciju) telpu, kādai process seko ar laika soļiem $t = \{1, 2, \dots, T\}$, var izteikt kā laikrindu formā, kas sastāv no *state-action* pāriem — $((s_1, a_1), (s_2, a_2), \dots, (s_T, a_T))$. Ja šī laikrinda tiek izmantota kā paraugs treniņa procesā, to var saukt par demonstrāciju. Stāvokļus tajā, protams, iespējams aizstāt ar novērojumiem situācijās, kad tiek izmantota nepilnīga informācija. Ne vienmēr vēlams vai iespējams modelēt sistēmu ar MDP. Ir iespējami gadījumi, kad pārejas funkcija vai stratēģija ir atkarīga no laika soļa, t.i., $T(s, a|t), \pi(s, a|t)$. Var būt arī tā, ka ar novērojumiem nepietiek lēmuma pieņemšanai un nepieciešams ņemt vērā iepriekšējo stāvokļu un darbību virkni, lai pareizi spriestu par slēptiem stāvokļa atribūtiem.

1.3. Stimulētā mašīnmācīšanās

Stimulētā mašīnmācīšanās ir pati par sevi ļoti aktuāla izpētes nozare, un nereti nodarbojas ar to pašu vai līdzīgu uzdevumu risināšanu kā atdarinošā. Pastāv ne tikai kombinēti paņēmieni [17, 9], bet arī atdarināšanas metodes, kas tiešā veidā izmanto stimu-lēto mācīšanos, lai atdarinātu trajektoriju demonstrācijas [13]. Tāpēc nav nekāds pārsteigums, ka šis termins visnotaļ bieži parādās ar atdarinošo mašīnmācīšanos saistītos pētījumos, citreiz bez nekādiem papildus paskaidrojumiem.

Stimulētās mašīnmācīšanās teorētiskie pamati ir galīgi MDP un Belmana vienādojums [56]. Pienem, ka katram stāvoklim ir kāds atalgojums $R(s_t)$, bet uzdevums — maksimizēt šo atalgojumu summu visā trajektorijas garumā $\sum_{t=1}^T R(s_t)$. Tad var izteikt arī varbūtību sadalījumu atalgojumam katram stāvokļa un darbības pārim

$$p(s', r|s_t, a_t) = P[s_{t+1} = s', r = R(s')] \quad (1.28)$$

Nākotnē sagaidāmās atalgojuma vērtības, ņemot vērā dilšanas koeficientu γ , var izteikt kā

$$G_t = \sum_{k=0}^{T-t} \gamma^k R(s_{t+k+1}) \quad (1.29)$$

Jebkura stratēģija katram stāvoklim nosaka darbību vai darbību sadalījumu $p(a|s) = \pi(a, s)$. Var izmantot rekursīvu sakarību, lai katram stāvoklim piekārtotu sagaidāmo atalgojumu jeb vērtību $v_\pi(s)$, kas atkarīga no izmantotās stratēģijas — Belmana vienādojumu.

$$v_\pi(s) = \mathbb{E}_\pi[G_t | s_t = s] = \sum_a \pi(a, s) \sum_{s', r} p(s', r | s_t, a_t) [r + \gamma v_\pi(s')] \quad (1.30)$$

Atrisināt mācīšanās uzdevumu tādā gadījumā nozīmē atrast stratēģiju, kas maksimizē atalgojumu. Pastāv dažādas metodes, kā to darīt. Kā ilustratīvu piemēru var minēt Q-mācīšanās algoritmu. Tā strādā samērā vienkārši — tiek izveidots tensors Q ar elementu, kas atbilst katrai iespējamai (s, a) vērtībai, tam tiek piešķirta kāda sākotnējā vērtība (piemēram, 0).

Apmācība notiek, izvēloties

$$a_t = \underset{a}{\operatorname{argmax}} Q(s_t = s, a) \quad (1.31)$$

un sasniedzot trajektorijas beigas — vai nu pēc noteikta soļu skaita T , vai arī kāda pārtraukšanas nosacījuma. Tad iegūtajai trajektorijai $(s_1, a_1), (s_2, a_2), \dots, (s_T, a_T)$ no beigām aprēķinot G_1, G_2, \dots, G_T atbilstoši katram solim var korigēt vērtības tenzorā, kur Q^i apzīmē tenzora vērtības i-tajā treniņa solī

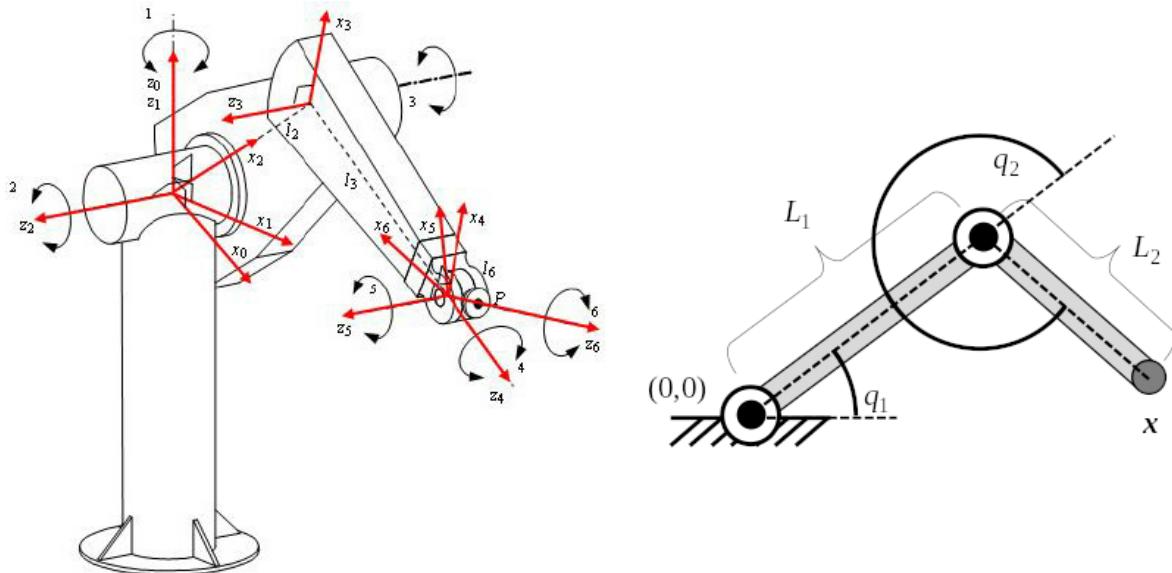
$$Q^{i+1}(s_t, a_t) = f(Q^i(s_t, a_t), G_t) \quad (1.32)$$

Kaut gan šai metodei ir teorētiskas konvergences garantijas pēc pietiekama iterāciju skaita, ļoti strauji pieaug tās modeļa — tenzora Q — parametru skaits, pieaugot iespējamo stāvokļu un darbību skaitam — nepieciešams atsevišķi optimizēt katru iespējamo kombināciju, iespējams, ļoti daudzās iterācijās. Tāpēc praksē parasti tiek lietoti modeļi, kas aproksimē $v_\pi(s)$, piemēram, aģenta-kritiķa (*actor-critic*) neironu tīkli, kas reizē iemācās paredzēt gan sagaidāmo vērtību, gan labāko darbību katram stāvoklim ar potenciāli daudz kompaktāku modeli.

Lai uzdevumu varētu risināt, nepieciešams spēt izteikt kādu analītisku funkciju, kas apraksta pašreizējā stāvokļa lietderību — izšķir labus rezultātus no sliktiem, vai starpstāvokļiem. Robotikā var būt sarežģīti šādu funkciju izdomāt, turklāt tā var būt ļoti retināta stāvokļu-darbību telpā, t.i., tikai ļoti nelielam skaitam (vai ar ļoti nelielu varbūtību) sasniegto stāvokļu atalgojuma funkcija $R(s_t)$ pieņem nenuelles vērtību. Tieši šādu trūkumu mēģina risināt metodes, kas kombinē ekspertu demonstrāciju aproksimēšanu ar adaptīvu pielāgošanos [36]

1.4. Robotikas teorētiskie pamati

Pirms iespējams padziļināti analizēt ar robotu kontroli saistītu zinātnisko literatūru vai patstāvīgi izstrādāt programmatūru to vadībai, nepieciešams iepazīties ar matemātiskajiem formālismiem, kas izmantoti šajā nozarē. Kā jebkurā citā briedumu sasniegūšā



Att. 1: Pa kreisi – tipiska 6-brīvības pakāpju industriālā robotha shematisks attēls ar kinemātiskās lēdes elementiem – sešiem rotācijas pāriem jeb locītavām, kam katrai ir viena brīvības pakāpe [18]. Pa labi – apzīmējumi kinemātiskajā lēdē ar rotācijas pāriem un fiksētām nobīdēm [20].

inženierzinātņu laukā, pastāv virkne vairāk vai mazāk standartizētu paņēmienu, kā izpaust un risināt dažādas problēmas. Svarīgi izprast ģeometriskās un algebriskās konvencijas robotu stāvokļa aprakstam un kā tās tiek izmantotas praktisku uzdevumu izpildē.

1.4.1. Robota matemātiskais modelis – kinemātiska, kvaternioni

Robotu mehāniskie izpildījumi var būt ļoti dažādi, taču kopīga ir matemātisko modeļu saime, kas tiek izmantoti, lai attēlotu to izpildmehānismu tiesā veidā nomērāmos stāvokļus – locītavu leņķus, bīdes pāru lineāros pārvietojumus – telpiskajā (Dekarta) koordināšu telpā un otrādi. Tos dēvē par kinemātiskajām lēdēm [20]. Kinemātiskā lēde sastāv no savienojumu virknes, kas katrs ietver kinemātisko pāri un nobīdi. Katrs kinemātiskais pāris pieļauj kādu mainīgu cietķermenē ģeometrisko pārveidojumu – rotāciju un pārvietojumu – kombināciju. Nobīde definē saiti starp diviem kinemātiskiem pāriem. Piemēram, ja divas rotācijas asis ir savienotas ar robotha rokas segmentu, to attālums veido fiksētu telpisku pārveidojumu. Katram kinemātiskā pāra veidam ir t.s. brīvības pakāpju skaits, kas nosaka to, cik dimensiju vektors ir nepieciešams, lai viennozīmīgi aprakstītu šī pāra konfigurāciju.

Atkarībā no mehānisma uzbūves kinemātiskās lēdes var būt atvērtas (ar vienu fiksētu punktu) vai slēgtas (ar diviem); virknē (katrs nākamais kinemātiskais pāris savienots ar iepriekšējā pārveidotu koordinātu sistēmu) vai paralēlas (vairāki pāri savienoti ar vienu elementu un to stāvokļi ir savstarpēji neatkarīgi). Par kinemātiskās lēdes konfigurāciju var saukt vektoru, kas apraksta visu kinemātisko pāru individuālās konfigurācijas – rotācijas pāru jeb locītavu gadījumā (pieņemot, ka rotācija nav ierobežota) tie var būt lenķi

$$\boldsymbol{\alpha} \in \mathcal{C} \quad (1.33)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = (\alpha_1, \dots, \alpha_n) \quad (1.34)$$

kur n – locītavu skaits, \mathcal{C} – robota locītavu konfigurāciju telpa. Tā kā darba ietvaros galvenokārt strādāts ar 6-asu industriālajiem manipulatoriem, ilustratīvam piemēram ir vērts izmantot tieši šādu robotu. Kinemātikas kontekstā pamatā tiek strādāts ar diviem uzdevumiem – tiešo un inverso. Robota izpildmehānisms ir piestiprināts pie kinemātiskās ķēdes pēdējā elementa, un pa-rasti nepieciešams pārveidot pozīcijas no šīs pārvietojamās koordinātu sistēmas uz robota pamatnes – apkārtējās vides – fiksēto. Tiešās kinemātikas uzdevums ir iegūt summāro pārvietojumu un rotāciju, ko piemērojot kādam vektoram efektora koordinātu sistēmā, var iegūt atbilstošu pārvietojuma vektoru un orientācijas reprezentāciju (sk. zemāk) globālajā koordinātu sistēmā.

Viens no veidiem, kā definēt pārveidojumu katrā locītavā un savienojumā, ir ar pārveidojuma matricām formā

$$T_{l_i}(q_i) = \begin{bmatrix} R(\mathbf{a}_i, \alpha_i) & L_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1.35)$$

kur α_i – locītavas lenķis (mainīgais parametrs), \mathbf{a}_i – rotācijas ass vienības vektors savienojuma koordinātu sistēmā (ap to tiek piemērota rotācija), L_i – pārvietojums uz nākamo atskaites punktu (3-dimensionāls vektors). $R(\mathbf{a}_i, \alpha_i)$ ir 3×3 telpiskā rotācijas matrica, kas atbilst rotācijai ap doto asi pa doto lenķi. Tā kā šie ir lineāri pārveidojumi, tos var kombinēt

$$T_n(\boldsymbol{\alpha}) = T_{l_n}(\alpha_n)T_{l_{n-1}}(\alpha_{n-1})\dots T_{l_1}(\alpha_1) \quad (1.36)$$

un piemērot pārvietojuma vektoram gala efektora koordinātu sistēmā ar matricu reizināšanu

$$\mathbf{x}_{world} = T_n(\boldsymbol{\alpha})\mathbf{x}_{ee} \quad (1.37)$$

Summāro rotāciju attiecīgi apzīmē kombinētās pārveidojuma matricas rotācijas komponente augšējā kreisajā stūrī, ko iespējams izteikt Eilera lenķos vai citādi. Viens populārs veids, kā apzīmēt rotācijas 3-dimensiju telpā, ir izmantojot kvaternionus [19]. Tos var uztvert kā komplekso skaitļu 4-dimensiōnalu ekvivalentu. Šī darba ietvaros padziļināti aprakstīt to algebriskās īpašības nav nepieciešams, pietiek tikai minēt, ka, lai izteiktu telpisku rotāciju, tiek izmantota t.s. versora forma

$$q = w + x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} \quad (1.38)$$

$$\|q\| = \sqrt{w^2 + x^2 + y^2 + z^2} = 1 \quad (1.39)$$

kur w ir rotācijas skalārā komponente bet x, y, z veidotais 3-dimensiju vektors ir paralēls atbilstošai rotācijas asij. Svarīgi ievērot, ka kaut gan kvaternions vispārīgā gadījumā ir četrdimensionāls objekts, konstantās normas nosacījums visus versorus novieto uz 3-dimensionālas hipersfēras 4-dimensiju telpā, kas nozīmē, ka telpiskām rotācijām tik un tā ir tikai 3 brīvības pakāpes – tāpat, kā izsakot tās ar lenķiem. Kvaternioniem ir reizinājuma operācija, kam ir vienības vērtība un inversās vērtības

$$qq^{-1} \equiv 1 + 0\mathbf{i} + 0\mathbf{j} + 0\mathbf{k} \quad (1.40)$$

un rotāciju vektoram 3-dimensiju telpā piemēro, to papildinot ar 0 un piemērojot rotācijas operatoru.

$$L_q(\mathbf{v} \in \mathbb{R}^3) \equiv q(0, \mathbf{v})q^{-1} \quad (1.41)$$

Šādām rotācijas operācijām iespējama kompozīcija

$$L_q \circ L_p(\mathbf{v}) = L_{qp}(\mathbf{v}) = (qp)(0, \mathbf{v})(qp)^{-1} \quad (1.42)$$

kas ļauj kinemātisko kēdes konfigurācijai atbilstošo koordinātu sistēmas pārveidojumu aprakstīt kā rotētu nobīžu vektoru summu

$$\mathbf{x}_{ee} = L_{q_1}(\mathbf{L}_1) + L_{q_2 q_1}(\mathbf{L}_2) + \dots + L_{q_n \dots q_1}(\mathbf{L}_{ee}) \quad (1.43)$$

Robota vadības programmatūras kontekstā bieži var nākties strādāt ar t.s. robota efektora pozu, kas sastāv no divām komponentēm – efektora koordinātu sistēmas sākumpunkta nobīdes un summārās rotācijas

$$\mathbf{x}_{position} = \mathbf{x}_{world} \quad (1.44)$$

$$\mathbf{q}_{orientation} = \prod_{i=1}^n q_i \quad (1.45)$$

Ja tiešās kinemātikas uzdevumā nepieciešams no zināmas robota locītavu konfigurācijas iegūt telpisko pozīciju, tad inversā kinemātika nodarbojas ar atbilstošu locītavu lenķu piemeklēšanu konkrētai telpiskai pozīcijai [21]. Formāli, tipiskais inversās kinemātikas uzdevums ir atrast f^{-1} pie konkrētas orientācijas un pozīcijas (kopā – pozas)

$$f(\boldsymbol{\alpha}) \equiv \mathbf{x}_{desired} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{position} \\ \mathbf{x}_{orientation} \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

kur $\mathbf{x}_{position}, \mathbf{x}_{orientation}$ ir pozīcijas un orientācijas ierobežojumi, kas atbilst konkrētam pārvietojumam un orientācijai, izteikti 3-dimensionāli. Protams, iespējams izmantot arī cita veida ierobežojumus, un to skaits var būt dažāds. Atkarībā no dotā lineāri neatkarīgu ierobežojumu skaita m un robota brīvības pakāpju skaita n , iespējamas sekojošās situācijas:

- 1) $n > m$ – problēma ir nepietiekami ierobežota. Ja atrisinājums pastāv (nav ārpus robota sasniedzamās darba zonas) un nav singulārs, tad atrisinājumu ir bezgalīgi daudz;
- 2) $n = m$ – problēma ir precīzi ierobežota (tipiski 6-asu robotam 3-dimensiju telpā). Ja atrisinājums pastāv, tad to ir galīgā skaitā;
- 3) $n < m$ – problēma ir pārlieku ierobežota. Risinājums pastāv tikai punktu apakškopai ar samazinātu dimensionalitāti.

Vienkāršākais veids, kā varētu aprakstīt singulārus risinājumus jeb singularitātes robotikas kontekstā, varētu būt sekojošs: tie ir punkti pozu telpā $x_{singularity}$, kuriem pēc tiešās kinemātikas piekārtotās locītavu konfigurācijas telpa $\{\alpha \mid f(\alpha) = x_{singularity}\}$ ir ar citu dimensionalitāti, nekā jebkurā tā topoloģisko kaimiņu kopā. Piemāram, precīzi ierobežotās problēmas gadījumā tas varētu būtu punkts, kam iespējama tikai viena atbilstoša robota konfigurācija, bet jebkurā tā kaimiņu kopā pastāv punkti ar lielāku, galīgu iespējamu konfigurāciju skaitu. Viena šādu pozīciju saime ir visas makismāli iztaisnota robota sasniegtās pozas.

Singularitāšu pastāvēšana, vairāku vai bezgalīgi daudzu konfigurāciju pastāvēšana (gandrīz) katrai sasniedzamai pozai un nelineārās sakarības starp locītavu leņķi un efektoru atrašanās vietu telpā nozīmē to, ka izmantot vienkāršus lineārus operatorus inversās kinemātikas uzdevuma risināšanai nav iespējams. Tā vietā iespējams vai nu sastādīt ne-lineāras vienādojumu sistēmas, kas atbilst robota ģeometrijai, vai rēķināt rezultātu ar skaitliskām metodēm.

1.4.2. Trajektoriju plānošana

Ar tiešo un inverso kinemātiku vien nepietiek, lai būtu iespējams realizēt robota vadību. Pat ja zināms robota sākuma un beigu stāvoklis pozu vai konfigurāciju telpā, jebkura kustība starp tiem sastāda līknes – gan konfigurācijā, gan pozā. Parasti abās telpās pastāv arī ierobežojumi, kas jāievēro – robots nedrīkst sadurties ar objektiem apkārtējā vidē (absolūtās vērtības pozu telpā), tā locītavu ātrumi vai paātrinājumi (parciālie atvasinājumi konfigurāciju telpā) nedrīkst pārsniegt ierobežojumus, u.t.t. Robotikas kontekstā kustības plānošanas problēmu var izteikt kā [22]

$$y(s) : [0, 1] \rightarrow \mathcal{C} \quad (1.47)$$

kas piekārto katru vērtību nepārtrauktajā intervālā $[0, 1]$ atbilstošai robota konfigurācijai, ar nosacījumu, ka $y(s)$ nav pārtraukuma punktu. $y(0), y(1)$ apzīmē robota sākuma un beigu stāvoklus, pārējās s vērtības – jebkuru trajektorijas punktu starp tiem.

Telpiskās pozīcijas un locītavu konfigurāciju – kinemātiskie – ierobežojumi nosaka atlauto apgabalu $\mathcal{F} \subseteq \mathcal{C}$, un attiecīgi

$$\forall s, y(s) \in \mathcal{F} \quad (1.48)$$

Savukārt ierobežojumus, kas attiecināmi uz $y(s)$ atvasinājumiem, sauc par dinamiskajiem. Svarīgi piebilst, ka ne vienmēr iespējams izpildīt nepārtrauktu kustību pozu telpā – var gadīties, ka, lai nonāktu no viena punkta nākamajā, nepieciešams tāds kustības

segments konfigurāciju telpā, kura $f(y(s))$ nepieder telpiskajai trajektorijai. Šādu parādību sauc par “lēcienu”, un no tās ir svarīgi izvairīties, ja uzdevuma ietvaros ir svarīga pareiza kustības telpiskā ģeometrija, kā tas ir ar metieniem.

2. ATDARINOŠĀ MAŠĪNMĀCĪŠANĀS – PĀRSKATS

Šīs nodaļas mērķis ir izveidot aptuvenu nozares pētniecības saturisku pārskatu; aprakstīt galvenos sasniegtos rezultātus, gūtās atziņas katrā no tematiskajiem apakš-virzieniem. Protams, ne visus pētījumus iespējams vienkārši klasificēt pēc to piederības šeit izvēlētajām kategorijām, un daudzi varbūt tajā vispār neiederas — taču cenšoties gūt personisku izpratni par kādu tēmu, lai motivētu tālākus pētījumus, ir svarīgi nos-tatīt iepriekšējus rezultātus to kontekstā. Saprast, kāpēc tieši šobrīd aktuālie pētniecības virzieni ir tādi, kādus tos varam redzēt kādā akadēmisko publikāciju datubāzē vai nesenno pētījumu pārskatā.

Varētu sacīt, ka tieši par atdarinošo mašīnmācīšanos rakstīts ir samērā maz. Noteikti, ja salīdzina ar vispārīgākām metodēm vai rīkiem. Taču pat “samērā maz” tomēr nozīmē ļoti lielu publikāciju skaitu, kas apraksta pētījumus ļoti dažādos virzienos. Turklāt robo-tika dominē kā pielietojuma mērķis šādām metodēm. Lai radītu priekšstatu par nozares pašreizējo stāvokli un tematisku dalījumu, nolemts izšķirt trīs virzienus, kas labi apraksta lielu daļu no pētījumiem par iespējām robotus apmācīt ar piemēriem:

- 1) trajektoriju kopēšana — mērķi šeit pamatā ir panākt robustu, precīzu atdarināšanu ar nelielām treniņa datu kopām, ja pieejama visa nepieciešamā informācija par sistēmas stāvokli;
- 2) novērojumu iegūšana, interpretācija, papildināšana — ne vienmēr ir pieejami dati formā, ko var tiesā veidā izmantot imitējamu trajektoriju iegūšanā. Daudzi pētījumi nodarbojas tieši ar apmācībai derīgu novērojumu iegūšanu — netiešu (piemēram, video) novērojumu pārveidošanu, labākām cilvēka-robota saskarnes metodēm, trajektorijām ar nezināmām darbībām, u.c.;
- 3) atdarināšana un adaptācija, vispārināšana — atdarinošās mācīšanās pielietojums, lai uzlabotu stimulēto, un otrādi; vispārīgu prasmju iegūšana no demonstrācijām, tūlītēja atdarināšana. Kā panākt, ka neaprobežojamies ar tikai piemēros esošo un spējam pielāgoties? Kā efektīvi uzsākt stimulēto mācīšanos ļoti retinātās atalgojumu telpās?

2.1. Labi definētu trajektoriju kopēšana

Pirmā, varētu teikt galvenā taču ne vienmēr vienkāršākā problēma, ir atrast veidu, kā pieejamās ekspertu zināšanas — robotikas kontekstā tās parasti būs pareizas trajektorijas dažādu pārvietojumu un smalku manipulācijas uzdevumu risināšanai — tiesā veidā atdarināt. Šo procesu mēdz saukt arī par programmēšanu ar demonstrācijām (PBD — *programming by demonstration*) [35, 6]. Idealizētā vidē ar determinētām stāvokļu pārejām un pilnīgu informāciju par tās pašreizējo konfigurāciju šis uzdevums varētu būt pat triviāls, taču praksē saskaramies ar problēmām:

- 1) darbs notiek ar novērojumiem, nevis stāvokļiem. Pat ja pieejami, piemēram, trajektoriju ieraksti, bieži vien trūkst svarīgas informācijas (varētu būt zināma trajektorijas kinemātika, bet ne tās dinamika — paātrinājumi, bet ne spēki);

- 2) atšķirības vidē: izpildelementos — varbūt robots ir nedaudz citāds; apkārtnē — varbūt manipulējamo objektu masas, forma vai izvietojums ir nedaudz atšķirīgi no demonstrācijās esošajiem;
- 3) ja trajektoriju generējis eksperts, kam, iespējams bijusi pieejama informācija, kuras aģentam nav — piemēram, manipulāciju veicis cilvēks ar redzi, bet robotam pieejami tikai kontakta sensori.

Problēmas faktiski nozīmē to, ka reālā sistēmā stāvokļu pārejas nav determinētas attiecībā pret novērojumiem un darbībām. Lai labāk saprastu šos trūkumus, vispirms noderīgi ir aplūkot “naivākos” veidus, kā varētu imitēt piemērus. Šajā apakšnodalā aprakstīti pētījumi, kuros uzsvars ir uz pietiekami detalizētu demonstrāciju atdarināšanas procesiem.

2.1.1. Vienkāršas metodes

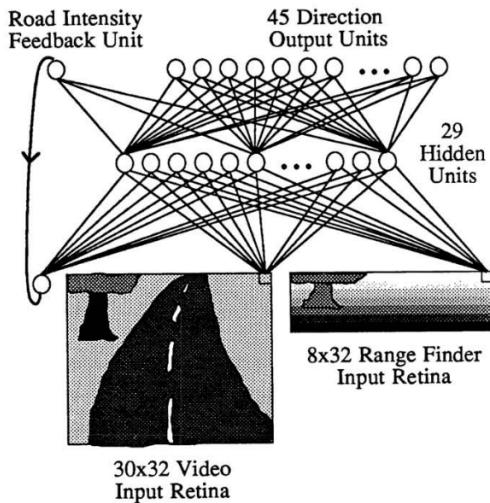
Pirmais, ko varētu darīt, ir tiešā veidā ierakstīt trajektoriju un to atkārtot. Šī nebūt nav jauna ideja — gandrīz visiem mūsdienu industriāliem robotiem ir pieejamas t.s. *lead-through* un *teach-in* programmēšanas metodes, kas ļauj fiziski un ar tālvadības ierīces palīdzību vadīt robota kustību un to ierakstīt pēcākai atdarināšanai [38], turklāt tās parādījušās jau pašos industriālās robotikas pirmsākumos 1970os gados [16].

Tā kā trajektorijai jābūt ierakstītai tieši ar robotu, lai tā būtu atkārtojama bez papildus datizraces uzdevumu risināšanas, var paredzēt, ka dabiski radīsies zināma tendence dominēt viegli realizējamiem, bet ne garantēti optimāliem ceļiem telpā — vieglāk ierakstīt dažus pagrieziena punktus un ļaut programmatūrai interpolēt nekā fiziski vadīt robotu visā kustības ceļā. Pie tam var parādīties neparedzēti trūkumi, pārejot no lēnas, nenoslogotas izpildes programmēšanas procesā uz ātru un noslogotu ekspluatācijā, kas apgrūtina procesu. Faktiski sākotnējais ieraksts bieži vien kalpo par starta punktu, bet, lai nonāktu pie lietojamas programmas, nepieciešams iegūto kodu korigēt un iteratīvi pielāgot. Lai arī principā tiek izmantota demonstrācija trajektorijas iegūšanai, procesa veikšanai tik un tā nepieciešams personāls ar robotu programmēšanas prasmēm. Jau sen atzīts [35, 6], ka, lai tik tiesām robotus varētu apmācīt tikai ar piemēriem, nepieciešamas metodes, kas ir robustākas pret nobīdēm no paraugu generējošā procesa apstākļiem un vispārināmākas, tāpēc uzsākti pētījumi ar mašīnmācīšanās metodēm.

Kad jāspēj atdarināt kas vairāk nekā viena, nemainīga trajektorija, nepieciešams atdarināt nevis pašu trajektoriju, bet gan procesu, kas tādas generē — “eksperta” jeb “instruktora” stratēģiju. Viena no vienkāršākajām metodēm, kas bieži tiek lietots kā piemērs, taču praksē reti kad ir pielietojuma, ir uzvedības klonēšana (*behavioural cloning*). Vispārīgi to definēt ir samērā vienkārši [4]. Ja dots MDP un kāda eksperta stratēģija π^* , kas šo MDP optimāli risina, mērķis ir atrast maksimāli tuvu modeli π_θ , kur

$$\pi_\theta(s) \approx \pi^*(s) \quad (2.1)$$

Parasti, protams, ir pieejama datu kopa ar eksperta izietajām stāvokļu-darbību laikrindām, turklāt jāstrādā ir ar novērojumiem, nevis stāvokļiem. Lai veidotu vispārīgu izpratni par atdarinošo mašīnmācīšanos, noderīgi ir detalizētāk aplūkot kādu vienkāršu tās



Att. 2: ALVINN modeļa uzbūve [42]

piemēru. Uzvedības klonēšana sistēmā, kur netiek veikta intensīva treniņa datu pārstrāde vai vadības algoritma argumentu pārveidošana ļoti labi kalpo šādiem mērķiem, tāpēc piemēram var izmantot 1989. gadā Kārnegija-Melona Universitātē veikto pētījumu “*Autonomous Land Vehicle in a Neural Network*” (ALVINN) [42]. Tā mērķis bija izstrādāt pašbraucošu automašīnu, kas spēj sekot ceļa kontūram.

Automašīna tikusi aprīkota ar videokameru un LIDAR sensoriem, kas devuši divus skatus uz to pašu telpas reģionu automobiļa priekšā. Par apmācāmo modeli izvēlēts neironu tīkls. Protams, 1989. gads vēl bija laiks, kad datoru veiktspēja bija stipri ierobežota, un nevienam vēl nebija ienācis prātā būvēt tik dziļas, daudzskaitlīgas un sarežģītas tīklu arhitektūras kā mūsdienu konvolūciju tīklus vai transformatorus. Tāpēc neironu tīkls ir gaužām līdzīgs jebkurā mācību grāmatā pirmajā nodaļā atrodamajiem piemēriem — tam ir viens slēptais slānis ar 29 perceptroniem, kam seko 45 izvades elementi. Video izmantots krāsainā attēla zilais kanāls, jo tajā ceļa virsma visvairāk kontrastē ar apkārtējo vidi. Gan video, gan LIDAR radītie attēli tīkla ievadē veido vienkāršu vektoru bez nekādiem telpiskiem kodējumiem, visi slāņi savstarpēji pilnībā savienoti.

Modeļa izvades slānis apzīmē vēlamo stūrēšanas virzienu 45 diskrētos soļos. Treniņa datu kopā faktisko virziena komandu atspoguļo neprecīzēta veida “zvana” funkcija ar modu pie pareizā virziena. Ieviests viens papildus perceptrons, kas (teorētiski) novērtē ceļa gaišumu salīdzinot ar apkārtējo vidi, un tiek pievienots nākamās iterācijas izvades vektoram.

Jau šim (šķietami) samērā vienkāršajam uzdevumam konstatēts, ka ievākt treniņa datus fizikālā vidē — braucot ar automašīnu pa ceļiem un ierakstot vadītāja veiktās korekcijas — nav praktiski, jo nepieciešama ļoti liela treniņa datu kopa. Jāatzīst, ka ar modernākiem datorredzes modeļiem droši vien šī nepieciešamība mazinātos. Tāpēc dati ģenerēti sintētiski — tā kā gan video, gan attāluma datu izšķirtspēja ir gaužām neliela, pat ar 1989. gadā pieejamām datorgrafikas iespējām šādi gūtus attēlus ir grūti atšķirt no īstiemi. Simulatorā iegūtie attēli un vadības komandas izmantoti klasifikatora apmācībā.

Iegūtais rezultāts — modelis, kas maksimāli tuvināts simulatorā realizētajam kon-

troles algoritmam izmantotā šablona iespēju robežās. Tas bijis pietiekami labs, lai spētu vadīt ar kameru un attāluma sensoru aprīkotu automobili pa 400m garu slēgta ceļa posmu saulainos dienas apstākļos, ar ātrumu 0,5m/s. Tas tiek lietots kā arguments par neironu tīklu pavērtajām iespējām pašbraucošo auto attīstībā, taču netiek slēpts, ka sasniegtais ir tālu no praktiskas vadības sistēmas.

Kā galvenais uzvedības klonēšanas trūkums parasti tiek minēta nespēja atgūties no faktiskā stāvokļa sadalījumu nobīdes [4] (*distribution shift*). Ja reālais modelis $\pi_\theta(s)$ nevar pilnīgi precīzi atdarināt eksperta $\pi^*(s)$ darbības vai MDP pārejas funkcija ir sto-hastiska, tātad treniņa datu kopa neietver visas iespējamās trajektorijas ar atbilstošajām $\pi^*(s)$ vērtībām, π_θ inducētais stāvokļu sadalījums diverģē no π^* inducētā. Lai iegūtu precīzāku un robustāku eksperta stratēģijas atdarinājumu, piedāvāti dažādi — sarežģītāki — apmācības paņēmieni.

2.1.2. Statistiskas korekcijas

Viens no virzieniem, kurā veikti mēģinājumi uzlabot trajektoriju kopēšanas lietderību, ir strukturēt treniņa datu ieguvi un apmācības algoritmu veidā, kas maksimāli tuvina π^* un π_θ inducētos stāvokļu sadalījumus. Bieži vien tas nozīmē, ka vienkārši ievākt datus un veikt apmācību uz tiem vairs nav iespējams — nepieciešama aktīva instruktora iesaiste. Piedāvātie risinājumi ir dažādi, un metodes var klūt visnotaļ sarežģītas [4], tāpēc, lai ilustrētu pieejas būtību kopumā, izvēlēts viens, vairāk teorētisks piemērs.

DAgger — *dataset aggregation* — ir 2011. gadā publicētajā rakstā “*A Reduction of Imitation Learning and Structured Prediction to No-Regret Online Learning*” [49], piedāvāts algoritms. Tas pierāda teorētiskas garantijas π^* un π_θ inducēto sadalījumu konvergēncēi, kombinējot instruktāžu ar apmācāmā modeļa ģenerētām stratēģijām. Lai gan raksts nedarbojas tieši ar robotiku, izmantotais MDP kontroles formālisms ir vispārīgs.

Algoritma darbību var vienkāršoti aprakstīt sekojoši: pieņem, ka ir pieejami ne tikai eksperta ģenerēti trajektoriju dati, bet ir iespējams pašam ekspertam uzzot vaicājumus par katrā stāvoklī optimālu darbību — kas, ja instruktāžu nodrošina cilvēks un laika soļu pārejas ir biežas, reti kad būs praktiski iespējams. Tādā gadījumā iteratīvi atkārto šādus soļus:

- 1) ar kādu varbūtību α izvēlas, vai i-tā trajektorija tiks ģenerēta ar π^* vai π_θ ;
- 2) iegūtās laikrindas stāvokļa elementiem s_t atrod atbilstošo $a_t^* = \pi^*(s_t)$
- 3) kopējai datu kopai D pievieno $D_i = \{(s_1, a_1^*), \dots\}$
- 4) apmāca modeli π_θ uz papildinātās datu kopas

Kā jau minēts, liela daļa raksta satura veltīta tieši algoritma teorētisko īpašību pierādīšanai, taču beigās arī veikti daži eksperimenti — divi ar personāžu vadību datorspēļu vidē, viens ar rokraksta zīmju atpazīšanu teksta virknēs. Lai gan visos gadījumos DAgger pārspēj uzvedības klonēšanas (vienkāršas π^* aproksimēšanas no treniņa datu kopas) rezultātus, tā lietderību stipri ierobežo instruktora interaktivitātes prasības — praksē reti kad ir iespējams kaut kas analogisks datorspēļu aģentu treniņam izmantotajam simulatoram, kas ar dziļu pārlasi atrod labas stratēģijas jebkuram stāvoklim.

2.1.3. Inversā stimulētā mācīšanās

Cits veids, kā atdarināt instruktora dotas trajektorijas, ir pieņemt, kas tā stratēģija optimizē kādu slēptu atalgojuma funkciju $R^*(s)$ un mēgināt to atjaunot no pieejamās informācijas. Šādā veidā ar stimulētās mašīnmācīšanās metodēm var iegūt meklēto rezultātu. Kā jau parasti, iespējami dažādi veidi, kā formalizēt uzdevumu un tehniski to realizēt. 2004. izdotais “*Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning*” [1] no Dzordzijas Tehnoloģiju institūta, viens no citētākajiem rakstiem par šo tēmu (lai arī ne pirmsais), piedāvā iteratīvu algoritmu nezināmas atalgojuma funkcijas atjaunošanai un izmantošanai. Galvenā atkāpe no tipiska MDP formālisma ir pieņēmums, ka nezināmā atalgojuma funkcija R^* ir formā,

$$R^*(s) = w^* \cdot \phi(s) \quad (2.2)$$

kur w^* — svaru vektors, bet $\phi : S \rightarrow [0, 1]^k$ — zināmu atribūtu izpausme noteiktos stāvokļos. ϕ nozīme ir tāda, ka ir iespējams noteikt, kādu sakarību lineāra kombinācija varētu būt īstā atalgojuma funkcija. Kā piemērs tiek piedāvāts autovadītāja uzdevums — viens no atribūtiem varētu būt 1, ja mašīna atrodas uz ceļa, bet 0 citādi, u.t.t. m treniņa kopas trajektorijām aprēķina vidējo faktoru vērtību summu, izteiktu kā

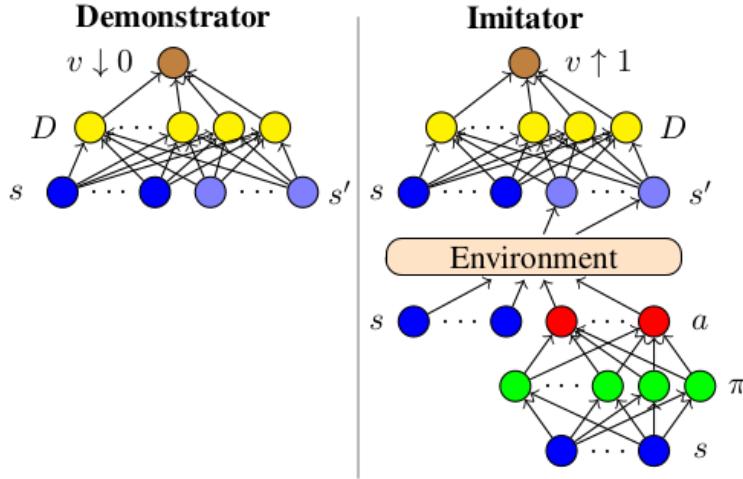
$$\mu^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T \gamma^t \phi(s_t^i) \quad (2.3)$$

Tad tiek iteratīvi atkārtota procedūra, kur atrod kādu svaru vektoru w^i un attiecīgi empīrisku atalgojuma funkciju $R^i(s) = w^{iT} \phi(s)$, ko izmanto, lai apmācītu jaunu stratēģiju π^i . Tad šai stratēģijai atrod vidējo vērtību μ^i analogiski (2.3), un visas iepriekšējās $\mu^{j \leq i}$ tiek izmantotas, lai atrastu nākamo svaru vektoru w^{i+1} . Process turpinās, līdz ir konverģējis līdz noteiktam klūdas hiperparametram. Tādējādi beigās iegūta stratēģija, kas maksimizē līdzīgu atribūtu $\phi(s)$ kombināciju nezināmajai instruktora stratēģijai, un robusti seko demonstrācijām.

Rezultāti parāda, ka šī metode pārspēj dažādas vienkāršas, statistiskas π^* aproksimācijas metodes (uzvedības klonēšanu). Kopā risināti divi dažādi uzdevumi. Viens ir “gridworld” — spēle, kurā aģents pārvietojas pa režģa formas vidi un dažos lauciņos ir pieejams atalgojums. Taču pārejas process ir stohastisks, tāpēc metodes, kas atdarina tikai telpiskos pārvietojumus un nemēģina atjaunot slēpto atalgojuma funkciju darbojas sliktāk. Otrs ir divdimensionāla spēle, kurā aģents vada automobili. Šeit tika pārbaudīts, vai var iemācīt aģentam atšķirīgus “braukšanas stilus” tikai ar demonstrācijām, kas arī izdevies.

2.1.4. Generatīvie pretiniekus tīkli

Iedvesmojoties no inversās stimulētās mācīšanās, attīstītas arī citas metodes, kas tiešā vai netiešā veidā nodarbojas ar instruktora stratēģijas aproksimēšanu. Bieži kā trūkums IRL metodēm tiek minēta nepieciešamība katrai iteratīvi iegūtajai stratēģija no jauna veikt stimulēto apmācības procesu, lai būtu iespējams iegūt šīs metodes ģenerētas trajektorijas un līdz ar to varētu novērtēt to sasniegto stāvokļu atribūtu sadalījumus.



Att. 3: GAN uzbūves piemērs. Augšējais tīkls — diskriminators — cenšas atšķirt eksperta demonstrācijas no ģeneratora radītām trajektorijām [63]

Meklējot veidus, kā tiešā veidā optimizēt stratēģiju, lai tā sasniegtu tādus pašus novērtējumus kā demonstrācijas pie plašām iespējamo atalgojuma funkciju klasēm, izlaižot pašu šo atalgojuma funkciju meklēšanu, 2016. gadā publicēts “*Generative Adversarial Imitation Learning*” [24]. Tas piedāvā risināt trajektoriju atdarināšanas uzdevumu ar pretinieku tīklu metodi, un ir bijis samērā ietekmīgs uz tālākiem pētījumiem nozarē, jo šobrīd tā jau ir visai populāra metode, un vēl salīdzinoši nesen tika uzskatīta par labāko tieši trajektoriju kopēšanas uzdevumā [63].

Generatīvie pretinieku tīkli — GAN, *generative adversarial networks* — ir neironu tīkli, kas apmācīti visai īpatnējā veidā. Tā vietā, lai optimizētu visu modeli vienam mērķim, tiek izdalīti divi elementi — ģenerators un diskriminators — ar pretējiem uzdevumiem. Diskriminators ir klasifikators, kas apmācis atšķirt demonstrāciju kopas trajektorijas vai to elementus no visām pārējām. Ģenerators no sistēmas stāvokļiem vai novērojumiem generē darbības tā, lai diskriminators nebūtu spējīgs atšķirt tās no parauga. Formāli aprakstīt veidu, kā līdz šāda modeļa piemērotībai nonākts, ir sarežģīti, tāpat — pierādīt šāda optimizācijas procesa konvergenci. Taču intuitīvi diezgan skaidrs, ka pēc sekmīgas abu modeļu apmācības būs iegūta stratēģija, kas tuvu aproksimē ievades datu sadalījumu.

2.1.5. Uzdevumu simboliska dekompozīcija

Vēl viena metode atdarināšanas spēju uzlabošanai ir telpisku kustības trajektoriju pārvēršana simbolisku, diskrētu darbību virknē. Pamatideja ir tāda, ka vieglāk iemācīties robusti izpidlīt primitīvas kustības un tad šādu primitīvo kustību secību kāda uzdevuma izpildē, nekā no neliela demonstrācija skaita iemācīties katru uzdevumu pilnībā no jauna. Šī arī nebūt nav jauna ideja — izteikta jau 1980os un 1990os gados [35]. Jau 2002. gadā veikti pētījumi par algoritmiem, kas ļauj aproksimēt trajektorijas elementus ar autonomu, nelineāru diferenciālvienādojumu sistēmām [26] un iemācīt pietiekami sarežģītas kustības — piemēram, tenisa bumbas sišanu — ar samērā nedaudziem piemēriem (ap 20).

Ap to pašu laiku piedāvātas arī pieejas šādu primitīvu kustību kombinēšanai [50], kur mašīnmācīšanās lietojums attiecināts ne tikai uz atsevišķajiem trajektorijas primitīviem, bet arī uz katrai demonstrācijai atbilstošas to secības meklēšanu.

Robotikas literatūrā pirms 2010. gada [6] plaši rakstīts par šādiem paņēmieniem, taču pēdējos gados aizvien biežāk tiek izmantotas metodes, kuru pamatā ir vispārīgāki neironu tīklu modeļi. Jebkurā gadījumā, aktīva pētniecība nozarē vēl joprojām notiek, it sevišķi pielietojumiem, kur robots tiek mācīts ar kinestētiskām metodēm. Piemēram, “*A Framework of Hybrid Force/Motion Skills Learning for Robots*” [65], kas publicēts 2020. gadā, šāda pieeja tiek veiksmīgi izmantota uzdevumiem, kur svarīga ne tikai telpiskā trajektorija, bet arī uz apkārtējo vidi izdarīto spēku profils (konkrēti — galda virsmas tīrišanā).

2.2. Novērojumu iegūšana, interpretācija, papildināšana

Pat ja demonstrācijas ir iespējams ļoti precīzi atdarināt, praksē paveras jauna problēma — ne vienmēr iespējams tiesā veidā iegūt pietiekami labus paraugus no instruktoriem. Ja novērojums o_t ir netiešs — iegūts formā, kas neatbilst robota vadības algoritam nepieciešamajam sistēmas konfigurācijas aprakstam — to nepieciešams pārveidot. Turklāt, darbojoties ar netiešiem novērojumiem, bieži vien tiesā veidā iespējams atjaunot tikai stāvokļu s_t laikrindu — darbības a_t paliek nezināmas.

Strādājot apstākļos, kur vienkārši analītiski modeļi ar labu precīzitāti var paredzēt stāvokļa atribūtus un sakarības starp tiem, šī atšķirība var nebūt īpaši svarīga. Piemēram, darbojoties ar robotu, kas nav sevišķi smagi noslogots un kura kontroles sistēma spēj bez lielām novirzēm atdarināt no tās prasīto kinemātiku, nav daudz sarežģītāk darboties ar novērojumiem, kuros zināmi tikai šie kinemātiskie atribūti. Tas varbūt pat ir vienkāršāk, nekā izmantot smalkāku konfigurācijas aprakstu, kur pieejami arī visi dinamikas atribūti.

Taču daudziem potenciāli ļoti noderīgiem lietojumiem galvenais šķērslis apmācībai var būt tieši derīgu treniņa datu kopu iegūšana no nepilnīgiem novērojumiem. Problemas var sagādāt demonstrāciju ģenerēšana ar citādas ģeometrijas instruktori (piemēram, cilvēku), citu objektu sarežģītu un iepriekš nezināmu konfigurāciju modelēšana (manipulējamo objektu novietojums, orientācija, u.t.t.), trajektoriju automātiska iegūšana no datu kopām, kas nav tiesā veidā paredzētas šim mērķim (video ieraksti). Tāpat jāpārvar zināmi izaicinājumi, lai datus varētu ģenerēt ar netiešām metodēm — piemēram, attālinātu vadību vai virtuālās realitātes simulācijām.

2.2.1. Nezināmas darbības

Pētījumos, kuru galvenā būtība ir dažādu veidu pārveidojumi ar kinemātiskiem vai dinamiskiem trajektoriju datiem, varētu teikt, ka uzsvars ir uz kinestētiskajiem mācīšanās aspektiem. Ja iepriekšējā nodaļā aplūkoto eksperimentu veicēji pārsvarā pieņēmuši, ka pieejami pareizi formatēti dati, kuros novērojums ir cieši sakarīgs ar robota vadībai svarīgiem sistēmas atribūtiem un zināmas katrā trajektorijas solī veiktās darbības, tad šajā tiek apskatīti gadījumi, kad šie dati ir kādā ziņā nepietiekami vai pārveidoti.

Pirmais sarežģījums, ko varētu ieviest, ir darbību trūkums demonstrācijās. Ar to jāsastopas ļoti daudzos uzdevumos — no nemarķētiem datiem var kā nebūt iegūt, piemēram, robota gala efektora pozīciju un rotāciju, taču nekas nav zināms par tā locītavu leņķiskajiem paātrinājumiem. Lai varētu izmantot jau zināmos atdarinošās mācīšanās algoritmus, rodas nepieciešamība uzminēt attiecīgās darbības, kas rezultē pārejā no viena stāvokļa uz nākamo.

“*Behavioral Cloning from Observation*” [62] (2018) ir viena šāda metode. Tās mērķis ir realizēt jau aprakstīto uzvedības klonēšanas algoritmu laikrindu datiem, kuros pieejami tikai novērojumi. Lai to panāktu, tiek ieviests papildus modelis, tikai šoreiz nevis stratēģijas, bet gan paša robota (vai cita aģenta) dinamikas aproksimēšanai.

Nedaudz vienkāršojojot tad algoritma soli ir sekojoši:

- 1) doto trajektoriju kopu pārveido formā $\mathcal{T}_{dem} = \{(s_t, s_{t+1})\}$, kas ir pārejas starp stāvokļiem;
- 2) stratēģija π_θ un sistēmas dinamikas modelis $M_\phi(a|s, s') = P(a|s, s')$ tiek nejauši inicializēti;
- 3) generē trajektorijas ar π_θ , pievieno trajektorijas elementus kopai $\mathcal{T} = \{(s_t, a_t, s_{t+1})\}$;
- 4) apmāca $M_\phi(a|s, s')$ uz \mathcal{T} ;
- 5) trenē π_θ uz $\{(s_t, \underset{a}{\operatorname{argmax}} M_\phi(a|s, s'), s') | (s, s') \in \mathcal{T}_{dem}\}$
- 6) atkārto solus 3-5 līdz sasniegsti pieņemami rezultāti

Redzams, ka pakāpeniski tiek iegūts dinamikas modelis, kas pareizi paredz pārejas funkcijas slēpto darbības parametru, un, tāpat kā parastajā gadījumā, tiek apmācīta atbilstoša stratēģija. Interesanti arī, ka šajā situācijā potenciāli nedaudz lielāks uzsvars ir tieši uz nākamo novērojumu laikrindā, nevis izvēlēto darbību — pie s , π_θ iemācās paredzēt s' sasniegšanai labāko darbību, nevis vienkārši atkārtot pašu darbību bez konteksta, tātad savā ziņā sistēmas dinamika un vēlamais rezultāts tiek ņemti vērā. Rezultātos autori salīdzina šo metodi ar citām, kas izmanto arī darbību datus no demonstrācijām, un konstatē, ka šis algoritms pat strādā labāk nekā tādas, ja tiek vērtēts pēc nepieciešamo demonstrācijas trajektoriju vai simulācijas iterāciju skaita.

Iepriekšējā apakšnodaļā 2. attēls ir no “*Generative Adversarial Imitation from Observation*” [62] (2018), kas turpina darboties tajā pašā virzienā, tikai šoreiz ar GAN modeļa palīdzību. Tā vietā, lai modelētu sistēmas dinamiku, diskriminators klasificē trajektoriju laikrindās sastopamās stāvokļu pārejas (s, s') pēc tā, vai tās būtu sastopamas demonstrācijā, bet generators (kas reizē ir arī stratēģija π_θ) tiek trenēts, lai tā izvēlēto darbību rezultātā iegūtās stāvokļu pārejas $s = T(s, a)$ nebūtu atšķiramas no piemēriem.

2.2.2. Dinamikas novērojumu iegūšana, izmantošana, vispārināšana

Cita veida problēma, kas arī prasa korekciju ieviešanu, ir atdarināšana sistēmām ar mainīgu dinamiku. Robotiem izmantojot “*lead-through*” programmēšanas metodi, kustības tiek programmētas bez slodzes un, iespējams, neievērojot ātrumu — zināma tikai daļēja sistēmas kinemātika. Ja var paredzēt, ka pēc tam ekspluatācijā atšķirsies robotu slogojosie spēki un griezes momenti, tad var meklēt veidus, kā šīs novirzes treniņa datu ieguves procesā kompensēt. “*Online Movement Adaptation based on Previous Sensor Ex-*

periences" [39] (2011) paredz jau iepriekš aprakstīto simboliskās dekompozīcijas modeļu papildināšanu ar korekcijām reālā laikā, izmantojot atgriezenisko saiti ar gan paša robota iekšējiem devējiem, gan ārējiem sensoriem.

Pētījumos, kas nodarbojas ar simbolisko dekompozīciju, bieži vien tiek aprakstīti visai sarežģīti un tieši robotu dinamikai specifiski matemātiskie modeļi. Taču vienkāršoti procesu var aprakstīt sekojoši: kustības raksturojošie diferenciālvienādojumu modeļi tiek iegūti, robotu manuāli vai citādi pārvietojot. Tad kustība tiek veikta ar pareizu kinemātiku (ātrumiem, paātrinājumiem), bet bez papildu slodzes. Tieki ierakstīti sensoru novērojumi un veidoti kustībai atbilstoši modeļi, kas paredz šos raksturlielumus trajektorijas gaitā. Autoru vārdiem — robots iemācās, kā kustībai vajadzētu "justies". Tad reāli ekspluatācijā var sekot līdzi nobīdēm no normas un ar klasiskās kontroles teorijas metodēm veikt korekcijas.

Nodarbojoties ar ļoti sarežģītiem uzdevumiem — piemēram, salikšanas procesiem — mēgināt vadīt robotu cauri visiem iespējamiem detaļu savstarpejiem stāvokļiem var būt neiespējami. Ja var iegūt demonstrācijas kādā citā, vieglāk realizējamā veidā un izstrādāt vispārīgu metodi, kā tos attdarināt neatkarīgi no robota uzbūves, rodas iespējas automatizēt arī šādus procesus. "*Contact Skill Imitation Learning for Robot-Independent Assembly Programming*" [52] (2019) realizē šādu procedūru, izmantojot divus būtiskus elementus:

- 1) *forward dynamics compliance control* — robota vadības algoritmu, kurā tiek kontrolēti uz efektoru iedarbojošos spēku un griezes momentu vektori, nevis izpildelementu pozīcija [51];
- 2) rekurentos neironu tīklus laikrindas nākamā elementa paredzēšanai — t.i., tīklus, kuru ievadē parādās iepriekšējā laika soļa izvades vektors no tā paša modeļa;

Demonstrāciju iegūšanai cilvēks simulācijas vidē ar datorpeles palīdzību veic salikšanas procesu, izmantojot tikai vizuālo uztveri un intuitīvu izpratni par sadursmju dinamiku. Novērojumus veido manipulējamā objekta masas centrā reģistrēto griezes momentu un spēku vektori. Stratēģija — rekurentais neironu tīkls — π_θ tiek apmācīta paredzēt nākamo spēku/momentu vektoru laikrindā, un tas tiek izmantots robota kontrolei ar minēto vadības algoritmu.

2.2.3. *Demonstrācijas no cilvēka darbībām*

Ja nepieciešams ātri un lēti radīt treniņa datu kopas apmācības procesiem — kā tas noteikti būtu jebkurai praktiski izmantojamai robotu programmēšanas sistēmai — svarīgi radīt cilvēkam draudzīgu saskarni. Tā vietā lai programmētu robota trajektoriju ar tradicionālām metodēm, ir veikti mēginājumi attīstīt paņēmienus, kas ļautu dabiski ierakstīt cilvēka izpildītas kustības un izteikt tās formā, ko var izmantot robota apmācībai. Viens no virzieniem, kurā veikta izpēte, ir tieša fiziskās kinemātikas ierakstīšana un pārveidošana — "*Imitation learning in industrial robots: a kinematics based trajectory generation framework*" [27] (2017) ir ilustratīvs piemērs. Tieki izmantota *Microsoft Kinect* — savulaik populāra, videospēļu vadībai paredzēta kustību uztveres ierīce, kas spēj ierakstīt kāda objekta kustību aprakstošu punktu virkni telpā — lai ierakstītu cilvēka kustības. Tad ar

analītiskām metodēm tiek veikta trajektoriju interpolācija, grupēšana ar klasterizācijas algoritmu, un izpildē vēlamo trajektoriju iegūst ar tuvāko kaimiņu metodēm.

Lai mazinātu atšķirības starp cilvēkam un robotam pieejamām novērojumu un darbību telpām, var izmantot virtuālo realitāti — gan simulācijās, gan robota tālvadībai. „Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation” [68] (2018) ir aprakstīta fiziska robota tālvadības sistēma, kas robota novēroto vidi pārveido sintētiskā telpā, kur cilvēks var ar manipulatoru palīdzību intuitīvi vadīt robota kustības. Šis uzdevums nav gluži triviāls, jo jāpārvar atšķirības starp, piemēram, robota kameras un cilvēka galvas kustību ātrumu, lai neradītu diskomfortu lietotājam. Tādējādi iegūta demonstrāciju datu kopa, kas sastāv no attēliem un telpiskiem dzīlumiem, ko arī tālāk var izmantot konvolūciju neironu tīklā, lai realizētu uzvedības klonēšanu.

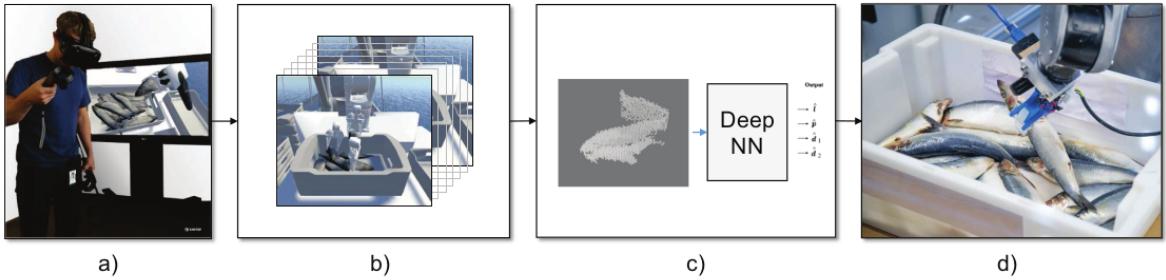
2.2.4. Video demonstrācijas, perspektīvu pārbīde

Ļoti plašas iespējas demonstrāciju iegūšanai pavērtu spēja tās iegūt no video datiem un izmantot šādas “redzes” sistēmas arī tiešā vadības uzdevuma risināšanai. Izrādās, ka daži no jau iepriekš aplūkotajiem algoritmiem ir pietiekami vispārīgi, lai tos varētu pielāgot šim uzdevumam. Piemēram, GAN no novērojumiem [63] ir ļoti robusts attiecībā pret ievades datu formu un saturu, ja vien tajos ir iespējams pietiekami labi atšķirt demonstrāciju no citām trajektorijām. Tāpat kā gadījumā, kad strādā ar kinemātiku aprakstošiem stāvokļiem, GAN vienkārši tiek apmācīts diskriminēt/generēt trajektoriju vizuā-lās reprezentācijas, ar samērā labiem rezultātiem.

Brīdī, kad vairs netiek izmantoti robota konfigurāciju aprakstoši novērojumi, rodas jauna problēma — iegūtie novērojumi ir atkarīgi no izmantotās perspektīvas, kas vispārīgā gadījumā var arī nesakrist ar robota vadības algoritmu ievades datus ģenerējošo. „Imitation from observation: Learning to imitate behaviors from raw video via context translation” [31] (2018) risina šo atšķirīgo kontekstu sarežģījumu un iegūtu modeli izmanto arī rezultātu uzlabošanai vispār. Pieņemot, ka trajektorijai atbilstošie novērojumi tiek iegūti no dažādām perspektīvām telpā, vispirms tiek apmācīts enkodera-dekodera tipa neironu tīkls, kas iegūst novērojumu vektoriālas reprezentācijas, ko pēc tam iespējams dekodēt par tai pašai sistēmas konfigurācijai atbilstošu novērojumu no jebkuras perspektīvas. Tas ļauj ne tikai tiešā veidā “tulkot” novērojumus no vienas kameras uz citu, bet arī izmantot iegūtās kodētās reprezentācijas Eiklīda distanci no demonstrāciju trajektoriju soļiem atbilstošajām kā atalgojuma funkciju stimulētās mašīnmācīšanās algoritmam. Arī intuitīvi skaidrs, ka modelis, kas spēs atjaunot situācijas attēlu kādā perspektīvā, ja zināmi tikai no citas perspektīvas gūtie attēli, kaut kādā ziņā sevī ietver visus nozīmīgos konfigurācijas atribūtus.

2.2.5. Datu sintēze, telpiski modeļi

Daudzi uzdevumi, kam tiek izmantoti roboti, sevī ietver manipulāciju ar citiem objektiem, kuru telpisko novietojumu un citus atribūtus ne vienmēr viegli iegūt, un nākas paļauties uz netiešiem novērojumiem, ko sagādā, piemēram, datorredzes sistēmas. Ja objekti ir paredzamā orientācijā un regulāras formas, no šīs problēmas parasti iespējams izvairīties, taču vēl joprojām daudzi pārvietošanas un pozicionēšanas procesi tiek veikti



Att. 4: Zivs satveršanas modeļa apmācība: a) cilvēka radīto demonstrāciju iegūšana; b) datu kopas sintētiska pavairošana; c) telpiska konvolūciju neironu tīkla apmācība; d) veiksmīga zivs satveršana realitātē. [12]

ar cilvēka roku darbu.

“Teaching a robot to grasp real fish by imitation learning from a human supervisor in virtual reality” [12] ir visnotāl interesants vairāk praktisks projekts, kura ietvaros izstrādāts modelis zivju satveršanas uzdevumam. Šo rakstu ir vērts nedaudz sīkāk aplūkot, jo problemātika ir radniecīga darba mērķī formulētajam uzdevumam — industriālā robota darbības ar neregulāras formas objektiem. Tajā robotam ir jāspēj no kastes, kurā atrodas vairākas zivis, satvert un pārvietot vienu. Zivs ir slidens objekts, kā veiksmīga satveršana ar robota efektoru iespējama tikai ļoti ierobežotā iespējamo kontakta konfigurāciju apakškopā, tāpēc no praktiskas realizācijas viedokļa projekts ir visai ambiciozs.

Risinājuma pamatā ir trīs idejas:

- 1) zivs pozīcijai un orientācijai piemērota satveršanas punkta un leņķa paredzēšana, izmantojot ar telpisko kameru gūtus punktu mākoņa datus. Tam pielieto konvolūciju neironu tīklu — izmantojot vispārinātas metodes, kas sākumā izmantotas divdimenšionāla attēlu klasifikācijai;
- 2) demonstrāciju ievākšana virtuālās realitātes vidē, kas ļauj cilvēkam viegli un dabiski generēt satvērienus;
- 3) datu kopas sintētiska pavairošana.

Novērojumi gūti, cilvēkam VR vide brīvā veidā satverot zivis dažādos veidos. Lai viennozīmīgi aprakstītu katru iespējamo satvērumu, izmantoti trīs vektori — pozīcija (punkta), garenās ass orientācija un rotācija ap to. Pēc tam generēts liels skaits zivju izvietojuma konfigurāciju. Lai sintētiskie dati būtu lietojami, nepieciešams nodrošināt, ka satvēruma matrica tiek koriģēta atbilstoši zivs izliekumam, novietojumam un orientācijai. Katrā sagatavotajā sistēmas konfigurācijā katrai zivij sākumā piešķirti visi iespējamie satvēruma vektori, no kuriem atsijāti visi, kas kolīziju dēļ nav sasniedzami. Šie dati tad izmantoti 3-dimensionālā konvolūciju neironu tīkla apmācībai — simulatorā generēti ainai atbilstoši telpiskie attēli, modelis apmācīts kā tipisks klasifikators. Rezultātā konstatēts, ka aptuveni 74% izdarīto satveršanas mēģinājumu bijuši sekmīgi.

2.3. Atdarināšana un adaptācija, vispārināšana

Ja pieejamas demonstrācijas no eksperta, to atdarināšana tiešā veidā varbūt ir pirms solis noderīgu stratēģiju iegūšanā, taču nebūt ne vienīgais, ko iespējams darīt. Līdz šim aplūkotas metodes, kas izrāda zināmu adaptācijas pakāpi, lai precīzāk un robustāk imitētu paraugus, taču vienmēr izdarīts pieņemums, ka instruktors kādā ziņā optimāli izpildījis uzdevumu. Turklāt visos gadījumos, lai apmācītu sistēmu izpildīt jaunu uzdevumu, nepieciešams veikt intensīvu treniņu ar cilvēka starpniecību.

Šajā apakšnodaļā aprakstīti pētījumi, kuros meklēti veidi, kā apvienot atdarināšanu ar adaptāciju, lai vispārinātu demonstrācijās ietverto informāciju, atvieglotu jaunu uzdevumu programmēšanas procesu vai pārspētu instruktoriu sasniegto rezultātu kvalitātē. Lai gan mēģinājumi darboties šajā jomā nav nekas jauns — var atrast senākus pētījumus, kuros, piemēram, izmantotas sarežģītas un tiesī robotikas mērķiem specifiskas simboliskās dekompozīcijas metodes [40] — uzsvars šeit tiek likts uz nesenākām un vispārīgākām metodēm, kas attīstītas jau pašreizējā neironu tīklu uzplaukuma periodā.

2.3.1. Neoptimālu demonstrāciju uzlabošana

Varētu sacīt, ka jau pati atdarinošās mācīšanās pamatnostādne — apgūt stratēģiju problēmas risināšanai, pēc iespējas tuvāk sekojot kādai demonstrāciju kopai — sevī ietver pieņēmumu par demonstrācijas optimalitāti. Taču izrādās, ka iespējams pašu treniņa datu kopu izmantot, lai gūtu informāciju par to, ko instruktors patiesi vēlējies sasniegt, un attiecīgi optimizēt modeli šī slēptā mērķa sasniegšanai.

“Extrapolating beyond suboptimal demonstrations via inverse reinforcement learning from observations” [9] (2019) izmanto jau iepriekš aprakstīto inversās stimulētās mācīšanās algoritmu saimi par pamatu jaunai metodei. Tā vietā, lai atrastu atalgojuma funkciju, kas pamato demonstrāciju kopas trajektorijas τ , tiek meklēta tāda, kas skaidro to *sakārtojumu*. Tāpēc nepieciešams datu kopu papildināt ar kārtojumu \prec , lai

$$\tau_i \prec \tau_j \Rightarrow \sum_{s_t \in \tau_i} R(s) \leq \sum_{s_t \in \tau_j} R(s) \quad (2.4)$$

Protams, kārtojums var arī nebūt ideāls — trajektoriju vērtējums var būt subjektīvs vai troksnains, ja nav zināma īstā atalgojuma funkcija, tāpēc jārēķinās ar klūdainu pāru attiecību pastāvēšanas iespējamību ar klūdas varbūtību ϵ

$$\exists \epsilon \geq 0 : \tau_i \prec \tau_j \Rightarrow P \left(\sum_{s_t \in \tau_i} R(s) \leq \sum_{s_t \in \tau_j} R(s) \right) = 1 - \epsilon \quad (2.5)$$

Ja kārtojums ir pieejams, radoši nosauktais *Trajectory-ranked Reward EXtrapolation* jeb T-REX algoritms darbojas divos solos:

- 1) izmantojot demonstrāciju datus, tiek apmācīta nezināmās atalgojuma funkcijas $R(s)$ aproksimācija $r_\phi(s)$ — parametrisks modelis, konkrēti neironu tīkls;
- 2) tāpat kā IRL gadījumā, rekonstruētā atalgojuma funkcija tiek izmantota, lai apmācītu stratēģiju π_θ ar stimulētās mašīnmācīšanās metodēm.

Eksperimentāli pārbaudīts, ka piemēros, kur zināmas demonstrācijām atbilstošās īstās atalgojuma funkcijas un klūdas varbūtība saglabājas zem 15%, rekonstruētā atalgojuma funkcija r_ϕ daudzos gadījumos labi aproksimē īsto. Turklat, ja izmantotās demonstrācijas nav optimālas, iegūtā stratēģija π_θ tās pārspēj.

2.3.2. Demonstrācija — sākumpunkts apmācību procesam

Atšķirībā no IRL un augstāk aprakstītā T-REX, ir iespējams uz atdarinošās un stimulētās mācīšanās kombināciju skatīties arī no otras puses — nevis izmantot stimulētās metodes, lai realizētu atdarināšanu, bet gan izmantot demonstrācijas, lai uzlabotu parasto stimulētās mašīnmācīšanās procesu ar zināmu atalgojuma funkciju.

“Deep Q-learning from demonstrations” [23] (2018) piedāvā vispārīgu metodi stimulētās mācīšanās procesa inicializācijai ar demonstrāciju datu kopas palīdzību. Šādu pieeju motivē viens no lielākajiem klupšanas akmeņiem RL algoritmu apmācībā — ja atalgojuma funkcijas nenuelles vērtības konfigurāciju telpā ir stipri retinātas, kā tas ļoti bieži ir arī dažādos robotikas uzdevumos, tad, praktiski apmācot stratēģiju izpildīt tai uzdoto uzdevumu, nepieciešams ļoti liels skaits treniņa solu — lai šo telpu apstaigātu, atrastu vēlamos rezultātus un optimizētu trajektoriju caur tai.

Q-mācīšanās gadījumā stratēģiju var uzdot formā $\pi^{\epsilon Q_\theta}$, kur

$$T(s, a) = P(s') \rightarrow Q_\theta(s, a) \sim \mathbb{E}[v(s')] \quad (2.6)$$

jeb modelis Q_θ aproksimē kopejā atalgojuma sadalījumu pār iespējamām darbībām (jeb nākamo stāvokļu vērtības), un attiecīgi izvēlas vienu pēc “ ϵ -alkatīgas” stratēģijas

$$a = \underset{a}{\operatorname{argmax}} Q(s, a) \text{ ar varbūtību } 1 - \epsilon; \text{ nejauši izvēlēta citādi} \quad (2.7)$$

Demonstrācijas tad tiek izmantotas, lai apmācītu Q_θ vēl pirms notiek jebkāda modeļa mijiedarbība ar vidi, un attiecīgi tas jau uzreiz darbojas daudz kvalitatīvāk nekā nejauši inicializēts modelis. Rezultāti liecina, ka jau sākotnējās iterācijās šāds algoritms var darboties visai labi, kas paver iespējas to izmantot situācijās, kad nav iespējams veikt apmācību simulācijas vidē, bet ir pieejami demonstrāciju dati. Robotikas kontekstā tas nozīmē, ka, ja jāveic apmācība uz fiziska robota, modeļa sagatavošana ar atdarināšanu varētu būt visai noderīgs paņēmiens.

2.3.3. Tūlītēja trajektoriju atdarināšana

Daudzas līdz šim aplūkotās atdarinošās metodes darbojas ar pieņēmumu, ka mērķis ir no demonstrāciju datu kopas iegūt modeli, kas pēc apmācības spēj izpildīt vienu uzdevumu, un attiecīgi treniņa algoritms neparedz iespēju bez papildus iterācijām atdarināt iepriekš nerēdzētas demonstrācijas — tipiski pieejams tikai pašreizējais sistēmas stāvoklis ievadē un vēlamā darbība izvadē.

Salīdzinot ar bioloģiskām sistēmām, uzreiz ir skaidrs, ka šādi procesi nekad nespēs izdarīt cilvēkam šķietami pašsaprotamo — novērot darbību un uzreiz to atkārtot bez liela skaita treniņa iterāciju. Lai būtu iespējams sasniegt šādu rezultātu, ir nepieciešams nevis modelis, kas ar paraugiem tīcis optimizēts vienas stratēģijas atdarināšanai, bet gan tāds,

kas vispārina pašu atdarināšanas procesu — ievadē sistēmas pašreizējais stāvoklis tiek apvienots ar demonstrāciju, lai iegūtu vēlamo darbību.

“*One-Shot Imitation Learning*” [11] (2017) šādu rezultātu sasniedz, apmācot sarežģītas uzbūves modeli, kas apmācīts no vienas demonstrācijas paredzēt citas vispārīgā veidā — tā ievades vektors satur veselu treniņa kopas trajektoriju. Modelis tiek apmācīts uzreiz veselai līdzīgu uzdevumu kopai, nevis tikai vienam konkrētam.

Konkrēti, pētītā uzdevumu saime ir kuba formas detaļu kraušana vienai uz otras ar robotu. Novērojumu ģenerēšanas un interpretēšanas problēmas gan tiek apietas, jo sistēmas stāvokli raksturojošie vektori satur gan robota iekšējo konfigurāciju, gan detaļu relatīvās pozīcijas attiecībā pret robota efektoru. Tad, izmantojot konvolūciju un uzmanības mehānismus, dažādu garumu trajektoriju laikrindas tiek reducētas uz vienu sistēmas stāvokļa vektoru, kas paredz piemērotāko darbību attiecībā pret doto demonstrāciju un momentāno sistēmas stāvokli.

2.3.4. Nestrukturētas demonstrācijas, plānu veidošana no galamērķiem

Droši vien lielākā atkāpe no “klasiskā” atdarinošā mašīnmācīšanās uzdevuma ir tajos pētījumos, kur tiek atmests pieņēmums, ka ir dotas diskrētas parauga trajektorijas ar zināmu uzdevumu. Tā vietā pat pārraudzītā trajektoriju markēšanas stadija tiek automatizēta un atstāta apmācības algoritma pārziņā. Tā vietā var novērot, ka, ja mērķis ir iemācīties modeli, kas spēj vispārīgi atrast ceļu no vienas sistēmas konfigurācijas uz citu, pietiek atrast trajektorijas, kas iet caur abām. “*Learning Latent Plans from Play*” [33] (2019) ierosina demonstrāciju strukturētas ievākšanas vietā izmantot cilvēka dabisko tendenci spēlēties ar dažādiem objektiem, lai virtuālās realitātes vidē ġenerētu demonstrāciju kopas. Sistēma šajā gadījumā ir virtuālā realitātē modelēta vide, bet pieejamie novērojumi — robota iekšējā konfigurācija un simulēti attēli.

Tiek konstatēts, ka, pilnīgi nejauši ġenerējot trajektorijas, paies visnotaļ ievērojams laiks, līdz tiks apstaigāts pietiekami plašs konfigurāciju telpas reģions, lai gūtu labas trajektorijas starp jebkuriem punktiem tajās. Atšķirībā no nejauša procesa, cilvēks jau nāk ar sagatavotu izpratni par tāda tipa uzdevumu risināšanas elementiem, kas pēc tam varētu būt interesanti citiem. Brīvi pētot dažādās simulācijas vidē pieejamās iespējas, tiks dabiski izmantotas priekšzināšanas par dažādām fizikālām sakarībām starp objektiem un to mijiedarbību — piemēram, rokturu satveršanu, lai atvērtu un aizvērtu durvis, pogu nospiešanu, objektu satveršanu un pacelšanu.

Lai no šādas nestrukturētas informācijas iegūtu praktiski izmantojamās stratēģijas, nepieciešams papildināt stratēģijas formālismu ar mērķa jēdzienu — ne vairs vienkārši atrodot katram stāvoklim piekārtotu $\pi(s)$, bet gan parametrizētu pēc vēlamā beigu stāvokļa (*goal*) — $\pi(s, s_g)$. Ja pieejamas trajektoriju laikrindas formā s_1, s_2, \dots, s_n , nav grūti pamānīt, ka jebkura apakšvirkne veido sākuma-gala stāvokļu pāri ar visām to starpā esošajām pārejām.

Tiek piedāvāti divi dažādi modeļu šabloni un apmācības algoritmi, kas spētu iegūt reālas stratēģijas no nestrukturētu datu kopas. Vienkāršojo — ignorējot sistēmas stāvokļa reprezentāciju kodēšanas detaļas — pirmo var aprakstīt samērā vienkārši. Modelis

$\pi_\theta(s, s_g)$ saņem ievadē pašreizējo un vēlamo stāvokli, un paredz nepieciešamo darbību. Kā šablons tiek izmantots rekurentais neironu tīkls, treniņa datus veido trajektorijas — pēdējais trajektorijas stāvoklis kļūst par s_g . π_θ optimizē, lai katram (s_t, a_t, s_g) būtu $\pi_\theta(s_t, s_g) \approx a_t$. Taču pastāv problēma — var pastāvēt dažādas trajektorijas starp jebkuriem s, s_g , kas draud apgrūtināt mācīšanās procesu.

Otrs, sarežģītākais modelis apkaro šo parādību, modelējot plāna jēdzienu — tiek pieņemts, ka katrai trajektorijai τ var piekārtot rīcības plānu, visiem iespējamiem rīcības plāniem pastāv vektoriālas reprezentācijas z , un vieglāk ir vispirms paredzēt atbilstošāko plānu, pēc tam — piemeklēt tam viennozīmīgi piekārtotu trajektoriju. Modelis tad sastāv no trim dalām:

- 1) plānu enkodera $q_\phi(z|\tau)$, kas izsaka trajektorijas ar matemātisko cerību un standartnovirzi vektoriem $\mu_\phi, \sigma_\phi = q_\phi(\tau)$;
- 2) plānu selektora $q_\psi(z|s, s_g)$, kas analogiski paredz $\mu_\psi, \sigma_\psi = q_\psi(s, s_g)$ un iegūst no sadalījuma konkrētu vektoru z diferencējamā veidā (pieskaitot vidējām vērtībām gadījuma lieluma reizinājumu ar standartnovirzi);
- 3) dekodera $\pi_\theta(z, s, s_g)$, kas rekonstruē nepieciešamo darbību no plāna reprezentācijas, galamērķa un sistēmas momentānā stāvokļa.

Divi varbūtību sadalījumi q nepieciešami, jo optimizācijas procesā tiek minimizēta Kulbaka-Leiblera divergēncē starp tiem — ņaujot visu trajektoriju aizstāt ar tikai diviem tās punktiem. Otrs mērķa funkcijas faktors ir kļūda darbībā a_t . Tā kā visi slāņi ir diferencējami, viss modelis kopā veido vienu neironu tīklu, ko kopā arī apmāca uz trajektoriju apakšvirknēm. Stratēģija ir $\pi_\theta(q_\psi(s, s_g), s, s_g)$.

Tātad, lai programmētu robotu izpildīt kādu konkrētu uzdevumu, vairs nav nepieciešamas ne papildus treniņa iterācijas, ne demonstrācijas — pietiek norādīt vēlamo sistēmas gala stāvokli, un stratēģija to pati sasniegs. Rezultātu sekcijā secināts, ka šāda mācīšanās spēj pārspēt klasisko uzvedības klonēšanas metodi 18 dažādiem uzdevumiem — kaut gan otra izmantojusi demonstrācijas, kas speciāli sagatavotas katram. Turklat, pateicoties faktam, ka modelis apgūst trajektorijas no katra konfigurāciju telpas punkta uz katru citu, tā ir ļoti robusta pret nobīdēm. Visbeidzot, ar dimensiju redukcijas metodēm aplūkojot iegūto rīcības plānu reprezentācijas telpu redzams, ka pēc cilvēkam saprotama mērķa līdzīgas darbības veido klasterus arī šajās projekcijās.

Interesants turpinājums šim pētījumam ir “*Language conditioned imitation learning over unstructured data*” [32], kur iegūtais rezultāts atkal pagriezts otrādi — ja ir metode, kas spēj pati izdalīt uzdevumus un grupēt tos pēc būtības, tad apvienojot to ar sagatavotiem marķējumiem, var iegūt stratēģiju, kas vadāma ar šādiem marķējumiem. Konkrēti, ja daļai no trajektorijām tiek *a posteriori* piekārtots dabiskā valodā izteikts mērķis, var apmācīt modeli, kas sasaista rīcības plānu reprezentācijas ar frāžu reprezentācijām — ņaujot vadīt robotu ar jau iepriekš apmācītu valodas enkoderu ģenerētiem kodiem. Praktiski tas izpaužas tā, ka iespējams robotam dot pavisam dabiskas komandas, turklāt neatkarīgi no izvēlētajiem sinonīmiem un pat dažādās valodās.

Ar tīri atdarinošām metodēm iegūtas stratēģijas var nebūt optimālas, it sevišķi

gadījumos, kad tiek prasīts sasniegt mērķi, kam nav sagatavota speciāla demonstrāciju datu kopa. “*Relay policy learning: Solving long-horizon tasks via imitation and reinforcement learning*” [17] (2019) piedāvā apvienot nestrukturētas demonstrāciju datu kopas un galamērķus kā uzdevuma specifikāciju ar zināmu atalgojuma funkciju. Tā varētu iegūt labas inicializācijas apmācības procesiem, kas citādi būtu nepraktiski vai teju neiespējami ar vienkāršām konfigurāciju telpas pārstaigāšanas metodēm to retināto atalgojuma vērtību dēļ.

Pamatā risinājumam ir hierarhiskā stimulētā mācīšanās — tiek iegūta nevis viena stratēģija, bet divas. π_θ^h jeb augsta līmeņa stratēģija ievadē saņem pašreizējo sistēmas stāvokli s un gala stāvokli s_g , bet tā vietā, lai izvadītu vēlamo darbību, rezultātā izdod lokālu mērķi s_g^l — argumentu zemākā līmeņa stratēģijai π_ϕ^l . Otrā tad atkarībā no s, s_g^l generē vēlamo darbību vidē a . Apmācība tiek realizēta divos soļos:

- 1) attdarināšana — katrai no stratēģijām tiek sagatavota atsevišķa datu kopa, izmantojot “slīdošā loga” principu pār trajektorijām demonstrāciju datos. π_θ^h izvēlas plašāku logu W_h un minimālo distanci līdz lokālajam mērķim j . Katram s_t tad tiek izveidoti korteži (s_t, a'_t, s_g) , kur $s_g \in \{s_{t+1}, s_{t+2}, \dots, s_{t+W_h}\}$ bet $a'_t = s_{t+j}$. Zema līmeņa stratēģijai π_ϕ^l tad izvēlas īsāku logu W_l un analogiski katru tālāk logā esošo s_{t+i} izmanto kā galamērķi s_g^l , lai izveidotu (s_t, a_t, s_g^l) . Šādi pārveidotos datus tad izmanto, lai apmācītu modeļus π_θ^h, π_ϕ^l attdarināt datu kopu;
- 2) uzlabošana — izmantojot zināmu atalgojuma funkciju $r(s, a, s_g)$, realizē stimulēto mācīšanos. Iegūtās stratēģijas tiek darbinātas vidē, iegūtie dati tiek tāpat pārkārtoti un π_θ^h, π_ϕ^l atkal tiek optimizēti, tikai šoreiz gradientu optimizācijas mērķa funkcija (*loss*) tiek papildināta ar atalgojuma faktoru.

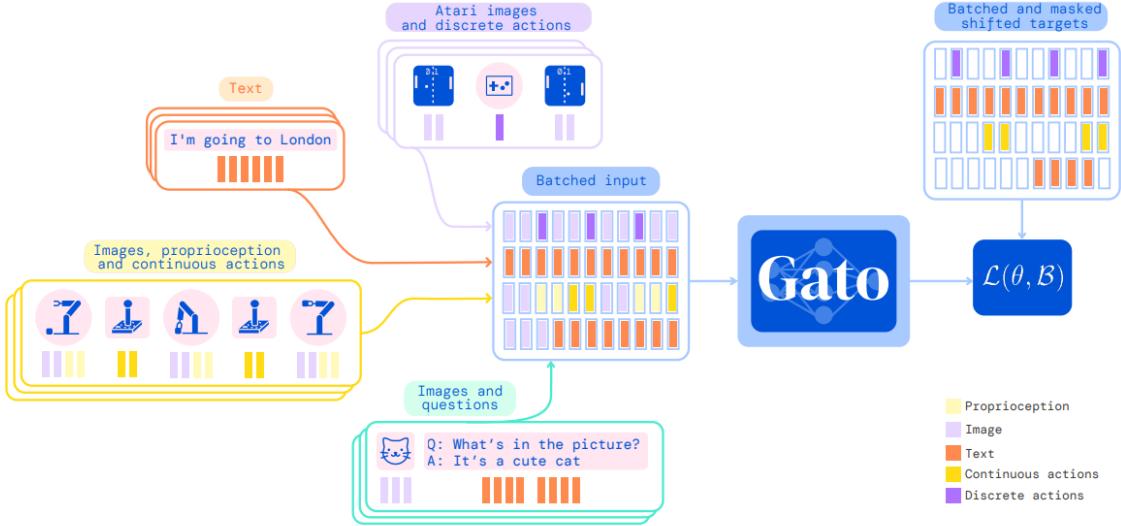
Tiek iegūts algoritms, kas spēj no nestrukturētas datu kopas iemācīties, kā sasniegt patvalīgus galamērķus, bet pēc tam — uzlabot iegūtās stratēģijas ar stimulētās mācīšanās palīdzību. To parāda rezultāti — dažādos uzdevumos šāda pieeja pārspēj iepriekš aprakstīto latento plānu pieeju [33], taču attiecīgi tai ir nepieciešams papildu patstāvīgas mācīšanās etaps.

2.3.5. *Loti lielu, vispārināmu laikrindu regresoru pielietošana*

Sekojoši līdzi tikai literatūrai, kas uzsver tieši attdarinošās un stimulētās mašīnmācīšanās nozarē pielietotās terminoloģijas lietojumu, būtu viegli palaist garām problemātikas ziņā tuvu radniecīgus rezultātus, kuru autori līdz tiem nonākuši no citu nozaru pētniecības. MDP formālisms tā klasiskajā formā izslēdz dažādus sarežģītāka izpildījuma autoregresorus, kaut gan tiem iespējams piemeklēt visnotaļ produktīvus pielietojumus arī attdarināšanas uzdevuma risināšanā.

Veiksmīgas sagadīšanās dēļ aptuveni nedēļu pirms šī darba iesniegšanas vērtešanai radusies iespēja to papildināt ar pavisam jaunu, loti aktuālu publikāciju no *DeepMind*. “*A Generalist Agent*” ir 2022. gada 12. maijā pirmspublikācijā izplatīts raksts, kura pamatā ir viena laikrindu autoregresora pielietojums dažāda veida sekvenciālu datu attdarināšanai, tai skaitā — attdarinošajam uzdevumam robotikā [48].

Izmantotais modelis ir t.s. transformers jeb pašuzmanības tīkls — pirmo reizi pie-



Att. 5: *Gato* – vispārināms atdarināšanas aģents, kas ar vienu un to pašu transformatora modeli spēj paredzēt radikāli dažādu sistēmu vektorizētu reprezentāciju laikrindas [48].

dāvāts šobrīd jau ļoti slavenajā 2017. gada rakstā “*Attention is all you need*” kā risinājums teksta virkņu tulkošanas un autoregresijas uzdevumiem [64]. Tā ir modulāra neironu tīkla arhitektūra, kas sastāv no potenciāli daudziem līdzīgiem transformeru blokiem, kuram katram ir klasisku neironu tīklu un uzmanības mehānisma elementi. Šādus modeļus ar ļoti lieliem parametru skaitiem pēdējo gadu laikā veiksmīgi izmanto dažādu dabiskās valodas apstrādes uzdevumu risināšanā, kur tie pakāpeniski aizstāj vēl nesen populārās rekurentās tīklu arhitektūras [47].

Konkrētajā pētījumā dažādu modalitāšu ievaddati tiek pārveidoti atbilstošos semantisko markēru vektoros (“*tokens*”), kas pēc tam tiek attēloti modeļa ievadā izmantotajā vektoru telpā ar apmācāmu iegulšanas modeli. Tieks nodalīti novērojumu markēri un darbību markēri. Modelis tiek darbināts kā autoregresors un paredz visus markērus ievada virknē, taču mērķa funkcija tiek piemērota tikai “darbībām” – teksta autoregresijas gadījumā tie būtu visi izvadītie markēri, jo katrs atbilst apakšvārda iegultai formai, bet robotu vadības uzdevumā daļa no markēriem atbilst novērojumam un daļa – darbībai. Atkarībā no uzdevuma problemātikas, novērojuma un darbības reprezentācijai var atbilst dažādu garumu markēru virknes. Par to rekonstrukciju izmantojamā formā atbild katram uzdevumam atsevišķa dekodera sekcija, kas ir inversā operācija iepriekš aprakstītajai markēru kodēšanai un attēlošanai vektoru telpā. Robotu vadības kontekstā apmācībai izmantotas iepriekš sagatavotu stimulētās mācīšanāš modeļu – ekspertu – demonstrācijas, kas padara šo par klasisku atdarinošās mācīšanās uzdevumu.

Rezultāti liecina, ka šāds modelis ļoti veiksmīgi apgūst ekspertu stratēģijas un sasniedz augstus novērtējumus, piemērojot to apmācībā izmantotās atalgojuma funkcijas – kaut gan pats atdarinošais modelis apmācības procesā tās neizmanto. Tas vieš pārliecību, ka laikrindu paredzēšanas modeli ir perspektīvs virziens tālākai atdarinošo metožu attīstībai.

3. PRAKTISKĀ REALIZĀCIJA

Šī maģistra darba ietvaros aptuveni 4 mēneši pavadīti EDI robotikas un mašīnuztveres laboratorijā, nodarbojoties ar motivējošā uzdevuma praktiska risinājuma meklēšanu un izstrādi. Rezultātā ar kustības utveršanas metodēm ierakstītas demonstrāciju datu kopas, veikta to priekšapstrāde un pārveidošana neironu tīklu apmācībai derīgā formātā, apmācīti vairāku veidu modeli pie dažādiem hiperparametriem, veikta to autoregresijas procesā ģenerēto trajektoriju ierakstīšana, vizualizācija un darbināšana uz robota – gan simulācijas vidē, gan uz fiziskas aparatūras.

3.1. Izmantotie rīki, aprīkojums un platformas

3.1.1. ROS

3.1.2. Optitrack – aprīkojums un programmatūra

3.1.3. Programmēšanas valoda, bibliotēkas

3.2. Izvēlētā pieeja

Tā kā darba mērķis ir pētīt atdarinošās mašīnmācīšanās metodes un to pielietošanas iespējas praktisku industriālajā robotikā sastopamu vadības problēmu risināšanā, jau no paša sākuma tiek krietni sašaurināts motivējošā uzdevuma potenciālo risinājumu klāsts. Kaut gan iespējams metienus ģenerēt parametriski, izmantojot t.s. “model-based” pieejas – kur tiktu speciāli izveidots fizikā un robota kinemātikā balstīts sistēmas modēlis, un metieni ģenerēti balstoties uz mērķa koordinātēm – šāda tradicionāla metode ir, pirmkārt, dārga, darbietilpīga un slikti visparināma, kā jau apspriests darba teorētiskajā daļā, un, otrkārt, nekādi nepalīdzētu papildināt institūta zināšanu bāzi ar ieskatu atdarinošās mašīnmācīšanās metodēs. Līdzīgi apsvērumi attiecināmi uz stimulēto mācīšanos, kaut gan tādā gadījumā vēl jāņem vērā fakts, ka tehniska realizācija būtu pat sarežģītāka un darbietilpīgāka, nekā zemāk aprakstītie paņēmieni.

Kad nolemts darboties atdarinošās mācīšanās virzienā, pirms lēmums, no kā atkarīgs viss tālākais process, ir demonstrāciju iegūšanas metodes izvēle. Atsaucoties uz teorētiskajā daļā pārskatīto literatūru, var izvirzīt vairākus priekšlikumus:

- 1) fiziska vai simulēta robota iekšējo stāvokļu ierakstīšana – demonstrācijas tiek iegūtas, ar programmu-ekspertu vai (iespējams, simulētu) ārēju fizisku iedarbību vadot robotu pa trajektorijām un saglabājot locītavu pozīciju, ātrumu, paātrinājumu, slodžu datus;
- 2) efektora konfigurāciju ierakstīšana simulācijas vidē – izmantojot VR vai tradicionālu saskarni, izveidot simulācijas vidi, kurā iespējams precīzi reģistrēt vismaz efektora stāvokļa vektoru laikrindas;
- 3) efektora konfigurācija iegūšana no ārejiem novērojumiem – izmantojot kustību uzveršanu vai cita veida fizikālās vides novērojumus (piemēram, video), rekonstruēt gala efektora pozīcijas, orientācijas un satvērējmeħānisma stāvokļa informāciju no netiešu novērojumu laikrindām.

Vistiešākā pārnese no novērojumiem uz robota kontroles sistēmu, kas darbojas locītavu konfigurāciju telpā, būtu metodēm, kurās jau pašas demonstrācijas sastāv no punktiem šajā telpā. Taču no visām metodēm šī ir visciešāk piesaistīta konkrētam fizikālam izpildījumam – demonstrācijas ir atkarīgas no konkrētā robota kinemātikas, un nepieciešams izmantot vai nu pašu robotu, vai precīzu tā simulāciju jau treniņa datu kopas ieguvē. Tas prasa lielu sākotnējo laika un darba ieguldījumu šādas vides sagatavošanā, demonstrāciju iegūšanas process kļūst samērā sarežģīts un iegūstamie rezultāti droši vien būs slikti vispārināmi.

Ierakstot gala efektoru konfigurācijas simulētā vidē nav jāuztraucas par datu kroplojumiem, kas neizbēgami jebkādos no fizikālām sistēmām iegūtos novērojumos. VR cilvēka-datora saskarni padara ļoti tiešu un vienkāršu, ļaujot realizēt gandrīz jebkādas darbības, ko instruktors spētu veikt realitātē. Taču, kaut gan ņemot vērā tikai gala efektoru, tiek ievērojami samazināta datu kopas sasaiste ar kādu konkrētu mehānisku izpildījumu, tik un tā nepieciešams sagatavot adekvātu virtuālu vidi katram uzdevumam.

Fizikālu novērojumu metodēm saikne starp iegūtajiem datiem un robota kontrolera izmantoto informāciju ir visnetiešākā, turklāt jāveic ievērojami pārveidojumi, pirms dati ir pietiekami regulāri, lai tos varētu praktiski izmantot modeļu apmācībā – jārēķinās ar troksni, neregulāru laika parametrizāciju un nepietiekamu sistēmas konfigurācijas aprakstu (ne visus lielumus iespējams tiešā veidā novērot). Pastāv virkne dažādu uztveres metožu un jāmeklē kompromiss starp sistēmas izmaksām/pieejamību un iegūto datu kvalitāti. No aparatūras viedokļa vislētāk būtu izmantot video ierakstu, taču tad modelim jāveic ļoti sarežģīts uzdevums, izlobot no netiešiem novērojumiem robota kontrolei aktuālos parametrus. Var izmantot kustības uztveres tehnoloģiju un īpaši izgatavotus instrumentus, lai visnotāl precīzi reģistrētu visus konfigurācijas aspektus – pat papildinot tos ar slēptiem lielumiem kā paātrinājumiem un precīzu satvērējmehānismu vadības signālu stāvokli. Taču kustības uztveres sistēmas ir saistītas ar augstām izmaksām un ne vienmēr būs pieejamas praksē.

Novērtējot robotikas un mašīnuztveres laboratorijas tehnisko nodrošinājumu un paredzamo lietojumu klāstu – cilvēkam veicamu samērā lielu telpisko izmēru darbību (0,1-1m izmēru diapazona objektu satveršanas, pārvietošanas, metienu, u.c.) atdarināšanu – izdarīta izvēle izmantot laboratorijā pieejamo, augstāk aprakstīto “Optitrack” kustību uztveres aprīkojumu. Ar tā palīdzību iespējams ar samērā augstu precizitāti ierakstīt šāda tipa kustību kinemātiku, un pielāgoties dažādiem uzdevumiem iespējams ātri un vienkārši, piestiprinot markierus manipulatoru atdarinošam instrumentam un citiem objektiem. Galvenais trūkums ir sarežģītāks datu priekšapstrādes process, taču tas tomēr šķiet mazāk sarežģīti, nekā sagatavot simulācijas vidi vai tiešā veidā izmantot pašu robotu demonstrāciju iegūšanai. Attiecīgi demonstrāciju formāts ir jau pārveidoti novērojumi – efektora odometrija Dekarta koordināšu telpā. To priekšapstrādes procesa gaitā nepieciešams papildināt ar satvērējmehānisma vadības signālu.

Kad zināms demonstrāciju formāts, iespējams izdarīt nākamo lēmumu – izvēlēties modelim un robota kontrolerim pieejamo ievades datu formātu. Pastāv divas galvenās

iespējas:

- 1) modelis generē trajektorijas Dekarta koordināšu telpā, kontroleris veic plānošanu un pārveidošanu;
- 2) modelis generē trajektorijas jau locītavu konfigurāciju telpā, kontrolera uzdevums ir to izpilde;

Realizējot otro, būtu stipri atvieglotrs robota kontrolera uzdevums un nebūtu nepieciešams papildus plānošanas solis. Taču tad nepieciešams priekšapstrādes procesā datu kopu stingri sasaistīt ar konkrētu mehānisku realizāciju (īstā robota kinemātiku), faktiski pārnesot inversās kinemātikas un kustības plāna aprēķinu uz priekšapstrādes soli. Turklāt jārēķinās, ka modeļa uzdevums klūst sarežģītāks – liela daļa lietotāju interesējošo trajektorijas aspektu ir atkarīgi no sistēmas stāvokļa konfigurāciju telpā (piemēram, metiena virziens, attālums, mērķa koordinātes). Tāpēc papildus trajektorijas atdarināšanas uzdevumam tam arī jāspēj veikt attēlošanu starp locītavu konfigurācijas un Dekarta telpām, kas var būt visnotāl netriviāli.

Savukārt izvēloties modeli, kas veic regresiju tīri Dekarta telpā, pats modeļa arhitektūras un apmācības jautājums klūst stipri vienkāršāks. Tam jāspēj tikai generēt demonstrāciju kopai tuvu trajektoriju sadalījumu bez papildu pārveidojumiem, un rezultāts ir tikai netieši sasaistīts ar konkrētu mehānisku izpildījumu – demonstrācijām jāņem vērā robota dinamikas un kinemātikas iespēju ierobežojumi, neprasot neiespējamas pozīcijas, orientācijas, ātrumus vai paātrinājumus. Tomēr par šo atvieglojumu no mašīnmācīšanas viedokļa jāmaksā ar daudzkārt sarežģītāku klasisko robota kontroles uzdevumu. Nepieciešams iegūtajām telpiskojām konfigurāciju laikrindām piemeklēt atbilstošu inverso kinemātiku, turklāt bez lēcieniem un, ja metiena precizitātei ir nozīme, ar vismaz aptuveni pareizu laika parametrizāciju (telpas punktiem atbilstošo locītavu konfigurāciju sasniegšana tādā pašā vai tuvā laika momentā) – kas ar ROS platformā pieejamo rīku klāstu nebūt nav vienkārši sasniedzams mērkis.

Izvērtējot darba pamatmērķi – tieši mašīnmācīšanas metožu pētīšanu –, pieejamos resursus un laika ierobežojumus, nolemts modeli konstruēt Dekarta koordināšu telpā kā autoregresoru diskrētā laikā. T.i., katra “darbība” ir vienkārši paredzētais sistēmas stāvoklis nākamajā laika solī. Iespējami MDP formālismam atbilstoši

$$s_{t+1} = \pi_\theta(s_t) \quad (3.1)$$

vai neatbilstoši (laikrindu ekstrapolācijas)

$$s_{t+1} = \pi_\theta(s_t, s_{t-1}, \dots, s_{t-n}) \quad (3.2)$$

modeli, un iepriekš ir grūti spriest, vai MDP stratēģija būs pietiekama konkrēta uzdevuma risināšanai. Tāpēc nolemts sākt ar vienkāršāko MDP atbilstošo stratēģiju klasi – “*behavioural cloning*” pieejā konstruētu klasisku vairāku slāņu neironu tīklu. Kā redzams zemāk, jau ar šādu risinājumu motivējošajā uzdevumā sasniegti pozitīvi (bet ne izsmēloši rezultāti). Metienu precizitātes uzlabojumu meklējumos vispirms papildus attīstīts rekurentais autoregresors – MDP neatbilstošs un izpildes laika ziņā mazāk efektīvs

laikrindu ekstrapolācijas modelis, kas pēc zināmām metrikām sasniedz labākus rezultātus. Tālākas pētnieciskās darbības nolūkos – meklējot veidus, kā ar MDP formālismam atbilstošu, pret trajektorijas garumu laikā un atmiņā konstantu stratēģiju sasniegt RNN pielīdzināmus rezultātus – sākta arī GAN modeļa izstrāde.

Trajektoriju izpilde uz fiziskā robota nav īpaši augsta prioritāte no pētnieciskā viedokļa, un tīri praktiski ierobežojumi pieejamajā Dekarta telpā dotu maršrutu plānošanas programmatūras klāstā nozīmē, ka laikā precīzai izpildei būtu nepieciešams veikt lielu programmēšanas darbu apjomu, kam nav zinātniskās novitātes. Taču, lai provizoriiski novērtētu iegūto trajektoriju atbilstību robota kinemātiskajiem ierobežojumiem, veikta arī izpildes programmatūras prototipa izstrāde – laika paramatrīzāciju šobrīd iespējams rekonstruēt tikai aptuveni, bet sasniegtās pozīcijas un orientācijas var rekonstruēt precīzi. Rezultāts ir pietiekami labs, lai varētu izpildīt metienu paraugdemonstrācijas un pārliecināties par to, ka demonstrāciju iegūšanas un modeļu apmācības metodes ir adekvātas motivējošā uzdevuma realizācijai ilgtermiņā, un modeļu veikspējas novērtēšanas metrikām ir sasaiste ar generēto trajektoriju telpisko izpildījumu.

3.3. Datu priekšapstrāde

Pareizas tīkla un ierakstīšanas programmatūras iestatīšanas gadījumā “Optitrack” rīka iegūtie novērojumi pieejami “ROS” vidē, izmantojot “topic” – tematu – saskarni. Taču, lai no tiem iegūtu demonstrācijas un veiktu modeļu apmācību, nepieciešams veikt virkni priekšapstrādes operāciju. Darba izstrādes gaitā izveidota daļēji automatizēta datu kopu sagatavošanu sistēma, kas balstīta ar “make” sistēmas palīdzību secīgi izsauktos “Python” skriptos. Tie visi pieejami magistra darba “github” repozitorijā, “trajec-tory_extract” direktorijā [45]. Datu korpusi saglabāti atsevišķā repozitorijā [46].

3.3.1. Ierakstu veikšana, sākuma datu kopas ieguve

Lai saglabātu kādā “ROS” tematā publicētos ziņojumus noteiktā laika periodā, var izmantot “rosbag” lietojumprogrammu ar “record” komandu. Argumentos iespējams norādīt, tiesi kurus tematu saturu nepieciešams ierakstīt – ietaupot vietu uzglabāšanas atmiņā. Šajā gadījumā nepieciešamā informācija pieejama augstāk aprakstīto instrumentu – efektora simulatora (“TrashPickup”), ar markieriem aprīkotās pudeles (“Bottle”) un brīvā kritiena trajektorijas beigu indikatora (“CatchNet”) – odometrijās. Lietojumprogrammas izvadā tiek iegūts strukturēts fails “.bag” formātā, ko tiešā viedā izmantot nav vienkārši.

Tāpēc pirmais priekšapstrādes procesa solis ir šī specifiskā formāta datu pārveidošana vispārīgi izmantojamā .csv – “comma separated values” – datu korpusā. To paveic skripts “extract.py”, kas ir visnotaļ vienkāršs, taču aizņem visilgāko laiku visā priekšapstrādes procesā, jo izmantotā “bagpy” bibliotēka, šķiet, nav sevišķi labi optimizēta. Taču šo soli pietiekami veikt vienu reizi pēc katra fizisko metienu ierakstīšanas etapa, kas tiek darīts reti, tāpēc veikspējai nav īpaši lielas nozīmes. Datu korpusa iegūšanas procesā no visa ieraksta tiek atlasītas tikai tālākām operācijam svarīgas kolon-

nas.

3.3.2. *Laika ass reparametrizācija*

Pirmā problēma, ar ko nākas saskarties, strādājot ar kustību uztveres procesā iegūtiem kinemātikas datiem, ir neregulārā laika parametrizācija. Jau iepriekš minēts, ka modeli paredzēts izstrādāt kā autoregresoru ar diskrētu laika soli – kam, ja nepieciešams, lai iegūtā trajektorija spētu atspoguļot ne tikai pozīciju un orientāciju, bet arī to atvasinājums laikā, jāatbilst konstantam laika intervālam. Taču no “*Optitrack*” iegūtajos datos pastāv divas nevēlamas parādības:

- 1) katrā novērojuma ietverta tikai vienā odometrijas tematā pieejamā informācija – t.i., katrā laika momentā zināma tikai viena no triju izsekoto ķermeņu konfigurācijām;
 - 2) intervāli starp novērojumiem ir nejauši, un faktiski sastāv no īsām (dažu milisekunžu) garām virknēm, kurās saņemti novērojumi par vienu no ķermeņiem;
- Abu rezultātā saņemot datu virknes ilustratīvi pieņem sekojošo formu:

$$s_{t1}^a, s_{t2}^a, \dots, s_{tm-1}^b, s_{tm}^b, \quad (3.3)$$

kur s^a, s^b – dažādus ķermeņu aprakstošie konfigurāciju vektori, t_k – nejauši laika momenti, kur $k < j \Rightarrow t_k < t_j$. Lai datus varētu izmantot tālāk, nepieciešams laikrindu pārveidot formā

$$(s_{t'1}^a, s_{t'1}^b, s_{t'1}^c), \dots, (s_{t'p}^a, s_{t'p}^b, s_{t'p}^c), \dots \quad (3.4)$$

kur $t'_k = \frac{n}{f} : n \in \mathbb{N}$ un f – diskrētā laika soļu frekvence. Attiecīgo pārveidojumu veic skripts “*regularize.py*”. Vispirms datu kopa tiek ielasīta atmiņā no *.csv* faila, izmantojot “*pandas*” datu korpusu apstrādes bibliotēku. Tieki atrasti tuvākie sākuma un beigu laiki, kas pieder diskrēto laika soļu rindai:

$$t'_1 = \min(\{t'_k \mid t'_k > t_1\}) \quad (3.5)$$

$$t'_p = \min(\{t'_k \mid t'_p > t_m\}) \quad (3.6)$$

un, izmantojot “*numpy.arange()*” funkciju, tiek generēta diskrēto laika soļu virkne t'_1, t'_2, \dots, t'_p . Datu korpuiss tiek papildināts ar tukšām rindām šajos laika intervālos (kolīzijas novērstas netiek; duplikāti pēc laika tiek atmesti – kolīzijas varbūtība ir ārkārtīgi zema, strādājot ar peldošā komata skaitliem). Pēc tam visas tuksās vērtības datu korpusā tiek aizpildītas ar pēdējo zināmo – pēc t.s. “*forward fill*” interpolācijas metodes. Šādi, protams, dati tiek nedaudz kroplooti, taču pie pietiekami augstām novērojumu frekvencēm rezultējošās nobīdes ir nelielas un grūti manāmas. Visbeidzot, tikai tās korpusa rindas, kuru laika solis pieder pie t'_k virknes, tiek saglabātas. Iegūtais datu korpuiss tātad atbilst diskrētam laika solim un tajā nav tukšu vērtību.

3.3.3. *Atsevišķu demonstrāciju attdalīšana*

Tā kā procesa mērķis ir apmācīt modeli, kas spēj izpildīt konkrētu uzdevumu, nevis vienkārši attdarināt visas kustības, kas ierakstītas metienu viekšanas procesā (tai skaitā

atgriešanos sākuma pozīcijā, nejaušu pārvietošanos, u.t.t), nepieciešams visu ierakstu sadalīt konkrētās demonstrācijās, kas katru satur vienu metienu. Vispārīgā gadījumā šis ir netriviāls – lai neteiktu neiespējams – uzdevums, tāpēc demonstrāciju ievākšana apzināti veikta tā, lai būtu iespējams atrast katru metiena sākumu. Kustību uztveres telpā uz grīdas izvietots markējums sākuma pozīcijai. Katrs metiens sākts, vispirms novietojot efektoru simulatoru virs markējuma un noturot vismaz sekundi. Visā pārējā laikā pievērsta īpaša uzmanība, lai efektoru simulators netiktu novietots šajās koordinātēs. Tādējādi iespējams ar vienkāršu slīdošā loga operāciju atrast vismaz vienu punktu neilgi pirms katras metienas:

$$\begin{aligned} t_{start} \in [t'_k]_1^p : t < t_{start} \wedge |t - t_{start}| < \Delta t_{max} \Rightarrow \\ \Rightarrow x_t \in (x_0 - \delta x, x_0 + \delta x), y_t \in (y_0 - \delta y, y_0 + \delta y) \end{aligned} \quad (3.7)$$

kur sākuma koordinātes x_0, y_0 un pieļaujamie nobīdes intervālu rādiusi $\delta x, \delta y$ tiek atrasti, cilvēkam pārbaudot ierakstīto datu kopu, atrodot markētā sākuma punkta koordinātes ieraksta koordinātu sistēmā un nosakot, cik lielas nobīdes ļaus precīzi identificēt visu (vai vismaz daudzu) trajektoriju sākuma punktus. Ievērojot pietiekami ilgu intervālu starp metieniem – garāku par $\frac{steps}{f}$ ar empīriski izvēlētu soļu skaitu $steps$ – katras demonstrācija tad ir vienkārši

$$t_j \in [t'_k]_{start}^{start+steps} \quad (3.8)$$

Sekmīgai demonstrāciju iegūšanai tātad ir nepieciešams katru reizi mainot sākuma markķera novietojumu telpā vai demonstrāciju iegūšanas stilu (īsākus, garākus laika intervālus pirms/pēc metienas) nomainīt arī sākuma koordinātes x_0, y_0 , sākuma pozīciju intervālu rādiusus $\delta x, \delta y$ un soļu skaitu $steps$. Katras demonstrācija tiek saglabāta atsevišķā .csv failā.

3.3.4. Trajektoriju gludināšana

Ar laika ass reparametrizāciju nepietiek, lai novērstu visas neregularitātes iegūtajos datos. Odometrijas dati saņemti sadrumstalotā formā, turklāt, šķiet, ka laika izkliede starp “ROS” vidē saņemtajiem punktiem ir lielāka, nekā reālajiem novērojumiem – novērojama pakāpieniem vai zāga asmenim līdzīgu kontūru esamība ierakstos. T.i., fiktīvas augstas frekvences nesinusoidālu svārstību komponentes.

Izvērtējot ierakstīto trajektoriju kvalitatīvos aspektus (salīdzinot līganus metienus video ierakstā un to raustītāš reprezentācijas trajektoriju datos), nospriests, ka tās ne-sastāda fiziskajā trajektorijā novē-rojamu parādību bet gan ieraksta procesā pievienotu datu kroplojumu. Tāpēc pirms modeļa apmācības tās nepieciešams likvidēt. To paveic skripts “smoothing.py”, kurā piemērots t.s. “slīdošās vidējās vērtības” aprēķins pēc sekojošā vienādojuma:

$$\vec{x}'_t = \frac{1}{2m+1} \sum_{i=t-m}^{t+m} \vec{x}_i \quad (3.9)$$

kur \vec{x} – novērojuma vektors ar tām vērtībām, kam tiek piemērota gludināšana.

3.3.5. Kritisko punktu noteikšana un papildu signāli

Šādi ir iegūtas gludinātas, nošķirtas kinemātiku trajektorijas. Taču katrā no tām metiens var sākties pēc dažāda garuma stacionāra perioda, trajektorija satur arī nejaušas kustības pēc metiena beigām, kas traucētu apmācīt modeli, un nav nekādas informācijas par satvērējmehānisma stāvokli (ierakstītas tikai efektora, pudeles un gala stāvokļa markiera odometrijas; sk. sadaļu par kustības uztveres aprīkojumu). Turklat, lai būtu iespējams parametrizēt metienus pēc mērķa koordinātēm, nepieciešams katru demonstrāciju papildināt ar paredzamo pudeles maršruta krustpunktu ar grīdu.

Kritisko punktu meklēšanu veic skripts “*threshold.py*”. Pirmais un vienkāršākais uzdevums ir atrast brīvā kritiena beigu nosacījumu. Brīvā kritiena posms ir nepieciešams nākamajā apakšnodaļā aprakstītā regresijas un mērķa koordināšu noteikšanas soļa izpildei. Lai neņemtu vērā pudeles piezemēšanos tīklā, zem tā novietots beigu pozīcijas markieris (vecais satveršanas tīkls, “*Optitrack*” kontekstā – ķermenis “*CatchNet*”). Lidojuma ballistiskā fāze uzskatāma par pabeigtu, kad pudeles x koordinātē vismaz vienu reizi sasniegusi šo markieri:

$$f_{passed}(t) = \begin{cases} 0 & \text{ja } \forall u < t, x_{Bottle}(u) \geq x_{CatchNet}(u) \\ 1 & \text{citādi} \end{cases} \quad (3.10)$$

Pārējo punktu meklēšanai nepieciešams iegūt pozīciju atvasinājuma aproksimāciju. Diskrētai virknei, protams, atvasinājumi nepastāv. Taču nepārtrauktajai telpiskajai trajektorijai, no kurās iegūti diskrētie novērojumi, atvasinājumi pastāv. Vienkāršākais veids, kā tos atrast, būtu izmantot novērojumu starpības:

$$x'(t) \approx \frac{x(t'_{k+1}) - x(t'_k)}{\Delta t'} = f \cdot (x(t'_{k+1}) - x(t'_k)) \quad (3.11)$$

Ja atvasinājumu absolūtās vērtības konkrētās mērvienībās nav svarīgas, konstanti f – novērojumu frekvenci, šajā gadījumā 100 Hz – nav nepieciešams ņemt vērā. Empīriski novērots, ka pēc šādas metodes aproksimējot atvasinājumu, katrā solī pieaug svārstību amplitūda. Varētu aprēķinātajam “atvasinājumam” izmantot to pašu “slīdošās vidējās vērtības metodi”, kas aprakstīta pie gludināšanas. Praksē izrādās, ka pietiekami labi strādā sekjošais, stipri vienkāršotais novērtējums, kas apvieno diferences un gludināšanas solus:

$$x'_t \propto \overline{x}'_t = \sum_{i=t}^{t+m} \vec{x}_i - \sum_{i=t-m}^t \vec{x}_i \quad (3.12)$$

Piemērojot šo soli divreiz, iespējams atrast arī pozīcijas otrā atvasinājumam – paātrinājumam – proporcionālu vērtību. Lai noteiktu, vai pudele ir brīvajā kritienā, tiek piemērota tāda pati sliekšņa funkcija ar histerēzi – t.i., visas vērtības pēc pirmās, kas ir 1, arī ir 1 – pudeles un efektora simulatora savstarpējās distances atvasinājuma aproksimatoram:

$$f_{freefall}(t) = \begin{cases} 0 & \text{ja } \forall u < t, \overline{\left[\|\vec{r}_{Bottle}(u) - \vec{r}_{TrashPickup}(u)\| \right]_u'} < \bar{v}_{freefall} \\ 1 & \text{citādi} \end{cases} \quad (3.13)$$

kur \vec{r}_{Bottle} apzīmē pudeles novietojuma vektoru, u.t.t. Lai noteiktu, vai satvērēj-mehānisms ir sācis atlaisties, tas pats tiek darīts ar šī attāluma otrā atvasinājuma aproksimatoru:

$$f_{release}(t) = \begin{cases} 0 & \text{ja } \forall u < t, \overline{\left[\|\vec{r}_{Bottle}(u) - \vec{r}_{TrashPickup}(u)\| \right]_u''} < \bar{a}_{release} \\ 1 & \text{citādi} \end{cases} \quad (3.14)$$

Visbeidzot, lai atrastu paša metiena – ātras kustības – sākuma momentu, slieksnis tiek piemērots efekторa simulatora pozīcijas atvasinājuma novērtējumam (ievērojot, ka iepriekš “atvasināta” tiek distances vektora norma, bet šoreiz tiek meklēta norma vektora “atvasinājumam”):

$$f_{moving}(t) = \begin{cases} 0 & \text{ja } \forall u < t, \|\overline{\left[\vec{r}_{TrashPickup}(u) \right]_u'}\| < \bar{v}_{moving} \\ 1 & \text{citādi} \end{cases} \quad (3.15)$$

Slieksņa konstantes $\bar{v}_{freefall}, \bar{a}_{release}, \bar{v}_{moving}$ tiek piemeklētas empīriski. Pieredze liecina, ka process ir diezgan robusts pret šīm vērtībām. Tālākā darbībā varētu būt vērts ievākt detalizētu informāciju par šo konstanšu izvēles ietekmi uz metienu precīzitāti, taču jau pēc vizuālas laikrindu grafiku novērtēšanas izvēlēti skaitļi izrādījušies pietiekami precīzi, lai būtu iespējams realizēt pudeles metiena paraugdemonstrāciju ar fizisku robotu. Protams, it sevišķi satvērējmehānisma gadījumā, pastāv iespēja iegūt precīzākus datus, papildinot demonstrāciju ierakstīšanas aprīkojumu ar kādu sensoru, kas var nomērit šīs vērtības tiešā veidā.

3.3.6. Brīvā kritiena ekstrapolācija, mērķa koordināšu noteikšana

Demonstrāciju ievākšanas procesā, ja vien netiek ļoti cieši kontrolēti metiena parametri (piemēram, visu laiku metot nelielā mērķi) tīri dabiski rodas ievērojama dispersija pudeles telpiskajās trajektorijās. To varētu pilnībā ignorēt un apmācīt modeli bez papildu brīvības pakāpēm vienkārši atdarināt kādu paraugu no kopas, taču no pētnieciskā viedokļa interesantāk ir jau uzreiz paredzēt iespēju parametrizēt metienus pēc mērķa koordinātēm. Protams, tā kā process neparedz demonstrāciju ierakstīšanu ar zināmu galamērķi, šīs koordinātes nav zināmas – tās ir nepieciešams noteikt.

Lai to darītu, izveidots skripts “*regression.py*”, kas veic ekstrapolāciju pudeles trajektorijas brīvā kritiena fāzei un nosaka aptuveno punktu telpā, kur tā šķērsotu grīdas plakni. Par atskaites punktu pieņemta beigu pozīcijas markiera z-koordināte z_{ref} . Vispirms tiek atrasta demonstrācijas brīvā kritiena fāze pēc nosacījuma

$$\mathcal{D}_{fi} = \{s \in \mathcal{D}_i \mid f_{freefall}(t(s)) \wedge \neg f_{passed}(t(s))\} \quad (3.16)$$

kur \mathcal{D}_i – demonstrācijas novērojumu kopa, \mathcal{D}_{fi} – tās apakškopa, kuras novērojumos pudeles konfigurācijas sastāda ballistisku trajektoriju. Jāņem vērā, ka šādi iegūtā trajektorija tikai aptuveni atbilst īstajai, jo faktiskais pudeles smaguma centrs var ašķirties no kustību uztveres procesā izmantotās cietā ķermēņa definīcijas centroīdas. Taču līdz šim ievāktajās trajektorijās nav manītas lielas nobīdes – tālāk aprakstītās idealizētās regresijas līknes ļoti tuvu atbilst faktiskajām laikrindām. Tātad, pat ja centru nobīdes inducēta svārstību komponente šajā signālā pastāv, tā ir pārāk neliela, lai to varētu pamānīt – un, visticamāk, pie šobrīd sagaidāmās procesa precīzitātes lielu iespaidu uz rezultātu neatstāj.

Lai atrastu mērķa koordinātes, var izmantot vienkāršāko ballistiskās trajektorijas modeli. Pieņem, ka xy plakne ir precīzi normāla gravitācijas paātrinājuma vektoram, tāpēc šīm koordinātēm piemēro lineāro regresiju:

$$x_{pred} = \theta_{x1}(t) + \theta_{x0} \quad (3.17)$$

$$y_{pred} = \theta_{y1}(t) + \theta_{y0} \quad (3.18)$$

savukārt z-koordinātes vērtības ekstrapolē, veicot kvadrātisko regresiju – jeb lineāro regresiju ar divām mainīgā parametra t (laika) pakāpēm:

$$z_{pred} = \theta_{z2}(t^2) + \theta_{z1}(t) + \theta_{z0} \quad (3.19)$$

Laika momentu, kad kritiens krusto grīdas plakni, var noteikt, atrodot sekojošā vienādojuma lielāko sakni:

$$\theta_{z2}(t_{-1}^2) + \theta_{z1}(t_{-1}) + \theta_{z0} - z_{ref} = 0 \quad (3.20)$$

Taču, tā kā praksē demonstrācijas ir garākas nekā lidojumi, var arī aprēķināt šo vērtību visiem punktiem datu korpusā un atrast pēdējo pozitīvo izteiksmes vērtību. Tas, protams, ir asimptotiski lēnāk, taču praktiski “*pandas*” bibliotēkā šādas operācijas ir ļoti ātras. Tad mērķa koordinātes atrod, ievietojot šo laika vērtību regresijas vienādojumos:

$$x_{target} = \theta_{x1}(t_{-1}) + \theta_{x0} \quad (3.21)$$

$$y_{target} = \theta_{y1}(t_{-1}) + \theta_{y0} \quad (3.22)$$

$$z_{target} = \theta_{z2}(t_{-1}^2) + \theta_{z1}(t_{-1}) + \theta_{z0} \quad (3.23)$$

3.3.7. Sākuma koordināšu kompensācija

Visas demonstrācijas nav iegūtas no tā paša punkta kustību uztveres rīka koordinātu sistēmā, un tas var nesakrist ar robota efektora sākuma koordinātēm. Tāpēc, lai varētu apmācīt modeli ar vairākās epizodēs iegūtiem novērojumiem, un izmantot šo modeli, vadot robotu, kas nav novietots tādā pašā telpiskā pozīcijā, nepieciešams veikt koordināšu sistēmas centrēšanu.

Apsvērti divi varianti, centrēšana pēc metiena sākuma un mērķa. Lai iegūtu metiena sākuma punktu, izmantota iepriekš aprakstītā sliekšņa funkcija:

$$t_{moving} = \min(\{t \mid f_{moving}(t) = 1\}) \quad (3.24)$$

$$\vec{r}_0 = \vec{r}_{t_{moving}} \quad (3.25)$$

Bet metiena beigu punktu iegūst no mērķa koordinātēm:

$$\vec{r}_0 = (x_{target}, y_{target}, z_{target}) \quad (3.26)$$

Tad korekciju ievieš, vienkārši atņemot atskaites pozīciju no novērotajām:

$$\vec{r}_{tnorm} = \vec{r}_t - \vec{r}_0 \quad (3.27)$$

3.3.8. Apvienošana, stāvokļu pāreju veidošana, jaukšana

Visu iepriekšējo solu rezultātā iegūts liels skaits atsevišķu demonstrāciju, kas katrā ietverta savā failā. Lai tās varētu izmantot modeļa apmācībā, šīs datu korpusa vērtības jāielasa atmiņā tenzora formā. Tā kā kopējais datu apjoms nav ārkārtīgi liels, iespējams izveidot datu kopu, kas ietver visas demonstrācijas uzreiz. Tādu uzdevumu veic pēdējais skripts – “*preprocess_dataset.py*”, kas atrodams repozitorija “*models/*” direktorijā. Šeit arī notiek laikrindas pārveidošana stāvokļu pāreju formātā:

$$s_t, s_{t+1}, s_{t+2}, \dots \rightarrow (s, s')_t, (s, s')_{t+1}, \dots \quad (3.28)$$

ar iespēju veidot arī datu kopas, kurās katram rezultējošam stāvoklim zināmi vairāki iepriekšējie. Šī funkcionalitāte ieviesta, sākot strādāt pie nākamā posma – GAN modeļu izstrādes, kur diskriminatoram var būt nepieciešamas garākas virknes:

$$s_t, s_{t+1}, \dots, s_{t+n}, \dots \rightarrow (s, s'^1, s'^2, \dots, s'^n)_t, \dots \quad (3.29)$$

Šajā posmā katrs novērojums tiek reducēts uz tikai modelim nepieciešamo kolonnu apakškopu. Pastāv iespēja pievienot laika signālu, bez kuras sākotnēji veikti modeļu apmācības mēģinājumi. Daļa demonstrāciju tiek ietvertas treniņa datu kopā, daļa – testa un validācijas kopā. Attiecība starp to izmēriem ir iestatāma. Rezultāts tiek sa- glabāts parametriski nosauktos datu kopas *.csv* failos, kuru unikālie identifikatori iegūti, piemērojot jaucējfunkciju korpusa ģenerēšanā izmantoto demonstrāciju failu nosaukumu kopai.

Tā kā to, vai nepieciešams datu kopu jaukt, nosaka konkrētā modeļu apmācības vai validācijas uzdevuma specifika, šis solis tiek atstāts jau nākamo solu pārziņā. Failā “*helpers.py*” definētas dažādas funkcijas, kas izmantotas vairākās vietās. Viena no tām ir “*data_and_label*”, kas nolasa sagatavoto treniņa datu kopu, sadala to modeļa ievadu (“*input data*”) un vēlamo rezultātu (“*label*”) tenzoros. Ja nepieciešams, šīs kopas elementu secība tiek sajaukta.

3.4. Modeļu realizācija

Pateicoties darba ietvaros izmantoto skaitlošanas bibliotēku piedāvātajām iespējām, neironu tīklu modeļu izstrāde programmatūras kodā ir samērā vienkārša. Par spīti šo modeļu lielajiem parametru skaitiem un sarežģītajiem aprēķiniem – piemēram, mērķa funkcijas gradientu meklēšanai vai optimizācijas metodēm, kas sastāv no vairākiem, dinamiskiem etapiem – mūsdienās iespējams konfigurēt un apmācīt neironu tīklu ar dažām augsta abstrakcijas līmeņa komandām. Līdz ar to viena pētnieciska darba ietvaros ir bijis iespējams izstrādāt divu dažādu un radikāli atšķirīgu veidu regresorus – klasisku dziļo neironu tīklu un rekurento autoregresoru – un uzsākts darbs arī pie pirmā soļa tālākiem pētijumiem – MDP formālismam atbilstoša GAN modeļa.

Viss modeļu apmācības kods ir atrodams magistra darba repositorijā, direktorijā “*models/*”. Tas ir organizēts atsevišķos skriptos. Viena no īpatnībām, ar ko nākas saskarties, strādājot eksperimentālā zinātnes nozarē, ir visu darbību mainīgā un iteratīvā daba. Uzrakstītais kods nav sevišķi apjomīgs, bet provizoriskas izpētes un strukturētu eksperimentu gaitā mainot paņēmienus modeļu uzbūvē, apmācībā, datu priekšapstrādē un izvades failu formātos, nepārtraukti tiek veiktas izmaiņas. Bieži vien pat lielas programmas daļas tiek pilnībā pārrakstītas vai atmestas. Tāpēc grūti šādu kodu organizēt pēc programminženierijas labās prakses. Tā vietā, katra tipa modeļa apmācībai ir sava skripts, kas satur konfigurācijas mainīgos un visas funkcijas, kas netiek precīzi dublētas visur – pat tad, ja pastāv ievērojamas līdzības starp tām dažādu modeļu izpildījumos.

3.4.1. Parastais neironu tīkls

Pirmais no izstrādātajiem variantiem un tas, ar kuru strādāts visvairāk, ir klasiskais “*feedforward*” jeb viena virziena dziļais neironu tīkls ar pilnībā savienotiem slēptiem slāņiem. Šī projekta ietvaros šāda pieeja visu pirmkoda un datu failu nosakumos apzīmēta ar “*naiveBC*” – “*naive behavioural cloning*”, “naivā uzvedības klonēšana”. Tas pilda klasisku MDP stratēģijas (vai laktindu ekstrapolācijas ar vienu stāvokli garu vēsturi) uzdevumu formā

$$a_t = s'_t = \pi_\theta(s_t) \quad (3.30)$$

Līdz ar to treniņa uzdevuma mērķa funkciju iespējams definēt formā

$$\mathcal{L}_{policy} = f(s, s', \pi_\theta(s)), (s, s') \in \mathcal{D} \quad (3.31)$$

Pastāv dažādas iespējas mērķa funkcijas izvēlē. Tā kā šajā gadījumā modeļa izvads ir nepārtrauktu vērtību vektors, atkrit dažādas kategoriskās klūdas un varbūtību sadalījumu distances metrikas, kādas izmantotas daudzos no teorētiskajā daļā apskatītajiem pētījumiem. Tas pats sakāms arī par diskrētu darbību kopu stratēģijām paredzētām regularizācijas metodēm. Tā vietā nākas izvēlēties kādu no regresijas mērķiem paredzētajiem novērtējumiem. Pirmā iespēja būtu izmantot klasisko kvadrātu summas metodi, kas ir pamatā jau priekšapstrādes sadalītā apskatītajā lineārās regresijas modeļu ieguvei (atceroties, ka s, s' apzīmē n -dimensionālus vektorus):

$$\mathcal{L}_{ss}(\vec{s}, \vec{s}', \theta) = \sum_{i=1}^n (s'_i - \pi_\theta(s)_i)^2 \quad (3.32)$$

Taču jau izsen zināms, ka šī metode nav sevišķi noturīga pret lielām nobīdēm atsevišķu dimensiju dispersijās – izlēcējiem – un piedāvātas alternatīvas mērķa funkcijas dažādu optimizācijas uzdevumu risināšanai, no kurām šeit izvēlēta izgudrotāja P. Dž. Hūbera vārdā nosauktā “*huber loss*” funkcija [25]:

$$\mathcal{L}_\delta = \sum_{i=1}^n \begin{cases} \frac{1}{2}(s'_i - \pi_\theta(s)_i)^2, & \text{ja } |(s'_i - \pi_\theta(s)_i)| < \delta \\ \delta \cdot \left(|(s'_i - \pi_\theta(s)_i) - \frac{\delta}{2}| \right) & \text{citādi} \end{cases} \quad (3.33)$$

Izmantotajā *tensorflow.keras* bibliotēkā šī funkcija ir iebūvēta un pēc noklusējuma iestatīta ar parametru $\delta = 1$ [58]. Papildus veikti eksperimenti arī īpaši šim uzdevumam konstruētām mērķa funkcijām. Viens no izmēģinātajiem papildinājumiem bijis jau teorijas daļā aplūkotajā *QuaterNet* izmantota kvaternionu normas regularizācija [41]

$$\mathcal{L}_q(\theta) = \lambda_q * (\|q^\theta\| - 1)^2 \quad (3.34)$$

kur q^θ apzīmē modeļa ģenerētā izvada $\pi_\theta(s)$ tos elementus, kas kopā veido kvaternionu, bet λ_q – svara koeficientu. Šī regularizācija izmantota, jo pirmajos mēģinājumos apmācīt modeli izmantot kvadrātu summas un Hūbera funkcijas, iegūtās kvaternionu vērtības bijušas ļoti atskirīgas no 1-normētiem versoriem, kas apzīmē telpisko orientāciju robotu vadības kontekstā.

Vēl viena speciāli šim uzdevumam paredzēta mērķa funkciju saime, kas izmēģināta agrīnās projekta fāzēs, ir tradicionālās regresijas funkcijas papildināšana vai aizstāšana ar dažādu metriku piemērošanu dažādiem izvades vektora elementiem, piemēram

$$\mathcal{L}_{combined}(s, s', \theta) = \lambda_p \|r^\theta - r^{s'}\|^2 + \lambda_q \|q^\theta - q^{s'}\|^2 - \lambda_g g^{s'} \log(g^\theta) \quad (3.35)$$

kur $r^\theta, r^{s'}$ apzīmē $\pi_\theta(s)$ un s' pārvietojuma vektora komponentes, $g^\theta, g^{s'}$ – to satvērējmehānisma (“*gripper*”) konfigurāciju (atvērts/aizvērts), bet $-x \log(\hat{x})$ ir savstarpejās entropijas mērķa funkcija \mathcal{L}_H , kas parasti tiek izmantota diskrētas klasifikācijas tipa uzdevumos [57]. Tas darīts ar mērķi atvieglot modeļa apmācību, jau uzreiz nokodējot dažado izvades vektora elementu savstarpejās sakarības – pirmajos eksperimentos modeļa izvadā iegūtie rezultāti nav pat aptuveni sakrituši ar demonstrāciju kopas datiem.

Taču vēlāki eksperimenti atklājuši, ka abas augstāk minētās problēmas var novērst, vienkārši izmantojot citus hiperparametrus modeļa apmācības procesā (perceptronu skaitu, apmācības ātrumu, treniņa epohu skaitu). Tāpēc visiem rezultātu analīzes sadaļā apskatītajiem “*naiveBC*” modeļiem izmantota neizmainīta Hūbera funkcija.

Lai instancētu pašu modeli, izmantota *tensorflow.keras.Sequential* klases piedāvātā augsta līmeņa saskarne. Šīs klases konstruktora metodei argumentā iespējams nodot sarakstu ar *tensorflow.keras.layers.Layer* apakšklašu instancēm, kas katrā apzīmē vienu modeļa slāni. Atgrieztajā vērtībā tad tiek saņemta *tensorflow.keras.Model* klases instance, kuras aprēķinu grafā ietverti visi šie slāņu objekti.

Pēc sākotnējiem izmēģinājumiem konstatēts, ka uzdevumam piemērots ir modelis ar diviem vienāda platuma slēptiem slāņiem, kam katram piemērota “*Rectified Linear Unit*” nelineārā aktivācijas funkcija [60]:

$$\sigma_{ReLU}(x) = \begin{cases} x, & \text{ja } x > 0 \\ 0 & \end{cases} \quad (3.36)$$

Pilnīgi savienotu slāni *keras* vidē apzīmē klase *keras.layers.Dense*. Aktivācijas funkcijas šajā kontekstā tiek modelētas kā atsevišķi slāņi, un tos pievieno ar *keras.layers.ReLU* instancēm. Ievaddatu formātu definē *keras.layers.Input*, kuras konstruktora iespējams norādīt ievaddatu formu, bet pēdējā norādītā slāņa perceptronu vektors sastāda modeļa izvadu. Lai izmantotu *keras* iebūvēto treniņa metodi *Model.fit()*, nepieciešams definēt optimizatoru un mērķa funkciju, izsaucot *Model.compile()* metodi. Šajā solī arī tiek noteikti modeļa parametru izmēri un sagatavoti tenzori to vērtībām, ja nav iepriekš atsevišķi norādīta modeļa ievada tenzora forma. Iespējams reģistrēt agrīnas apstāšanās nosacījuma funkciju (*tf.keras.callbacks.EarlyStopping* instanci), lai pārtrauktu treniņa procesu, balstoties uz pārbaudes datu kopā iegūtu modeļa novērtējumu un novērstu pārpielāgošanos. Šī funkcija jānodod kopā ar citiem argumentiem – treniņa datu kopu, validācijas datu kopu, epohu skaitu, u.t.t – izsaucot *Model.fit()* funkciju, kas pilnībā automatizē visu modeļa apmācības procesu.

Pēc apmācības modelis tiek saglabāts ar aprakstošu nosaukumu. Skriptā paredzēta iespēja pārbaudīt, vai pastāv ar atbilstošajiem parametriem jau iepriekš apmācis modelis pastāv modeļu direktorijā un izlaist treniņa soli. Pēc tam tiek veikti divi validācijas procesa soli – trajektoriju ģenerēšana uz gadījuma mērķa koordinātēm un salīdzinājumi gan ar treniņa, gan testa datu kopām. Šis process detalizēti aprakstīts zemāk.

3.4.2. Rekurentais neironu tīkls

Pētot klasiskā neironu tīkla sasniegto rezultātus, konstatēts, ka dažus trajektorijas parametrus – piemēram, precīzu satvērējmehānisma atlaišanas brīdi – šādam modelim ir grūrības atdarināt. Vēlāk atkārtojot eksperimentus ar citiem hiperparametriem rezultātus izdevies uzlabot, taču pirms tam jau nolemts papildināt darba ietvaros izstrādāto risinājumu klāstu ar sarežģītākas arhitektūras modeli. Atkāpjoties no stingrā MDP formālisma un salīdzinot darba uzdevumu ar citiem, kļuvis skaidrs, ka šādai atdarināšanai pastāv lielas līdzības ar laikrindu ekstrapolāciju. Tāpēc izvēlētā alternatīvā pieeja ir rekurenta autoregresora izstrāde.

Kā jau minēts darba teorētiskajā daļā, pastāv vairākas labi zināmas un visnotaļ spējīgas rekurento tīklu arhitektūras. Divas no tām – LSTM un GRU – iebūvētas *keras* vidē kā *Layer* apakšklases. Papildus iespējams arī realizēt vienkāršu pilnīgi savienotu rekurento tīklu. Šīs klases ietver realizāciju iterācijai, inicializācijai un slēptā stāvokļa izvada vektora padošanai atpakaļ rekurentā modeļa ievadā. Līdz ar to programmētājam nav jādomā par šo sarežģīto sistēmas aspektu – vienīgais, ko nepieciešams precizēt, ir izvadā atgriezto datu formāts. Ar argumenta *return_sequences* palīdzību tiek norādīts, vai modeļa izvads ir viens vektors, vai vektoru virkne, kuras garums ir vienāds ar ievadā

saņemto laika soļu skaitu.

Tā kā atdarinošās mācīšanās kontekstā tiek strādāts ar nelielām datu kopām, un zināms, ka GRU pārspēj LSTM rezultātus šādā situācijā, par modeļa pamatu izvēlēts *layers*. *GRU* slānis. Analogiski augstāk aprakstītajam klasiskajam neironu tīklam tad iespējams konstruēt rekurento neironu tīklu. Tāpat kā iepriekš, apmācība ir ļoti vienkārši konfigurējama un izsaucama.

Galvenos sarežģījumus rekurenta modeļa realizācijā rada pareizi strukturētu ievad-datu sagatavošana. Izņemot īpašo gadījumu, kad tiek strādāts ar vienāda garuma laik-rindām, nepieciešams nodrošināt, ka viena no tenzora asīm ir neregulāra garuma. Šeit ļoti noderīgi izrādās nesen ieviestie “robainie tenzori” [59], kas paredzēti īpaši šim lietojumam. Tie nodrošina visu *tensorflow* operāciju saderību ar patiešām neregulāras formas tenzoru – bez aizpildītām fiktīvām vērtībām vai nepieciešamības programmētājam izstrādāt pašam savu treniņa procedūru.

Attiecīgi, izņemot pašu modeļa deklarāciju un pēcāko trajektoriju ģenerēšanu vali-dācijas mērķiem, galvenā atšķirība starp rekurentā un klasiskā tīkla realizācijas skriptiem ir datu kopas sagatavošanas funkcija. Pirmkārt, tā kā rekurentais tīkls uzreiz apstrādā veselu trajektoriju, datu kopas elementus nedrīkst sajaukt – vismaz ne pirms tam, kad iegūtas pilnas trajektorijas. Otrkārt, nepieciešams atšķirt katras trajektorijas sākumu un beigas, lai varētu veidot atsevišķu laikrindu datu tenzorā. Treškārt, nepieciešams ievaddatu laikrindai piekārtot vēlamo vērtību laikrindu, t.i,

$$(s_1, s_2, \dots, s_{n-1}) \rightarrow (s_2, s_3, \dots, s_n) \quad (3.37)$$

Funkcija *create_sequential_dataset* veic visus trīs uzdevumus un atgriež divus ten-zorus – treniņa ievades datus un vēlamās vērtības. Demonstrētu secību jaukt nav ne-pieciešams, jo visa datu kopa sadalīta sērijās (“*batches*”), kas katras satur vairākas demon-strācijas. Pie katras no tām tiek vienreiz aprēķināti mērķa funkcijas gradienti un piemēroti modeļa parametriem. Sērijas tiek automātiski jauktas savā starpā. Jaukšanas procedūrai ir lielāka nozīme pie klasiskā neironu tīkla, jo citādi katras sērija, iespējams, saturēs tikai vienas demonstrācijas datus – kas varētu novest pie optimizācijas procesa “lēkāšanas”.

3.4.3. Tālāka darbība – GAN

Kaut gan šī darba pētniecisko daļu galvenokārt sastādījusi datu ieguves, priekš-apstrādes, klasiskā un rekurentā modeļa apmācības un validācijas procesu izstrāde, bal-stoties uz teorētiskajā literatūrā gūtām atziņām par vienu no galvenajiem virzieniem tālākiem pētījumiem iezīmēta ģeneratīvā pretinieku tīkla realizācija kā paņēmiens, kas varētu apvienot vienkāršu un konstantā laikā izpildāmu stratēģijas modeli ar daudz spē-jīgāku apmācības metodi. Attiecīgi uzsākta arī GAN modeļa realizācijas izstrāde.

Atšķirībā no abiem augstāk minētajiem variantiem, kur iespējams izmantot *keras.Sequential* šablonu klasi, GAN apmācības procesā nepieciešams izmantot divus atsevišķus modeļus un sarežģītāku mērķa funkcijas sakārību ar to parametriem. Līdz ar to ne-pieciešams citādi strukturēt apmācības programmu.

Vispirms tiek instancēti divi modeļi izmantojot *keras functional API*, kas ļauj kon-

struēt skaitlošanas grafu ar secīgu slāņu reprezentācijas objektu izsaukšanu. Pirmais modelis – ģenerators π_θ , kas ir arī rezultējošā stratēģija – līdz šim veiktajos eksperimentos ir tīcīs strukturēts tāpat, kā klasiskais neironu tīkls. Otrs modelis – diskriminators d_ϕ – kalpo kā mērķa funkcija ģeneratora apmācībā, un ievadā saņem vai nu stāvokļu pāreju, vai garāku virkni ar stāvokļiem. Neironu tīkla iekšēja struktūra arī pagaidām ir tāda pati, kā klasiskajam neironu tīklam. Galvenā atšķirība abos gadījumos ir tāda, ka izmēģināta arī “*Leaky ReLU*” aktivācijas funkcija, kas ievieš nelielu gradientu citādi plakanos mērķa funkcijas atvasinājuma apgabalos

$$\sigma_{\text{LeakyReLU}}(x) = \begin{cases} x, & \text{ja } x > 0 \\ -k, & 0 < k \ll 1 \end{cases} \quad (3.38)$$

Lai veiktu apmācību, nepieciešams lokāli definēt procedūru. Vienu treniņa soli ietver procedūra *train_step*, kas, pateicoties *tensorflow.function* dekoratoram, tiek kompilēta uz daudzkārt ātrāku reprezentāciju pirms izpildes. Visas diferencējamās darbības tiek ietvertas *Python* konteksta blokā, kura ietvaros divi *GradientTape* objekti – viens katram modelim – ieraksta mērķa funkciju parciālos atvasinājumus pret to parametriem. Iegūtie gradienti tiek izmantoti, lai izmainītu modeļu parametru vērtības.

Pats diferencējamais etaps sastāv no diviem soļiem. Vispirms tiek izsaukta ģeneratora autoregresijas funkcija (vienu no *generator_multi_iterate* versijām atkarībā no tā, vai tiek izmantots viens vai vairāki iepriekšējie stāvokļi). Lai būtu iespējams kompilēt visas darbības uz ātri izpildāmu grafu reprezentāciju, svarīgi izmantot tikai ar tenzoru saskarni savietojamas datu struktūras. Šī funkcija atgriež tenzoru ar ģeneratora ievadiem un izvadiem

$$s_1 \rightarrow ((s_1, s_2^\theta, \dots, s_m^\theta), \dots, (s_{n-m}^\theta, \dots, s_n^\theta)) = \tau_{gen} \quad (3.39)$$

kur

$$s_n^\theta = \begin{cases} \pi_\theta(s_1), & \text{ja } n = 2 \\ \pi_\theta(s_{n-1}) \text{ citādi} & \end{cases} \quad (3.40)$$

No treniņa datu kopas tiek sagatavots tādas pašas formas tensors ar ierakstītām stāvokļu pārejām τ_{dem} . Diskriminators tiek izsaukts uz abiem tenzoriem ar klasifikācijas uzdevumu

$$d_\phi : (s_1, s_2^\theta, \dots, s_m^\theta) \rightarrow \mathbb{R} \quad (3.41)$$

un tam tiek aprēķināta mērķa funkcijas vērtība

$$\mathcal{L}_d = \sum_{pred \in \tau_{gen}} \mathcal{L}_H(pred, 0) + \sum_{obs \in \tau_{dem}} \mathcal{L}_H(obs, 1) \quad (3.42)$$

kur \mathcal{L}_H ir jau iepriekš aprakstītā savstarpējās entropijas funkcija. Tā kā ģeneratora uzdevums ir pretējs, bet tā parametri ietekmē tikai ģenerēto trajektoriju klasifikāciju, mērķa funkcija ir pretēja:

$$\mathcal{L}_\pi = \sum_{pred \in \tau_{gen}} \mathcal{L}_H(pred, 1) \quad (3.43)$$

Tāpat kā klasiskā neironu tīkla variantā, izmēģinātas dažu veidu regularizācijas – kvaternionu normas, attāluma starp ģenerētās trajektorijas soliem – taču nopietna to iedarbības izpēte atstāta turpmākai pētnieciskai darbībai.

3.5. Validācijas datu ģenerēšana, simulācija, vizualizācija

Populāriem un plaši pētītiem mašīnmācīšanās uzdevumiem – piemēram, attēlu klasifikācijai – pastāv standartizēti modeļa veikspējas mēri un atliek tikai izvēlēties atbilstošo skaitlisko vērtību, kuras vertībai sekot, apmācot dažādus modelus [61]. Taču risinot netipiskas vai pat iepriekš neredzētas problēmas ar netriviālu problēmas nostādnī, var būt grūti spriest par modeļa kvalitāti pēc virspusējiem skaitliskiem novērtējumiem kā mērķa funkcijas vērtībai.

It sevišķi problēma saasinās situācijās ka šī darba agrīnajās stadijās, kad vēl nav nekādas skaidrības par izvēlēto metožu spēju pat ļoti aptuveni pietuvoties vēlamajiem rezultātiem – nevar vērtēt modeļa spēju sviest pudeli mērķi, ja vēl nav sasniegts modelis, kā ģenerētā trajektorija pat aptuveni izskatās pēc metiena. Tāpēc ļoti svarīgi ir izveidot attīstīt metodes, kas ļauj novērtēt iegūto rezultātu kvalitatīvos aspektus – trajektorijas “formu” telpā, satvērējmeħānisma atlaišanas signāla esamību vai neesamību dažādos to punktos, u.t.t. Tā kā uzdevums pamatā ir kinemātikas atdarināšana, ļoti noderīga ir spēja vizualizēt iegūtos rezultātus – gan kā līknes laikā, gan maršrutus telpā, gan robota kustību simulatorā. Attiecīgi projekta gaitā izstrādātas metodes ģenerētu demonstrāciju ierakstīšanai un attēlošanai.

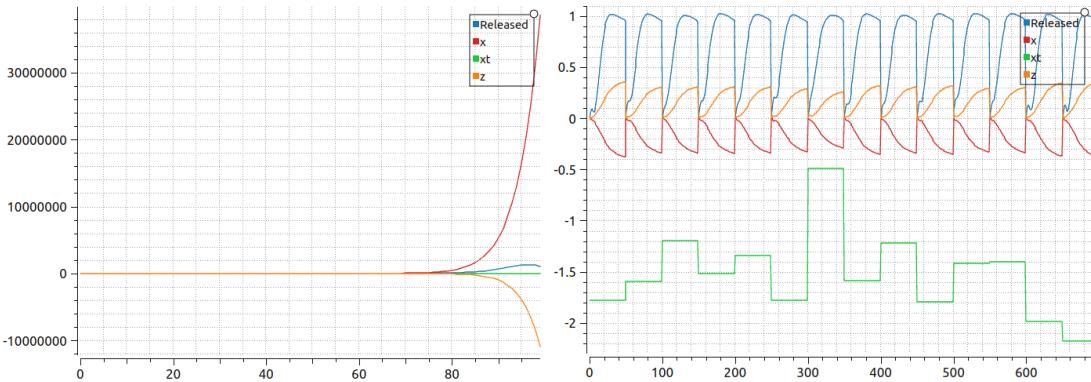
3.5.1. Modeļu pārbaude ar gadījuma sākuma stāvokļiem

Pirmā metode, kas izstrādāta lai aptuveni novērtētu, vai izvēlētie apmācības parametri noved pat pie ļoti aptuvenas vēlamo rezultātu aproksimācijas, ir modeļu autoregresijas rezultātu ierakstīšana pie gadījuma mērķa koordinātēm. Tā balstīta uz pieņēmuma, ka treniņa kopā sastaptās mērķa koordinātes $x_{target}, y_{target}, z_{target}$ veido gadījuma izlasi no nezināma normālā sadalījuma:

$$\mathbf{r}_{target} \sim \mathcal{N}(\hat{\boldsymbol{\mu}}(\mathbf{r}_{target}), \hat{\boldsymbol{\sigma}}(\mathbf{r}_{target})) \quad (3.44)$$

Tādā gadījumā iespējams ģenerēt pēc vajadzības lielu pārbaudes trajektoriju kopu, veicot gadījuma izlasi no šī sadalījuma ar empīriski nosakāmiem parametriem. Tā kā demonstrāciju dati ir normalizēti pēc sākuma koordinātēm, sākuma pārvietojums vienmēr ir vienāds ar 0. Savukārt sākuma orientācijai pietiek piemeklēt tādu kvaternionu, kas atbilst aptuveni centrētam efektora simulatora stāvoklim.

Dažādiem modeļiem ir nedaudz atšķirīgas autoregresijas trajektoriju ģenerēšanas prasības. Visi MDP formālismam atbilstošie modeļi ir ļoti vienkārši izpildāmi – pietiek sākt ar pirmo stāvokli un atkārtoti izsaukt modeli uz tā izvades datiem, līdz sasniegts



Att. 6: Pa kreisi, trajektorija ierakstīta ar agrīnu modeli, kam nepareizi definēta mērķa funkcija – novedot pie autoregresora rezultātu divergences. Pa labi, trajektorija, kuras kvalitatīvie aspekti liecina, ka parametru izvēle ir uz pareizā ceļa.

prasītāis trajektorijas garums, tāpat kā vienādojumā (6.39). Šāda tipa autoregresors ir lineārs tā asimptotiskajā sarežģītībā – gan atmiņas, gan laika – pret trajektorijas garumu.

Savukārt rekurentā neironu tīkla gadījumā sarežģījumus rada fakts, ka visa *tensorflow* saskarne būvēta ap sērijas apkopotu tenzoru apstrādi. Lai nodrošinātu lineāru asimptotisko sarežģītību būtu nepieciešams rakstīt sevis definētu modeļa apakšklasi ar speciālu izsaukuma metodi, kas jau skaitlošanas grafa līmenī pielauj autoregresiju no viena sākuma ievada. Izmantojot augsta līmeņa *Sequential* šablonu, vienkāršākais veids, kā realizēt autoregresoru, ir atkārtoti izsaukt modeli un katru reizi papildināt tā ievades datu tenzoru ar jaunāko izvadu. Protams, šāda metode ir kvadrātiskas tās asimptotiskajā sarežģītībā izpildes laika ziņā. Taču, tā kā tiek stādāts ar īsām datu virknēm un nelielu kopējo datu apjomu, šī daudzkārt vienkāršākā pieeja arī izvēlēta realizēšanai praksē.

Kad iegūtas autoregresoru ģenerētās trajektorijas, tās nepieciešams apvienot un saglabāt. Tās tiek papildinātas ar mērķa koordinātēm, kvaternionu normu orientācijas elementiem un, gadījumos, kad modelis apmācīts bez laika signāla ievades datos, laika soli. Šim mērķim tiek izmantota *pandas* bibliotēka, un izvades *.csv* formāta faila struktūra ir līdzīgs treniņa datu korpusam. Kā jau minēts, apmācītie modeļi tiek saglabāti, lai būtu iespējams jebkuru no tiem izmantot vizualizācijas vai validācijas datu ieraksts-tīšanai bez atkārtotas apmācības.

Pirms zemāk aprakstīto telpisko vizualizācijas rīku izstrādes, galvenais līdzeklis iegūto rezultātu novērtēšanai bija ROS vidē pieejamā *plotjuggler* lietojumprogramma, kas ļauj uzskatāmi attēlot laikrindu datus *.csv* formātā. Galvenie kvalitatīvie aspekti, kam pievērsta uzmanība šājā agrīnajā projekta fāzē, bijusi trajektorijas x, z koordināšu līkņu forma atkarībā no x_{target} parametra, atlaišanas signāla pārejas moments un vērtība (vai vispār tiek komandēta atlaišana? Vai novērojama tās atkarība no metiena attāluma?) un vispārīgi nevēlamu pazīmju – pārtraukuma punktu, svārstību – klātbūtnē. Lai gan grūti izdarīt objektīvus spriedumus par cilvēka intuīcijā balstītiem mēriem, tiem ir nesamērojama nozīme procesa atklūdošanā – 4. att. redzamo salīdzinājumu var ņemt kā paraugu situācijai, kad nepieciešami uzskatāmi rezultāti.

3.5.2. Validācija – demonstrāciju un autoregresoru salīdzinājumi

Taču kā jau minēts, ar subjektīviem vizuāliem spriedumiem vien nepietiek, lai būtu iespējams salīdzināt dažādu modeļu arhitektūru un hiperparametru kopu ietekmi uz rezultātiem. Kad pabeigta procesa sākotnējā atklūdošana un iegūti modeļi, kas konverģē uz šķietami derīgiem rezultātiem, nākamais solis ir kvantitatīvu salīdzinājuma rādītāju ieguve. Problēma ar no gadījuma izlases ģenerētām trajektorijām ir objektīvu kvalitātes kritēriju trūkums.

Atceroties atdarinošās mašīnmācīšanās (un laikrindu ekstrapolācijas) problēmu pamatnostādnes, modeļa mērķis ir radīt tādas laikrindas konfigurāciju telpā, kas nav atšķiramas no tāda slēptā sadalījuma, kura izlase veido demonstrāciju kopu. Nekas nav zināms par pašu šo sadalījumu, un kaut kāda veida mākslīga tā izlases papildināšana ir ekvivalenta šīs pašas problēmas atrisinājumam. Taču pastāv divi teorētiski krasī atšķirīgi, bet praktiskā izpildījuma ziņā tuvi radniecīgi paņēmieni, ko var izmantot, lai izdarītu spriedumus par apmācības procesa spēju izpildīt pamatnostādnī:

- 1) novērtēt modeļa spēju aproksimēt pašu treniņu datu kopu. No teorētiskā viedokļa, jebkurš pietiekami liels un “elastīgs” modelis var pilnībā apgūt jebkuru tā apmācībā izmantoto datu kopu, taču praksē tas ne vienmēr izdodas. Var salīdzināt autoregresijas rezultātus ar treniņa kopas demonstrācijām pie tādiem pašiem sākuma parametriem;
- 2) salīdzināt modeli ar izlasi no tā paša sadalījuma, kas veidojis apmācības datu kopu, bet kuras elementi tajā neietilpst. Jebšu, nošķirt pieejamos datus treniņa un validācijas kopās, no kurām tikai pirmā izmantota modeļa parametru iestatīšanai. Šādi tiek gūts priekštats par iegūtā modeļa vispārināmību nezināmā sadalījuma ietvaros.

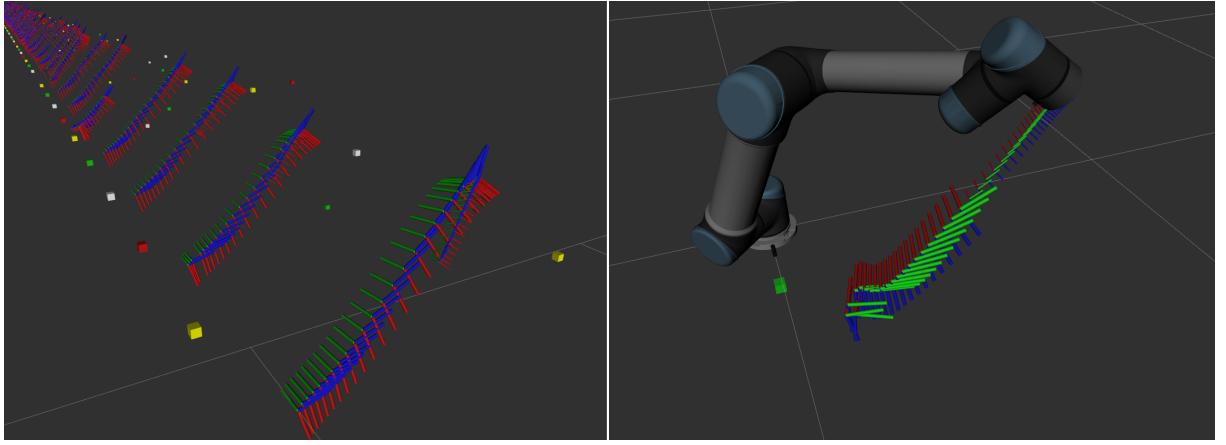
Reālā izpildījuma ziņā abas metodes ir pilnīgi identiskas, atšķiras tikai datu kopa, kas tiek izmantota salīdzināšanai. To veic procedūras ar nosaukumu *validation_on_test*, kas dažādajiem neironu tīklu izpildījumiem ir atšķirīgas, taču principā veic to pašu darbību secību. Tieki nolasīta izvēlētais datu korpuiss – apmācības vai validācijas. Tieki nošķirtas visas tā demonstrācijas, un katrai no tām tiek piekārtota atbilstoša tāda paša garuma autoregresora trajektorija un pievienota datu korpusa rindai

$$(s_1, s_2, \dots, s_n) \rightarrow ((s_1, s_1), (s_2, s_2^\theta), \dots, (s_n, s_n^\theta)) \quad (3.45)$$

Apvienotās trajektorijas attalumā tiek savietotas vienā datu korpusā, un tas ar modeļa parametriem atbilstošu nosaukumu tiek saglabāts *models/validation/* direktorijs. Visos apmācības skriptos tiek piemērota šī operācija gan ar apmācības, gan pārbaudes datu kopu. Kad pieejamas statistiski salīdzināmas laikrindas, iespējams aprēķināt dažādus skaitliskus novērtējumus to līdzībai – par ko sīkāk diskutēts nākamajā nodaļā.

3.5.3. Trajektoriju telpiska vizualizācija

Protams, ne divdimensionālas līknes, kas katru attēlo vienu konfigurācijas koordināti, ne dažādi abstrakti statistiski skaitliskie rezultāti nesniedz stabilu priekšstatu par to, vai iegūtais rezultāts telpā atgādina metienu, vai tas ietilpst robota kinemātisko



Att. 7: Telpiski attēlotas autoregresora trajektorijas. Pa kreisi vizualizēts korpuiss ar no gadījuma stāvokļiem ģenerētiem metieniem, pa labi – trajektorija, kam piemēroti visi nepieciešamie pārveidojumi, lai tā sakristu ar robota efektora koordinātu sistēmu.

ierobežojumu definētajā darba zonā, un vai tas radikāli nepārkāpj robota dinamiskās iespējas. Pirmkārt, šīs iekārtas ir jaudīgas un vērtīgas – nepieciešams ar lielu piesardzību novērtēt jebkuru vadības sistēmu, pirms tiek pieļauta to radīto komandu izpilde uz fiziskas aparatūras. Otrkārt, pat, ja pieejama simulācijas vide, dažādu koordināšu sistēmu nesakritības, pārtraukuma punktu klātbūtnē un citi faktori var nozīmēt, ka trajektoriju vai nu nav iespējams izpildīt – plānošanas fazē tiek pārkāpti kādi drošības nosacījumi – vai arī grūti saprast, kas notiek, jo tiek veikti lieli lēcieni konfigurāciju telpā.

Tāpēc izstrādāta programma, kas spēj attēlot vienu vai daudzas pozīcijas un orientācijas vektoru laikrindas 3-dimensiju telpā. Kā svarīgākās prasības šim rīkam noteiktas sekojošās:

- 1) jāspēj viennozīmigi noteikt katru laikrindas punkta telpiskā pozīcija un orientācija robota pamatnes koordinātu sistēmā;
- 2) jābūt iespējai uzreiz vizualizēt daudzas trajektorijas ar tām piekārtotajām mērķa koordinātēm. Lietotājam jāspēj skaidri atšķirt blakus esošie metieni un to mērķi;
- 3) jābūt iespējai savietot šīs vizualizācijas ar robota modeli, lai būtu iespējams tās izmantot dažādu nevēlamu nobīžu atklūdošanā;
- 4) jābūt uzskatāmam veidam kā noteikt, ka padots satvērējmehānisma atlaišanas signāls.

Šiem mērķiem ar robotikas un mašīnuztveres personāla palīdzību izveidota ROS pakotne *trajectory_vis*, kas sastāv no viena valodā C++ rakstīta izpildfaila – *visualize.cpp*. Par grafisko attēlošanas vidi izvēlēts ROS platformā iekļautais rīks *rviz*. Šajā rīkā iespējams attēlot patvalīgi novietotus, patvalīgas formas markierus vai to masīvus. Šo markieru iestatīsanai tiek izmantota tematu saskarne. Saskarni ar robota koordinātu sistēmām un markieru modeļu zīmēšanu nodrošina bibliotēkas *MoveitVisualTools* un *RvizVisualTools*.

Izsaucot lietojumprogrammu, tiek norādīti sekojošie argumenti:

- 1) failsistēmas ceļš uz pareizi strukturētu .csv failu, kas satur trajektorijas;

- 2) attēlojamo trajektoriju skaits;
- 3) pirmās trajektorijas sākuma indekss;
- 4) pirmās trajektorijas beigu indekss.

Programma nolasa datu korpusu un atrod tajā pozīcijas un orientācijas vektorus. Šie vektori tiek izmantoti, lai zīmētu koordinātu sistēmas markierus – simbolus, kas parāda, kā tiktu pārveidota pamata koordinātu sistēma, piemērojot tai attiecīgo pārvietojuma vektoru un rotācijas kvaternionu. Katru reizi, kad tiek sasniegts beigu indekss, pārvietojuma vektora y ass tiek pārbīdīta un skaitīšana tiek atsākta – tādējādi nodrošinot, ka daudzas trajektorijas var tikt attēlotas viena otrai blakus.

To mērķa koordinātes apzīmē ar kuba formas markieriem. Tā kā vizuāli ir grūti nošķirt, kurš beigu markieris sakrīt ar kuru trajektoriju, ieviests vēl viens markieris zem katras sākuma punkta. Katrai trajektorijai atbilstošie markieri iezīmēti vienā krāsā, un secīgi tiek atkārtota virkne ar konstrastējošām krāsām.

Papildus tiek nolasīts arī satvērējmehānisma konfigurācijas parametrs. To, vai satvērējmehānisms tiek uzskatīts par atvērtu, nosaka ar sliekšņa funkciju, kas piemērota tā skaitliskajai vērtībai. Vizuāli, tie punkti laikrindā, kad pudele teorētiski vēl būtu satverta, attēloti ar lielākiem markieriem, bet tie, kuros tā jau ir atlaista – ar samazinātiem.

3.6. Trajektoriju izpilde uz robota

No pētnieciskā viedokļa galvenā praktiskā darba daļa veltīta datu ieguves un modeļu apmācības uzdevumiem. Tā arī veido galveno zinātnisko pienesumu. Taču pēdējais un, iespējams, sarežģītākais uzdevums, kas veikts šī darba ietvaros, ir iegūto rezultātu izpilde uz fiziskas aparātūras. Tādi identificēti daudzi potenciālie šķēršļi iepriekš pētīto datizraces metožu pielietojumam ekspluatācijā un atrasts vismaz viens svarīgs virziens tālākai darbībai. Taču par spīti sastaptajiem sarežģījumiem izdevies realizēt paraug-demonstrāciju – modeļa ģenerētu, uz reālas iekārtas izpildītu metiena kustību, kas veiksmīgi aizmet satvertu pudeli.

3.6.1. Kā savietot modeli ar kontroleri?

Kā jau sīkāk apspriests darba nodalā par robotiem un to vadības problemātiku, ar pozīciju Dekarta koordinātu sistēmā vēl ne tuvu nepietiek, lai būtu iespējams izpildīt kādas robota darbības. Nepieciešams pārveidot telpisku pozīcijas informāciju robota asu dziņu vadības sistēmām saprotamos signālos, kas saistīti ar ātrumiem un paātrinājumiem locītavu konfigurācijas telpā.

Atgriežoties pie izvēlētās modeļa arhitektūras un tā ģenerēto datu formāta, redzams, ka tie sastāda ar nemainīgu frekvenci atjaunotu pozīcijas un orientācijas mērķu virknī. Šāda tipa kontroles signāls sevī ietver visu nepieciešamo informāciju par vadāmo lielumu atvasinājumiem pēc laika, taču netiešā veidā. Darba gaitā aplūkoti augsta līmena paņēmieni veidi, kā pārveidot šādu mērķu secību vadības signālos:

- 1) kontroleris – pozas un orientācijas sekotājs, kas darbojas reālā laikā un potenciāli veido atgriezenisko saiti ar modeli;

2) pilna kustības plāna aprēķināšana pirms izpildes;

Uzskatāmākā priekšrocība kontrolera realizācijai ir iespēja izmantot modeli jau vairs ne kā tīru autoregresoru, bet ieviest atgriezenisko saiti caur fizikālo vai simuleto izpildes vidi. Kā ievadu nākamā stāvokļa mērķa iegūšanai varētu izmantot pozīcijas un orientācijas faktisko mērījumu, iespējams, mazinot sistemātiskas nobīdes starp modeļa inducēto stāvokļu kopu tīrā autoregresijā un reāli ieņemto konfigurāciju sadalījumu. Protams, jārēķinās arī ar iespēju, ka šādas sistemātiskas nobīdes pārak daudz diverģē no inducētā sadalījuma, uz kura modelis ir apmācīts, un noved pie pasliktinātiem rezultātiem. Taču, ja paredzams kādreiz papildināt sistēmu ar stimulētās mācīšanās soli kā dažos literatūras analīzē aplūkotos pētījumos, atgriezeniskā saite ar vidi ir svarīga. Tāpat nav jāuztraucas par trajektoriju plānotāju piedāvātām laika parametrizācijas iespējām – ja izdevies realizēt pozas sekotāju, ātruma informācija jau automātiski nokodēta vadības signālos.

Veikta šāda kontrolera prototipa izstrāde, izmantojot *moveit_servo* bibliotēku. Tā spēj pārvērst 6-dimensiju komandas, kas sastāv no telpiskā un lenķiskā ātruma vektoriem, robota locītavu vadību signālos bez lieliem lēcieniem konfigurāciju telpā, kamēr vien tas netiek novests tuvu singularitātēm vai kolīzijām. Taču sarežģījumu rada fakts, ka, lai pārvērstu stāvokļu virkni tās atvasinājumiem pielīdzināmos signālos, nepieciešams vēl viens kontroleru slānis. Izmantojot atsevišķu PID kontroleri katrai asij, kas ievadā saņem pozīcijas vai lenķa nobīdi novēlamās, to koeficientu atrašana klūst par netriviālu uzdevumu. Tā kā vadības signāli atbilst pozīciju atvasinājumiem, nelielas nobīdes tajos var nozīmēt lielas klūdas robota sasniegtajos novietojumos. Tomēr reāla laika kontrolera izmantošana varētu sniegt labākus rezultātus, strukturējot modeļus tā, lai tie paredz darbību – telpisko ātrumu un paātrinājumu – nevis stāvokļu laikrindu, kas būtu interesants virziens tālākiem pētījumiem.

Savukārt pilna trajektoriju plāna aprēķināšana ir metode, kuras izstrādes process saistīts ar mazākiem riskiem. Pastāv plašs atbalsts šadiem risinājumiem, un ROS kontekstā faktiski visas saksarnes ar robotu kontroleriem balstītas uz pieņēmuma, ka uzdevums tiek realizēts kā diskrētu, iepriekš plānotu kustību virkne. Lai sagatavotu kustības plānu no punktu virknes Dekarta telpā, pietiek vien izsaukt augsti abstrahētu plānošanas komandu *moveit* bibliotēkā.

Galvenā problēma ar plānošanu ROS platformā ir fakts, ka, kaut gan ļoti vienkārši precīzēt konkrētiem laika punktiem piekārtotu locītavu konfigurāciju punktu iekļaušanu plānā un izpildi, nepastāv gatavi rīki, kas to pašu darītu ar telpiskiem punktiem. Tāpēc precīzi laikā parametrizēta telpiska plāna izpilde šobrīd nav iespējama – nepieciešams izstrādāt rīku, kas spēj pārrēķināt plāna punktu laika vērtības, lai tās maksimāli tuvu atbilstu laikā parametrizētai telpisku punktu virknei. Tomēr, atšķirībā no kontrolera pieejas, kur nepieciešams pilnīgi strādājošs risinājums, lai kustības ģeometrija atbilstu vēlamajai, ar plānotāju iegūtās trajektorijas tai ir garantēti tuvas. Iespējams piemērot dažus vienkāršus uzlabojumus, lai plānu padarītu mazāk saraustītu un tā kopējo izpildes ilgumu pielīdzinātu prasītajam. Tad var novērtēt, vai modeļa ģenerētā trajektorija ie-

kļaujas robota kinemātiskajos ierobežojumos, un pat izdarīt metienus ar samazinātu pre-cizitāti.

3.6.2. Robota trajektorijas plānošana un izpilde

Tīri praktisku ierobežojumu dēļ trajektoriju plānošanas un izpildes programmatūru nācies radīt ar spēju darboties gan ar modeli, gan iepriekš ierakstītām laikrindām *.csv* failos. Tas tāpēc, ka visa modeļu izstrāde šī projekta ietvaros ir veikta ar *tensorflow* otro versiju, savukārt datori, kas tiek izmantoti fizisko robotu kontrolei, izmanto novecojušu ROS versiju – kuras *Python* versija nav savietojama ar jauno *tensorflow*. Tāpēc sākotnēji simulācijas videi sagatavotais skripts *setpoint_from_trajectory.py*, kas pieejams *testpackage/scripts* direktorijā, papildināts ar iespēju nolasīt iepriekš sagatavotus failus un pārveidots saderībai ar *Python 2.7*.

Vadības programmas pamatā ir *moveit* bibliotēkas piedāvātā saskarne. Atkarībā no datu avota iespējams vai nu ielādēt iepriekš apmācītu modeli un nogenerēt autoregresora trajektoriju, vai arī tiešā veidā šādu trajektoriju iegūt no faila. Svarīgi, ka atkarībā no izvēlētā robota un kustību uztveres procesā izmantoto cieto ķermeņu konfigurācijas, iespējamas atšķirības starp to izmantotajām koordinātu sistēmām. Tāpēc nepieciešams veikt orientācijas pārveidojumus un novietojuma pārbīdi.

Tiek atrasti orientācijas nobīdes versori

$$q_{offset} = q_r^{-1} q_{base}^{\pi} \quad (3.46)$$

$$q_{restore} = q_{offset}^{-1} \quad (3.47)$$

q_0^{π} apzīmē sākuma rotāciju – kvaternionu, kura apzīmētā efektora simulatora orientācija ir ekvivalenta robota neitrālai robota sākuma orientācijai, ko apzīmē ar q_r . q_{offset} tad ir nobīde starp šīm orientācijām, ņemot vērā arī atšķirīgo koordinātu sistēmu. Modela izmantošanai nepieciešams pārnest robota sākuma stāvokli uz tā apmācības kopā pielīdzināmu efektora stāvokli

$$s_0^{\pi} = (r_0^{\pi}, q_0^{\pi}, g_0) \quad (3.48)$$

$$r_0 = x_0, y_0, z_0 = 0 = r_0^r - r_0^r \quad (3.49)$$

$$q_0^{\pi} = q_0^r q_{offset} \quad (3.50)$$

$$g_0 = \begin{cases} 1, & \text{ja atvērts} \\ 0 & \end{cases} \quad (3.51)$$

kur r^r, r^{π} apzīmē robota, modeļa pozīciju, q^{π}, q^r apzīmē to orientācijas, bet g_0 – sākotnējo satvērējmehānisma stāvokli. Iegūto laikrindu pēc tam pārveido atpakaļ uz robota koordinātu sistēmu

$$s_t^r = (r_t^r, q_t^r, g_t) \quad (3.52)$$

$$r_t^r = r_t^{\pi} + r_0^r \quad (3.53)$$

$$q_t^r = q_t^\pi q_{restore} \quad (3.54)$$

bet satvērējmehānisma vadības signālam tiek piemērota sliekšņa funkcija ar histerēzi

$$g_t^r = \begin{cases} 0, & \text{ja } \forall u < t, g_u^\pi < \delta \\ 1 & \end{cases} \quad (3.55)$$

Faktiski vienīgais pārveidojums, kas jāveic tiešajā virzienā (no robota uz modeļa sistēmu) ir sākuma orientācija, ja tā atšķiras no neitrālas efektoru orientācijas. Strādājot ar ierakstītu trajektoriju, notiek tikai inversie pārveidojumi (no modeļa uz robota sistēmu).

Lai varētu punktus izmantot trajektorijas plāna ieguvē, nepieciešams no tiem izveidot ROS komunikācijas modeļa robota pozas (pozīcijas un orientācijas) apraksta ziņojuma struktūras *trajectory_msgs.msg.Pose*. No šādu objektu masīva var iegūt kustības plānu ar *move_group.compute_cartesian_path* metodi, taču šādam plānam ir patvalīga laika parametrizācija. Lai to tuvinātu reālai demonstrācijai, vispirms tiek veikta laika reparametrizācija, kas minimizē telpiskos un lenķiskos paātrinājumus, izmantojot “*Time-Optimal Trajectory Generation*” algoritmu [29]. Pēc tam visi laika intervāli tiek proporcionāli pārveidoti, lai kopējais plāna ilgums sakristu ar trajektorijā paredzēto.

3.6.3. Asinhrona satvērējmehānisma vadība, ātrdarbība

Vienkāršākais veids, kā realizēt kustības plāna izpildi, būtu izmantot to pašu *move_group* saskarni, kas piedāvā *execute* metodi. Tai kā argumentu nepieciešams padot trajektoriju locītavu konfigurācijas telpā, un, iestatot argumentu *wait* uz nepatiesu vērtību, šis izsaukums nav bloķējošs. Taču jāatceras, ka *move_group* īstenībā sastāv no klienta abstrakcijām *MoveGroup* darbības serverim ROS vidē. Kā jau minēts ROS platformā pieejamo saziņas mehānismu pārskatā, komunikācija ar šāda tipa serveriem seko galīgā automāta modelim, un visas šādas augsta līmeņa komandas bloķē izsaukumus uz serveri, pat ja izsauceja kodā tās ļauj turpināt izpildi, negaidot atbildi ar darbības pieprasījuma rezultātu. Tas nozīmē, ka, pat ja serveris tiktu konfigurēts kontrolēt gan robotu, gan tā darbarīku, nebūtu iespējams ar tā palīdzību veikt pudeles atlaišanu, kamēr robots vēl ir kustībā.

Tāpēc nepieciešams izmantot paralēlus un neatkarīgus ziņapmaiņas kanālus, lai nodotu atlaišanas komandu pareizajā kustības izpildes brīdī. Vienkāršākais variants, kā to varētu mēģināt realizēt, ir noteikt laiku kopš darbības sākuma, kad jāatlaiž pudele, un ar laika aizturi padot komandu. Taču tas būtu ārkārtīgi neprecīzi bez stringrām reālā laika garantijām un ar vērā ņemamu aizturi starp kustības pieprasījuma nodošanu un reālās kustības sākumu robota kontrolerī.

Tāpēc nolemts tiešā veidā izmantot robota locītavu kontrolera piedāvāto darbības serveri – apejot *MoveGroup* – un izmantot pēc robota reālās pozīcijas parametrizētu atzvanīšanas funkciju, lai nodotu satvērēja atlaišanas signālu. Tā tiek izsaukta katru reizi, kad darbības serveris publicē atgriezeniskās saites ziņu. Principā iespējams izsaukuma ietvaros iegūt robota telpisko pozu, taču tas nozīmē, ka jāveic papildu saziņa ziņampaiņas



Att. 8: Paraugdemonstrācija – klasiska neironu tīkla generēta trajektorija.

sistēmā – ar papildu aizturēm. Tā kā izpildāmās trajektorijas ir ātras – vēlamā atlaišanas signāla izpildes precīzitāte ir ne zemāka kā 0,05 sekundes – nolemts jau iepriekš noteikt vēlamo locītavu konfigurāciju un salīdzināt robota pašreizējo stāvokli ar to. Šī vēlamā konfigurācija tiek noteikta, aprēķinot kustības plānu telpiskajai trajektorijai līdz atlaišanas punktam un ņemot pēdējo. Visas darbības, kas veicamas ar locītavu stāvokļa kontrolera darbību servera palīdzību, apkopotas klasē “*FollowTrajectoryWrapper*”, jo nepieciešama iespēja nodot dinamiskus papildu argumentus atzvanīšanas funkcijai.

Tā kā citu pētījumu ietvaros izvēlētais robots parasti ir aprīkots ar “*Robotiq 2f*” efektoru, kas piedziņai izmanto elektromotorus, saziņu realizē pār *EtherCAT* protokolu un arī kontrolejams ar darbības servera palīdzību, tam izveidota klienta klase *GripperActionWrapper*. Simulācijas vide šis ir pietiekams risinājums, un ar to izdodas veikt trajektoriju izpildi.

Taču mēģinot veikt paraugdemonstrāciju ar fizisko robotu konstatēts, ka elektromotoru piedziņa nav pietiekami ātrdarbīga, lai paredzami un īstajā trajektorijas punktā veiktu elastīga metamā objekta atlaišanu – pat iestatot maksimālu darbības ātrumu. Var, protams, ieviest manuālas korekcijas programmas kodā – mākslīgi pārbīdīt atlaišanas punktu, to pielāgojot katras trajektorijas formai, vai ieregulejot satveršanas ciešumu tā, lai tas loti precīzi atbilstu konkārtajai pudelei un tās pašreizējam tvērienam. Taču tādā gadījumā vairs netiek objektīvi vērtēta modeļa spēja pareizā laika un telpas punktā padot atlaišanas signālu. Lai risinātu šo problēmu, robots aprīkots ar daudz ātrāku pneimatisko satvērējmehānismu. Tā darbībai pietiek ar robota kontrolera digitālā izvada pieslēgšanu 5/2 solenoīdvārstam. *Ur5e* robota kontroleris nepiedāvā darbības serveri digitālo izvadu vadībai, tāpēc jāizmanto trešā no ROS pieejamajām saziņas metodēm – pakalpojuma serveris. Komunikāciju ar *set_io* pakalpojumu realizē klase *GripperServiceWrapper*.

4. REZULTĀTU ANALĪZE

Paraugdemonstrācijas uz robota atstāj iespaidu uz skatītājiem no malas un pālīdz popularizēt gūtos rezultātus, taču tās nav darba pašmērkis, un pilnīgi noteikti nav pietiekamas, lai izdarītu objektīvus spriedumus par dažādus datu ieguves un modeļu apmācības procesa aspektu priekšrocībām un trūkumiem. Nepieciešams atrast piemērotus skaitliskus novērtējumus, kas ļauj pēc iespējas vienlīdzīgāk salīdzināt dažādus risinājumus.

4.1. Novērtējumi, to aprēķins

Iepriekšējā nodaļā aprakstīts, kā tiek iegūti trajektoriju paraugi validācijai – apmācības un pārbaudes datu kopu demonstrācijas ar tām piekātotām modeļu ģenerētām trajektorijām pie tādiem pašiem sākuma nosacījumiem. Lai aprēķinātu novērtējuma mērus un apkopotu tos vienā datu korpusā, izvedots skripts *generate_evaluation_metrics.py*, kas atrodams projekta repozitorijā, *models/* direktorijā.

Tā kā pie katras ar dažādiem parametriem apmācīta modeļa iegūtas divi validācijas datu faili – treniņa un testa – to skaits ir pārāk liels, lai būtu praktiski veikt aprēķinu katram atsevišķi, iestatot nepieciešamos parametrus manuāli. Tāpēc uzrakstītais kods iegūst katru modeli aprakstošo informāciju no saglabātā faila nosaukuma. Tie ir lieumi kā modeļa paveids, parametru skaits, apmācībā izmantotā datu kopa – neilgi pirms darba noslēguma ievākta jauna demonstrācijas datu kopa, kas labāk atbilst robota kinematiskajiem ierobežojumiem un ļauj praktiski izpildīt trajektorijas, neuztraucoties par pozām ārpus tiem – apmācības epohu skaits, laika signāla esamība vai neesamība (agrīni modeli apmācīti bez tā). Šī informācija var tikt izmantota, lai grupētu un filtrētu rezultātu tabulas rindas analīzes mērķiem.

Lai varētu veikt dažādo novērtējumu aprēķinus, pats datu fails tiek nolasīts, izmantojot *pandas* datu korpusu apstrādes bibliotēku, un dažādās skaitliskās vērtības tiek aprēķinātas pamatā ar tensoru operācijām *numpy* skaitlošanas bibliotēkā.

4.1.1. Datu kopu tuvības mēri

Pirmā skaitlisko novērtējumu kategorija, ko var aprēķināt, lai salīdzinātu jebkādus datus, ir datu kopu tuvības mēri, kas aizgūti no statistikas – Pīrsona korelācijas koeficients, dažādu pakāpju distances metrikas, kosīnusu līdzība. Problēma ar šādu metožu izmantošanu ir fakts, ka tās visas ir operācijas, kurām argumentā nepieciešams padot divus vektorus – vienā rindā sakārtotas skaitļu virknes. Efektoru konfigurāciju laikrindas sastāv no vektora katrā laika solī – tātad tās ir matricas no lineārās algebras viedokļa. Šeit pielietotais risinājums ir gaužām vienkāršs – datu kopas sašķeltas demonstrācijas un ģenerētajās matricās. Katra no tām tiek “saplacināta”:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix} \rightarrow (x_{11}, \dots, x_{n1}, x_{12}, \dots, x_{nm}) \quad (4.1)$$

Tad tām var aprēķināt vektoru līdzības novērtējumus. Pirmais ir statistikā ļoti plaši izmantotais Pīrsona korelācijas koeficients r_{xy} , kam var atrast vienkāršu vektoriālu izteiksmi, kura izmanto centrētus vektorus x^c, y^c [8].

$$\bar{x} = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^{nm} x_i \quad (4.2)$$

$$x^c = (x_1 - \bar{x}, x_2 - \bar{x}, \dots, x_{nm} - \bar{x}) \quad (4.3)$$

$$r_{xy} = \frac{x^c \cdot y^c}{\|x^c\| \|y^c\|} \quad (4.4)$$

Āoti līdzīga izteiksme ir kosīnusu līdzībai, kas ir vienāda ar 1 paralēliem vektoriem, 0 – ortogonāliem, bet pretejiem ir -1 [43]. Aplūkojot formulu uzreiz arī klūst skaidrs, ka Pīrsona korelācijas koeficienta ģeometriskā interpretācija ir šī pati kosīnusu līdzība, tikai centrētiem vektoriem.

$$d_{cos}(x, y) = \frac{x \cdot y}{\|x\| \|y\|} \quad (4.5)$$

Eiklīda un Manhetenas distance pieder pie distances metrikām – funkcijām kas ir simetriskas un kam izpildās trīsstūra nevienādība [66].

$$d_{euclidean}(x, y) = \|x - y\| \quad (4.6)$$

$$d_{manhattan}(x, y) = \|x - y\|_1 = \sum_{i=1}^{nm} |x_i - y_i| \quad (4.7)$$

Kā redzams, pirmā atbilst telpiskajam attāluma jēdzienam, savukārt otrā vienkārši pilnīgi neatkarīgi novērtē atšķirību katrā vektora dimensijā, tad saskaita visas.

4.1.2. Vidējās novirzes laika soļa ietvaros

Iespējams mērīt ne tikai tuvību starp datu kopām kopumā, bet novērtēt to vidējās, maksimālās, minimālās, u.c. nobīdes katra laikrindas soļa ietvaros. Tieki aprēķinātas vidējās Eiklīda un Manhetenas distances, kur tiek uzreiz novērtēti konfigurāciju vektori x_t, y_t

$$\overline{d_{euclidean}}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \|x_t - y_t\| \quad (4.8)$$

$$\overline{d_{manhattan}}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \|x_t - y_t\|_1 \quad (4.9)$$

Eiklīda distanci var aprēķināt arī konkrēti pozīcijas klūdai.

$$\overline{\Delta r}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \|r_t^x - r_t^y\| \quad (4.10)$$

Savukārt orientācijas klūdai var aprēķināt lenķisko nobīdi starp kvaternioniem [5].

$$\overline{\alpha}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \arccos (2(q_t^x \cdot q_t^y)^2 - 1) \quad (4.11)$$

Primitīvs atlaišanas signāla kvalitātes novērtējums būtu kategorisks salīdzinājums (vienāds ar 0, ja signāli laika solī sakrīt, bet 1, ja nesakrīt):

$$g'_t = \begin{cases} 1, & \text{ja } g_t > 0,5 \\ 0 & \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\overline{\Delta g}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |g_t^x - g_t^y| \quad (4.13)$$

4.1.3. Metiena parametru aplēšana

Augstāk uzskaitītie vispārīgi pielietojamie rādītāji var būt noderīgi dažādu modeļu apmācības aspektu vērtēšanai, taču, tā kā sasniedzamais rezultāts ir metiena realizācija, iespējams sastādīt daudz specifiskākus modeļa novērtējumu. Pirmās kārtas aproksimācijai var pieņemt, ka metienu pilnībā definē tā palaišanas punkts un ātruma vektors. Lai salīdzinātu ātrumu vektorus, ar kosīnusu līdzību vien nepietiek – svarīga ir arī vektoru norma. Vispirms, atceramies, ka katrs validācijas datu korpuiss sastāv no demonstrāciju un ģenerētu trajektoriju pāriem

$$\mathcal{D}_{val} = ((\tau_{d1}, \tau_{g1}), \dots, (\tau_{dk}, \tau_{gk})) \quad (4.14)$$

Tāpēc sastādīts sekojošais vienādojums

$$v_t = r_t - r_{t-1} \quad (4.15)$$

$$\overline{\epsilon_v}(\mathcal{D}_{val}) = \frac{1}{k} \sum_{\mathcal{D}_{val}} |\|v_{trd}^d\| - v_{trd}^d \cdot v_{trg}^g| \quad (4.16)$$

kur t_{rd}, t_{rg} ir attiecīgi τ_d, τ_g atlaišanas signāla paceļošās frontes laika soli, bet v_t apzīmē aptuvenos ātrumus (pār-vietojumu diferences). Lai šādam novērtējumam būtu jebkāda nozīme, gadījumos, kad kādā no ģenerētajām trajektorijām τ_g atlaišanas signāls nav padots, tas pieņem nedefinētu vērtību.

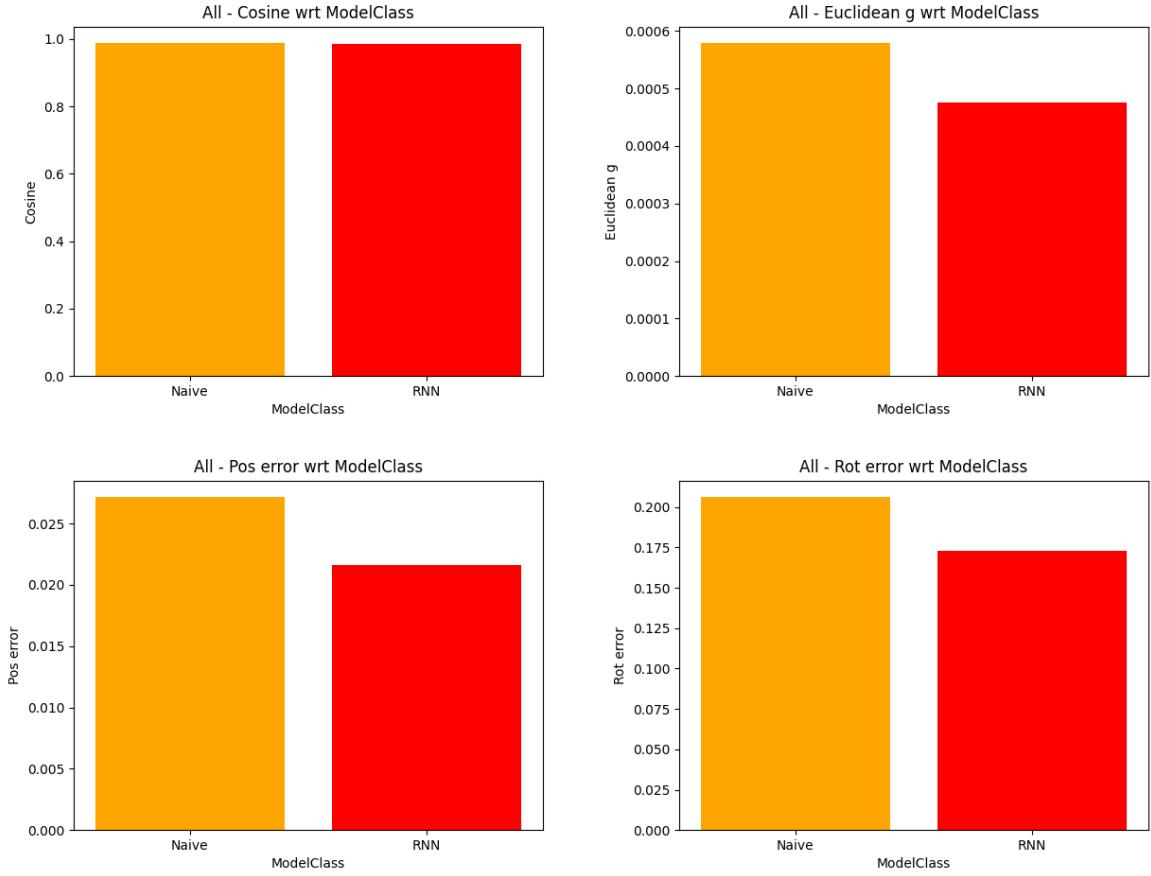
$$\nexists s_t \in \tau_g, g(s_t) = 1 \Rightarrow \overline{\epsilon_v}(\tau_d, \tau_g) \equiv +\infty \quad (4.17)$$

Līdzīgi var novērtēt arī kļūdu palaišanas momenta pārvietojumos.

$$\overline{\epsilon_r}(\mathcal{D}_{val}) = \frac{1}{k} \sum_{\mathcal{D}_{val}} \|r_{trd}^d - r_{trg}^g\| \quad (4.18)$$

Pacilājot jautājumu par to, kā abas šīs vērtības varētu apvienot vienā novērtējumā, secināts, ka tik tālu izdarīto var novest līdz galam un aplēst novirzi starp abu palašanas ātruma un pozīcijas vektoru pāru definēto brīvā kritiena parabolu krustpunktiem ar mērķa koordinātu horizontālo plakni. Šādā, ģeometriski “simulēt” metienu un novērtēt, cik tālu no demonstrācijas modelis ir trāpījis. No pamatskolas matemātikas zināms, ka brīvo kritieni var aprakstīt ar vienādojumiem

$$x(t) = x_0 + v_x t \quad (4.19)$$



Att. 9: Datu korpusu vispāriņgās tuvības rādītāji (kosinusu līdzība, Eiklīda distance) un vidējās telpiskās/rotācijas novirzes laika sola ietvaros – RNN un klasiskajam neironu tīklam.

$$y(t) = y_0 + v_y t \quad (4.20)$$

$$z(t) = z_0 + v_z t - \frac{g}{2} t^2 \quad (4.21)$$

kur $q \approx 9,81 \frac{m}{s^2}$ ir tipiska gravitācijas paātrinājuma vērtība uz zemes virsmas. Tad lai atrastu x, y koordinātes parabolas krustpunktam ar plakni, vispirms tiek atrasta pozitīvā sakne $t_{intersect}$ sekojošam vienādojumam

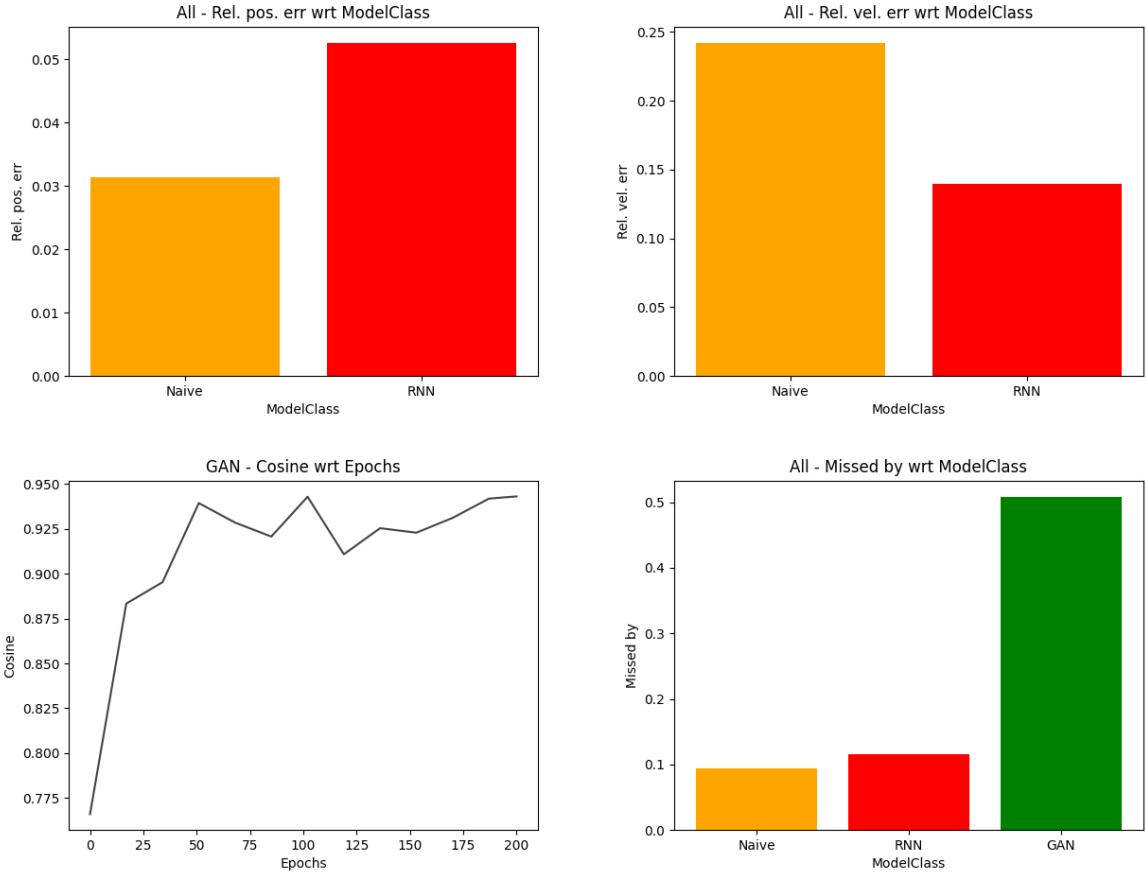
$$z_0 - z_{target} + v_{z0} t_{intersect} - \frac{g}{2} t_{intersect}^2 = 0 \quad (4.22)$$

un ievietota horizontālo koordināšu vienādojumos

$$r_{intersect} = (x(t_{intersect}), y(t_{intersect}), z_{target}) \quad (4.23)$$

Vidējo metiena kļūdu tad var novērtēt kā

$$\overline{\epsilon_{throw}}(\mathcal{D}_{val}) = \frac{1}{k} \sum_{\mathcal{D}_{val}} \|r_{intersect}^d - r_{intersect}^g\| \quad (4.24)$$



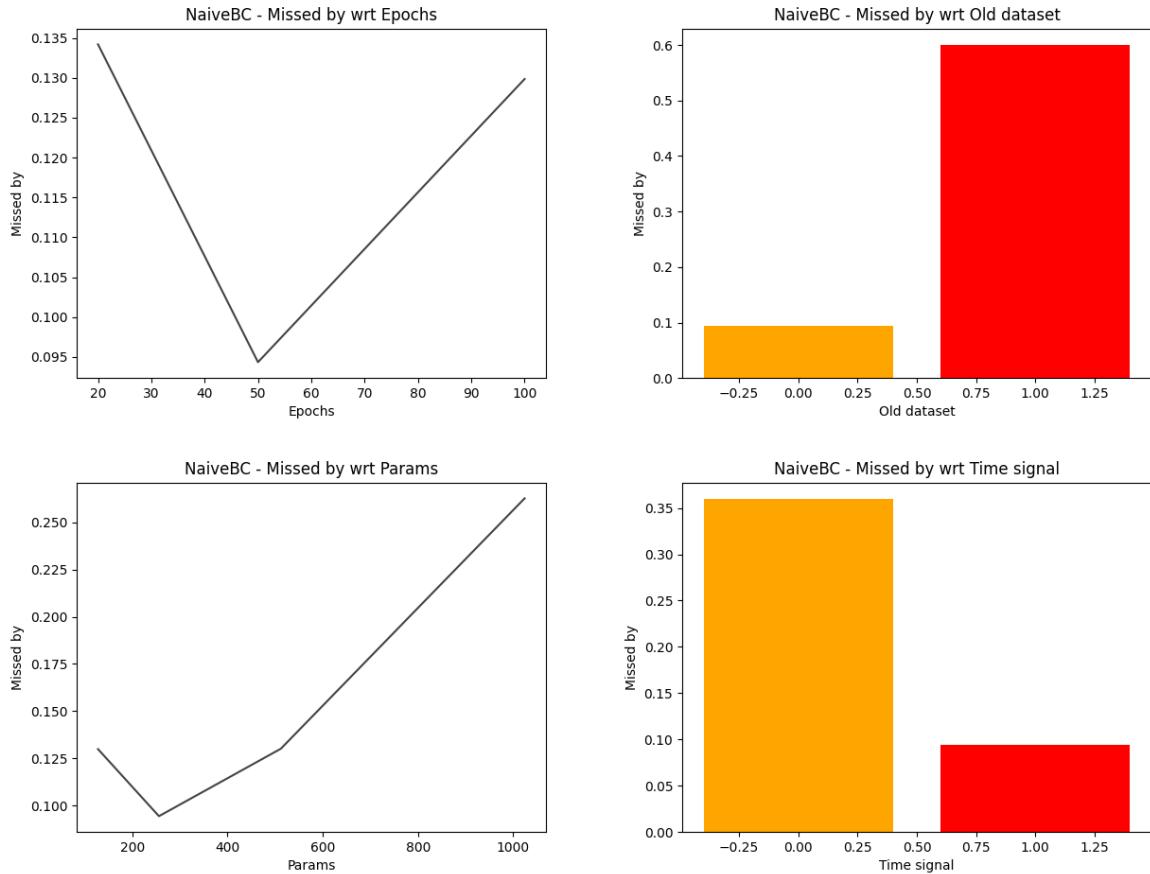
Att. 10: Augšējā rindā – labākās sasnietgās vidējā atlaišanas punkta novietojuma un ātruma vektora noviržu vērtības. Apakšā pa kreisi – pietiek ar jau rudimentāru GAN arhitektūru, lai vispār notiku modeļa konverģence. Tomēr no RNN un klasiskā neuronu tīkla sasnietgajiem rezultātiem tā tomēr atpaliek.

4.2. Sasniegtie rezultāti dažādām modeļu klasēm

Pirmais, ko var darīt, kad iegūti šādi sistematiski aprēķināti kvalitātes mēri, ir salīdzināt ar dažādām modeļu arhitektūrām sasnietgatos labākos rezultātus. 7. attēlā redzamas diagrammas, kurās salīdzināti labākie globālie τ_d , τ_g tuvības mēri un novirzes katrā laika solī iegūtajās konfigurācijās. Kā redzams, kosīnusu līdzība ir ļoti augsta abiem modeļiem, liecinot, ka datu kopa tik tiešām tiek apgūta. Metrikas bieži vien labākas ir rekurentiem modeļiem, tas pats attiecas arī uz vidējām nobīdēm.

Var ar pārliecību apgalvot, ka rekurentais neuronu tīkls mazāk diverģē no treniņa kopā novērotajiem metieniem, taču šī atšķirība nav radikāla. Izsakot grafiku mērogu cilvēkam saprotamās mērvienībās, rekurentais tīkls uzlabo videjo pozīcijas klūdu no 2,5 uz 2cm, bet videjo orientācijas vektora lenķisko nobīdi – no 11,5 uz 9,8 grādiem.

8. attēlā savukārt salīdzināti metiena novērtējumi. Redzams, ka ātruma vektora nobīdes vērtējumos rekurentais tīkls pārspēj klasisko. Pozīcijas klūda abos gadījumos ir neliela, taču labāko rezultātu šajā gadījumā ir sasniedzis klasisks modelis. Taču pārsteidzošā kārtā, arī labāko rezultātu simulētā metiena nobīdē sasniedz viens no parastajiem modeļiem, kaut gan atšķirība ir ļoti neliela un precizitāte abiem modeļiem ir 0,1m di-



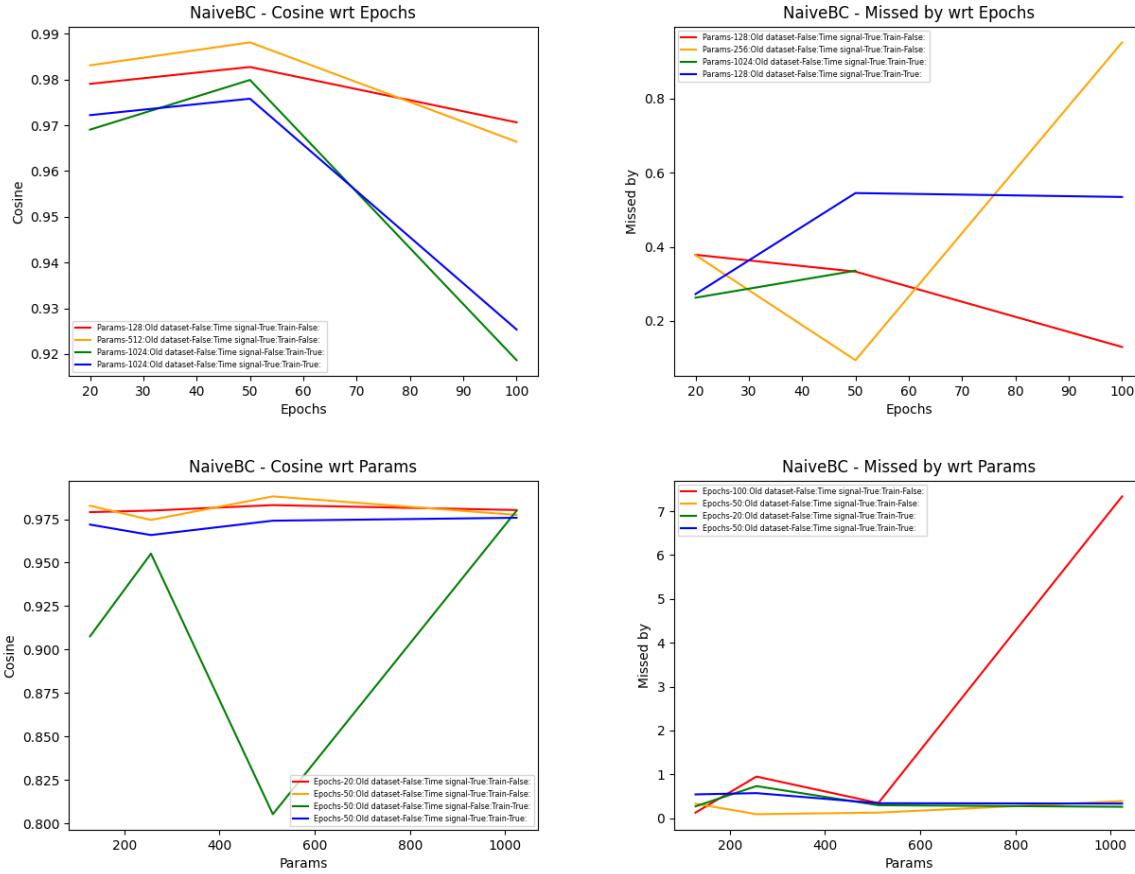
Att. 11: Klasiskā neironu tīkla ģenerēto trajektoriju simulēto metienu nobīdes atkarībā no: apmācības epohu skaita; jaunās/vecās datu kopas; parametru skaita; laika signāla neesamības/esamības.

apazonā. Kā apspriests zemāk pie divu izmantoto demonstrāciju kopu salīdzinājuma, tas visticamāk skaidrojams ar nelielo validācijas kopu “mazo metienu” korpusā – novēdot pie lielākas dispersijas šajā kvalitātes mērā. Attēloti arī daži rezultāti, kas gūti, sākot GAN modeļa attīstību. Kā redzams, sasniegta modeļa konvergēnce – vērtējamie kritēriji manāmi uzlabojas, pieaugot treniņa epohu skaitam. Taču vēl nav sasniegta konkurētspējīga veikspēja, tāpēc šī darba ietvaros sīkāk rezultāti pētīti netiks.

4.3. Parastie neironu tīkli

9. attēlā redzamas galvenās atziņas, kas gūtas strādājot ar parasto neironu tīklu – labākie rezultāti pie katras attēlotā hiperparametra vērtības. Gan pret epohu skaitu, gan modeļa izmēriem novērotās sakarības liecina, ka problēmas dinamikas modelešanai varētu būt samērā nedaudzas brīvības pakāpes. Līdz ar to neliels modelis un ne pārāk ilga apmācība ir pietiekami – pēc tam veikspēja atkal samazinās, visticamāk pārpielāgošanās rezultātā. Labākie rezultāti gūti pie 256 perceptroniem katrā slēptajā slānī un 50 treniņa epohām.

10. attēlā redzamas izmaiņas novērtējumos atkarībā tikai no viena mainīgā lieluma, lai varētu novērtēt konkrētu izmaiņu ietekmi uz modeļu apmācības procesu. Katrā grafikā

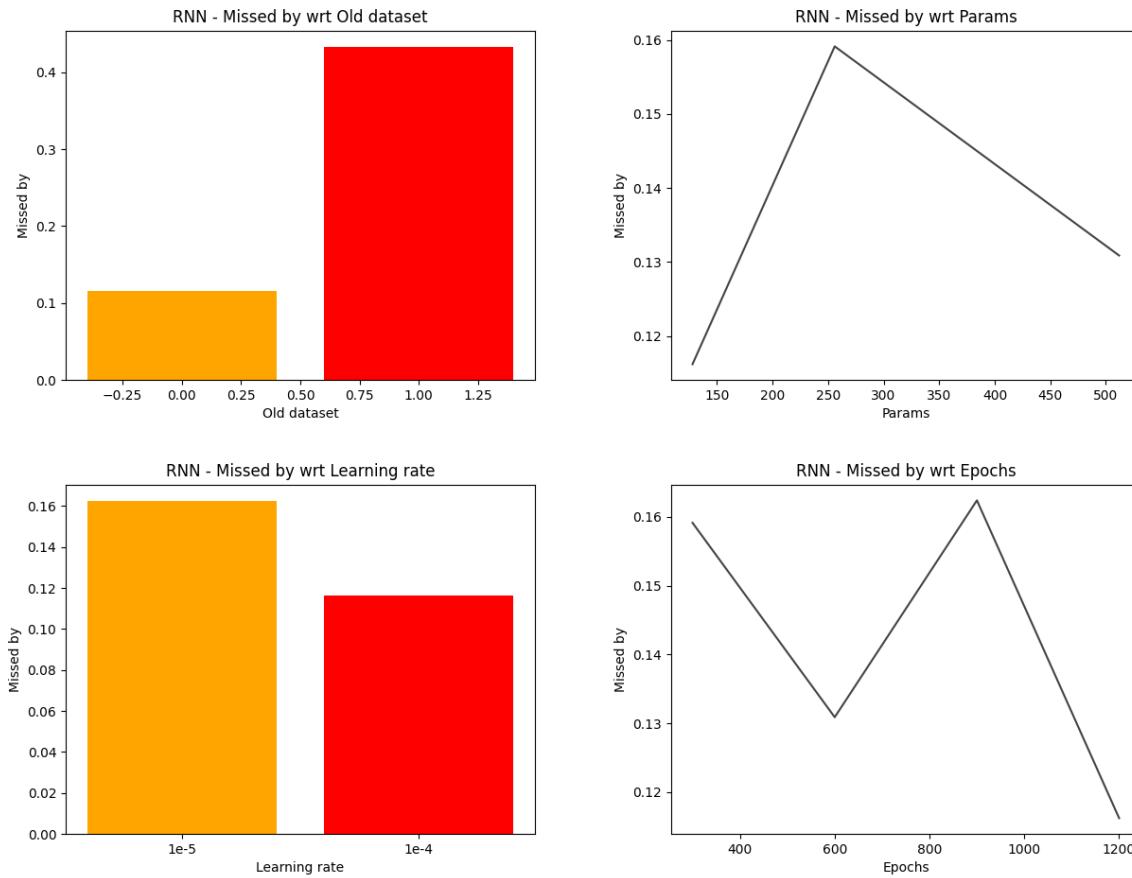


Att. 12: Atsevišķu klasisko modeļu novērtējumi, mainot tikai vienu hiperparametru. Augšējā rindā kosīnusu līdzība un metiena kļūda atkarībā no epohas, apakšējā – no parametru skaita.

redzamas četras līknes – pēc absolūti labākajām (augstākajām vai zemākajām) vērtībām sakārtotām vērtībām piekārtotas atbilstosās hiperparametru kombinācijas, un apskatītas divas labākās pie katra vērtēšanas režīma – salīdzinājuma ar demonstrācijām apmācības vai validācijas kopā. Var secināt, ka klasiskā modeļa līdzība ar demonstrāciju sadalījumu sāk kristies, pieaugot epohu skaitam, un abi labajā pusē redzami grafiki parāda, ka iespējams novērot pārpielāgošanos uz validācijas kopas. Interesanti, ka kosīnusu līdzībai pie dažādiem parametru skaitiem var būt ievērojama dispersija, pat bez skaidri redzama kāpuma vai krituma.

Pirmās datu korpusa versijas tika sagatavotas bez atsevišķa laika signāla – balstoties uz pieņēmu, ka orientācijas izmaiņa varētu būt pietiekama, lai dotu stratēģijai kontekstu par to, kurā metiena fāzē tā šobrīd atrodas. Savā ziņā pieņēums apstiprinājās – modelis konvergē, un arī kaut kas līdzīgs metienam tiek nogenerēts. Taču, kā redzams rezultātos, pievienojot atsevišķu laika signālu vektoram rezultāti tiek radikāli uzlaboti.

Visbeidzot, lielākā daļa demonstrāciju tikušas ierakstītas vairākās stadijās vēl mēnešus pirms autoregresijas rezultātus mēģināts atkārtot ar fizisku robotu. Izrādās, ka tās neatbilst robota izmēriem – veiktie vēzieni ir pārāk lieli, un mēģinājumi proporcionāli korigēt tos noved pie nesakritības starp efektora pozīciju un orientāciju (tieki mēģināts

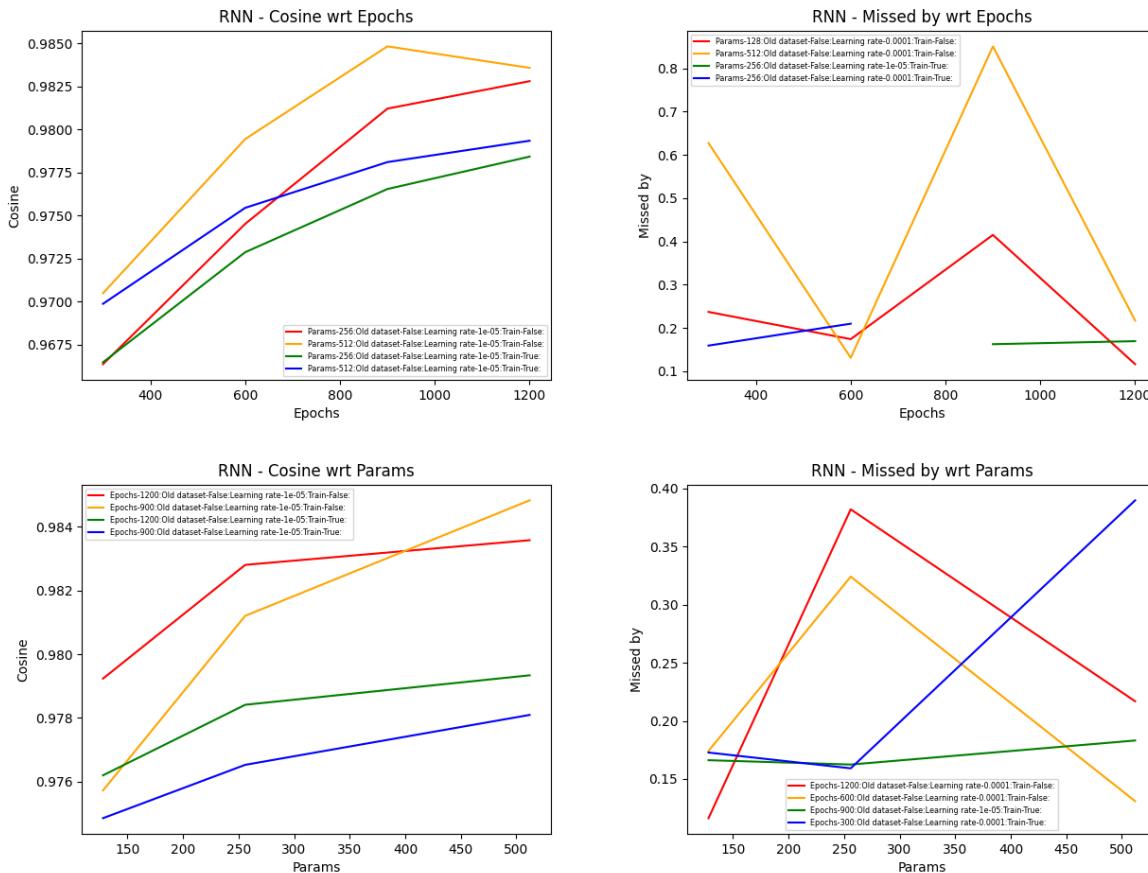


Att. 13: Rekurentā neironu tīkla generēto trajektoriju simulēto metienu nobīdes atkarībā no: datu kopas; parametru skaita; apmācības ātruma; epohu skaita.

lielas rotācijas apvienot ar nelielmiem pārvietojumiem, kas novēd pie bremzēšanas reālā robotā). Tāpēc neilgi pirms darba noslēguma iegūta jauna demonstrāciju kopa, kas gan ir mazāka par veco. Protams, arī validācijas kopa ir attiecīgi mazāka. Tajā ir līdzīga mērķa koordinātu dispersija un, varbūt svarīgāk, tās ir tuvāk metiena sākumpunktam. Augstākās simulēto metienu precizitātes sasniegtas tieši uz šīs kopas. Mazākas absolūtās vērtības kombinētas ar relatīvi lielāku dispersiju liek domāt, ka varētu būt ievērojams nejaušības faktors labāko metienu mērā. Turpmākiem pētījumiem nepieciešams strādāt ar lielāku validācijas kopu. Tomēr jāpiebilst, ka vecajā datu kopā sasniegtās precizitātes patiešām varētu būt zemākas, jo tajā ir daudz lielāka *sākuma orientāciju* dispersija – rezultātā modelis paredz agresīvākas rotācijas, bet validācijas trajektorijas ievāktas ar neitrālu sākuma stāvokli.

4.4. Rekurentie neironu tīkli

11. attēlā salīdzināta rekurentā tīkla simulēto metienu precizitāte pie dažādiem hiperparametriem. Pirmkārt, redzams, ka ne pēc epohām, ne modeļa izmēriem skaidras sakarības nav novērojamas – vērtībām ir ļoti neliela dispersija. Tas rada zināmas cerības, ka vēl nav atrastas optimālas hiperparametru kombinācijas, un iespējami tālāki uzlabojumi. Svarīgi arī pamanīt, ka pie vecās datu kopas – kas ir lielāka un ar daudz lielākām



Att. 14: Atsevišķu rekurento modelu novērtējumi, mainot tikai vienu hiperparametru. Augšējā rindā kosīnusu un metiena klūda atkarībā no epohas, apakšējā – no parametru skaita.

efektors orientācijas izmaiņām – rekurentais modelis sasniedz ievērojami labākus rezultātus, nekā klasiskais. Tomēr pie nelielās jaunā datu korpusa validācijas kopas sasniegta precizitāte ir mazliet zemāka.

12. attēlā redzami rekurentā tīkla novērtējumu izmaiņas, noturot fiksētus pārējos hiperparametrus. Redzams, ka epohu skaits lielākiem modeļiem (ar 256, 512 perceptroniem katrā slēptajā slāni) noved pie augstākiem kopējās līdzības novērtējumiem (šajā gadījumā, kosīnusu), taču sakarība nav tik viennozīmīga, apskatot metiena klūdu. Tāpat kā iepriekš, katrā grafikā attēloti četri modeļi ar absolūti labākajām sasniegta jām vērtībām – divi pret treniņa kopu un divi pret testa. Redzams, ka, salīdzinot ar nelielās validācijas kopas trajektorijām, abi modeļi visos gadījumos ir veiksmīgi padevuši atlaišanas signālu, taču pie lielākās apmācības kopas abiem modeļiem tas notiek tikai konkrētā epohu diapazonā. Turklat izteikta klūst apmācības ātruma ietekme uz rezultātiem. 256-neironu modelis ar apmācības ātrumu $\lambda = 10^{-5}$ ir lietojams pie 900 vai 1200 epohām, bet ar ātrumu $\lambda = 10^{-4}$ – pie 300 vai 600.

Apakšējā rindā kā mainīgais hiperparametrs izmantots perceptronu skaits modeļī. Kosīnusu līdzības grafiks parāda, ka faktiski modeļa spēja apgūt datu kopu vai to ģenerējošo sadalījumu vēl joprojām pieaug (kaut gan lēni), palielinot parametru skaitu pie

dažādām pārējo hiperparametru kombinācijām. Savukārt metienu klūda pret validācijas kopu liecina, ka pie 300 epohām pat ar augstāku apmācības ātrumu lielākais 512-neironu modelis vēl nav pietiekami labi apguvis sadalījumu. Pie 900 epohām iegūtie rezultāti uz validācijas kopas ir diezgan stabili, kas gan iespējams skaidrojams ar šīs kopas nelielo izmēru. Interesanti, ka pret apmācības kopu un lielāka epohu skaita gan 128, gan 512 perceptronu varianti pārspēj vidējo 256-neironu modeli – iespējams, liecinot par t.s. divkāršā krituma jeb “*double descent*” fenomenu [37].

SECINĀJUMI

Literatūras analīzē sniegs ūss par atdarinošo mašīnmācīšanos līdz šim veiktās pētnieciskās darbības pārskats. Jau izvēloties, par kurām tēmām vērts rakstīt plašāk, iespaidu uz darba saturu ir atstājusi motivējošās problēmas specifika. Tagad nepieciešams pie tās atgriezties un novērtēt, kas no visa nozarē pētītā un izgudrotā attiecas uz darba ievadā aprakstīto uzdevumu — mešanas kustību iestrādāšanu atkritumu vai citu objektu pārvietošanā — un izstrādāt rīcības plānu tālākai magistra darba izstrādei.

Svarīgākās atziņas

Tūlīt klūst skaidrs, ka pašas vienkāršākās metodes — klasiskā uzvedības klonēšana [42] vai kādas tās tiešās korekcijas — uzdevumam piemērotas nav. Tās darbojas gadījumos, kad demonstrāciju kopa labi nosedz visas iespējamās trajektorijas sistēmas konfigurāciju telpā, nav robustas pret nobīdēm, un jaunu trajektoriju programmēšana prasa apmācības procesa atkārtošanu. Problēmu grūti nostādīt formā, kur robotam vienkārši jāapgūst maksimāli precīzi atdarināt detalizētu un pilnībā aprakstošu demonstrāciju kopu. Vēl jāatzīst, ka metodes, kas ir ļoti specifiskas tieši robotikas uzdevumiem un prasa no algoritma izstrādātājiem pieņēmumus par uzdevuma struktūru — t.i. pamatā risinājumi, kas nodarbojas ar simbolisko dekompozīciju [26, 50, 65, 39, 40] — nešķiet sevišķi perspektīvas, jo tās ir grūtāk attīstīt un vispārināt. Protams, no inženiertehniskā viedokļa tās varētu zināmos uzdevumos pārspēt vispārīgākas piejas, tomēr ilgtermiņa pieredze rāda, ka dažādas lokālas priekšrocības mēdz izgaist, pieaugot daudzparametru neironu tīklu veikspējai.

Runājot par novērojumiem, nozīmīgi šķiet tieši pētījumi, kas realizē demonstrāciju ievākšanu no cilvēka kustībām [27, 68] vai nu virtuālā, vai fiziskā telpā. Metienu izdarīšana ir intuitīvi labi trenēta taču analītiski sarežģīta procedūra. Ātra piemēru iegūšana varētu kalpot par pamatu rīkiem, ar ko praktisku sistēmu pielāgot tās apkārtējai videi darba zonā. Tāpat uzmanību vērts pievērst pētījumiem, kas izmanto telpiskus un video novērojumus kā arī datu kopas sintētisku pavairošanu [12]. Lai gan tiešā veidā kādu no tajos aprakstītājiem algoritmiem droši vien neizdosies izmantot, ir vērts paturēt prātā pētījumus, kur trajektorijas padarītas noturīgākas pret novirzēm — vai nu trenējot slēptu dinamikas modeli [62], vai arī izmantojot analītiskas kompensācijas [39]. Pastāv iespēja, ka būs nepieciešams izmantot novērojumus, kas iegūti no dažādām perspektīvām, tāpēc noderīgi varētu izrādīties arī perspektīvu pārneses paņēmieni [31].

Visbeidzot, no adaptīvo un imitējošo metožu kombinācijas virziena ļoti svarīgi šķiet rezultāti, kas gūti izstrādājot stratēģijas, kuras spēj pielāgoties dažādu demonstrāciju atdarināšanai [11] vai dažādu galamērķu sasniegšanai bez papildus apmācības [33, 32, 17]. Tā kā ir iespējams diezgan skaidri definēt atalgojuma funkciju objekta iekrišanai pareizajā tvertnē, bet nonākšana līdz tai ar parastu stimulētās mācīšanās procesu ir ļoti apgrūtināta, risinājuma izstrādes gaitā var nākties izmantot arī atdarināšanu kā sākumpunktu pašmācībai [23].

Vieta tālākai darbībai

Apkopojot visu augstāk minēto, var ieskicēt iespējamu risinājumu uzdevumam, kas arī kalpos par pamatu tālākās rīcības plānam.

Risinājums

Lai apmācītu modeli, kas realizē metiena kustību ar jau satvertu neregulāras formas objektu, tiks darīts sekojošais:

- 1) demonstrāciju ievākšana — tiks ierakstīti cilvēka veikti metieni fiziskā telpā vai VR, iegūtas manipulatoru trajektorijas vai metienus raksturojoši parametri;
- 2) datu kopas papildinašana — iegūto demonstrāciju kopu varētu sintētiski pavairot, ja tiek veikta mesto objektu trajektoriju simulācija;
- 3) atdarinoša modeļa apmācība — jāizmanto modelis, kas parametrizēts pēc sasniedzamā galamērķa, lai būtu iespējams ātri un lēti pielāgot robotu darbam ar dažādi izvietotām tvertnēm;
- 4) papildus optimizācija — arī ar nelielas un neoptimālas demonstrāciju kopas palīdzību apmācītu modeli var ievērojami uzlabot, papildus izmantojot stimu-lētās mācīšanās metodes. Atalgojuma funkciju šoreiz ir samērā viegli definēt (bet grūti sasniegt).

Šobrīd grūti paredzēt, kādi rezultāti tiks sasniegti eksperimentālajā darbībā, kuri pieņēmumi būs izrādījušies patiesi, kuri — aplami. Tāpat vēl pāragri spriest par konkrētiem tehniskiem izpildījumiem, jo tie ir ļoti atkarīgi no izmantotās datu kopas atribūtiem.

Magistra darba izstrādes plāns

Vadoties pēc augstāk aprakstītās risinājuma formas, šobrīd jau iespējams plānot nepieciešamo noslēguma darba struktūru — nodoļu mērķus un to saturu. Plānu dokumenta no zinātniska viedokļa saturiski nozīmīgajām daļām var izteikt sekojoši:

- 1) nozares teorētiskais pārskats — visu nepieciešamo priekšzināšanu izklāsts, vistīcamāk daļīts trijās nodoļās vai apakšnodoļās:
 - (a) vispārīgas pamatzināšanas — analogiski šī kursa darba 1.3. apakšnodoļai;
 - (b) literatūras analīze — analogiski šī kursa darba 2. nodoļai;
 - (c) konkrētā izvēlētā risinājuma teorētiskais pamatojums — izstrādāto risinājumu matemātisko aspektu detalizēts izklāsts, nepieciešamie pierādījumi;
- 2) praktiskās darbības apraksts:
 - (a) izmantotie rīki un metodes — izvēlēto programmatūras pakotņu, fiziskā aprīkojuma apraksti, izvēles pamatojumi;
 - (b) risinājuma apraksts — veiktās darbības, izveidotie programmatūras artefakti, izmantotās un iegūtās datu kopas;
- 3) rezultātu analīze — veiktspējas novērtējumi, salīdzinājumi ar citiem pētījumiem, ieteicamie uzlabojumi un virzieni tālākai izpētei.

Teorētisko pārskatu var uzskatīt par daļēji pabeigtu. Literatūras analīzes nodoļa, vistīcamāk, jau satur lielāko daļu no informācijas, kas būs nepieciešama noslēguma darbā, tāpat ar vispārīgo priekšzināšanu apakšnodoļu. Protams, korekcijas un papildinājumi

gandrīz noteikti būs nepieciešami abiem, jo neizbēgami atklāsies faktori, par kuriem šobrīd vēl nav padomāts, un, iespējams, nāksies ņemt vērā arī jaunākas publikācijas nozarē. Detalizēta risinājuma izvēle un teorētiskais pamatojums šobrīd vēl nav iespējami, jo tie cieši saistīti ar praktiskās darbības norisi.

Praktiskās darbības ietvaros var jau paredzēt aptuvenu nepieciešamo soļu secību. No demonstrāciju ievākšanas viedokļa būs nepieciešams izvērtēt EDI pieejamā telpisko kustību ierakstišanas aprīkojuma spējas un trūkumus, apgūt VR sistēmu izmantošanu un izvēlēties labāko no šīm pieejām instruktāžas procesa realizācijai. Nāksies atrast noderīgāko metiena reprezentāciju — metienu trajektorijas iespējams pilnībā raksturot ar ātruma un leņķiskā ātruma vektoriem to sākumā. Vai labāk tiešā veidā apmācīt robotu ar pēc galamērķa parametrizētām metienu veicošā rīka kustībām? Vai tomēr izmantot šos metiena raksturotājus kā starpmērķus — uztverot pareizu metienu un trāpišanu mērķī par diviem atsevišķiem uzdevumiem, kam jātrenē dažādas stratēģijas? Tāpat būs arī jānovērtē datu kopas pietiekamība apmācības uzdevumam — izstrādājot metodi tās sintētiskai papildināšanai, ja nepieciešams.

Kad izvēlēta metiena reprezentācija un precīzēta uzdevuma matemātiskā forma, būs iespējams sākt darbu pie modeļa izstrādes. Visticamāk, nāksies pārbaudīt vairākas, potenciāli ļoti atšķirīgas metodes. Beigās vēlams iegūt modeli, kas ar minimālu papildus treniņa iterāciju skaitu spēj pielāgoties metienu izdarīšanai uz dažādiem punktiem telpā — vai nu precīzētiem koordinātu formā, vai arī izmantojot robotam pieejamo ievades informāciju (piemēram, datorredzi). Svarīgi arī izstrādāt testa un novērtējumu protokolu, kas ļauj objektīvi salīdzināt dažādu izmantoto modeļu atribūtus — metienu precīzitāti, modeļa izmērus vai sarežģītību, pirmreizējā treniņa resursietilpību, trajektoriju pielāgošanas vai ieprogrammēšanas sarežģītību u.c. Tikai tā iespējams no liela iteratīvas un ne visai strukturētas praktiskās darbības radītu produktu korpusa izdarīt zinātniski nozīmīgus secinājumus.

ATSAUCES

- [1] Pieter Abbeel and Andrew Y Ng. “Apprenticeship learning via inverse reinforcement learning”. In: *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*. 2004, p. 1.
- [2] Beijing Academy of Artificial Intelligence. *Suggested Notation for Machine Learning*. 2020. URL: <http://ctan.math.utah.edu/ctan/tex-archive/macros/latex/contrib/mlmath/mlmath.pdf> (visited on 01/14/2022).
- [3] Isaac Asimov. *I, robot*. Vol. 1. Spectra, 2004.
- [4] Alexandre Attia and Sharone Dayan. “Global overview of imitation learning”. In: *arXiv preprint arXiv:1801.06503* (2018).
- [5] Jim Belk. *Quaternion distance*. URL: <https://math.stackexchange.com/q/90098>.
- [6] Aude Billard et al. “Handbook of robotics chapter 59: Robot programming by demonstration”. In: *Handbook of Robotics*. Springer (2008).
- [7] Liana Blumberga. *GENERĀTĪVO PRETINIEKU TĪKLU TEORĒTISKA IZPĒTE (kursa darba konferences stenda plakāts)*. 2019. URL: https://www.df.lu.lv/file/admin/user_upload/LU.LV/Apaksvietnes/Fakultates/www.df.lu.lv/Studijas/Magistrantura/Konferences_stenda_referati/2019/Blumberga_Liana.pdf (visited on 01/20/2022).
- [8] Matthew Brett. *Correlation and projection*. 2016. URL: https://matthew-brett.github.io/teaching/correlation_projection.html (visited on 05/13/2022).
- [9] Daniel Brown et al. “Extrapolating beyond suboptimal demonstrations via inverse reinforcement learning from observations”. In: *International conference on machine learning*. PMLR. 2019, pp. 783–792.
- [10] Steve Crowe. *10 Biggest Challenges in Robotics*. 2018. URL: <https://www.therobotreport.com/10-biggest-challenges-in-robotics/> (visited on 01/20/2022).
- [11] Yan Duan et al. “One-shot imitation learning”. In: *arXiv preprint arXiv:1703.07326* (2017).
- [12] Jonatan S Dyrstad et al. “Teaching a robot to grasp real fish by imitation learning from a human supervisor in virtual reality”. In: *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2018, pp. 7185–7192.
- [13] Peter Englert and Marc Toussaint. “Learning manipulation skills from a single demonstration”. In: *The International Journal of Robotics Research* 37.1 (2018), pp. 137–154.
- [14] Mathilde Frot. *5 Trends in Computer Science Research*. 2021. URL: <https://www.topuniversities.com/courses/computer-science-information-systems/5-trends-computer-science-research> (visited on 01/21/2022).

- [15] Kunihiko Fukushima. “Neocognitron: A hierarchical neural network capable of visual pattern recognition”. In: *Neural networks* 1.2 (1988), pp. 119–130.
- [16] ABB Group et al. “Special report: Robotics–ABB group”. In: *ABB Review* (2016).
- [17] Abhishek Gupta et al. “Relay policy learning: Solving long-horizon tasks via imitation and reinforcement learning”. In: *arXiv preprint arXiv:1910.11956* (2019).
- [18] Khalifa H Harib et al. “Parallel, serial and hybrid machine tools and robotics structures: comparative study on optimum kinematic designs”. In: *Serial and Parallel Robot Manipulators-Kinematics, Dynamics, Control and Optimization*. IntechOpen, 2012.
- [19] Kris Hauser. *Robotic Systems – Chapter 4. 3D Rotations*. University of Illinois. 2020. URL: <http://motion.cs.illinois.edu/RoboticSystems/3DRotations.html> (visited on 05/17/2022).
- [20] Kris Hauser. *Robotic Systems – Chapter 5. Robot Kinematics*. University of Illinois. 2020. URL: <http://motion.cs.illinois.edu/RoboticSystems/Kinematics.html> (visited on 05/17/2022).
- [21] Kris Hauser. *Robotic Systems – Chapter 6. Inverse Kinematics*. University of Illinois. 2020. URL: <http://motion.cs.illinois.edu/RoboticSystems/InverseKinematics.html> (visited on 05/17/2022).
- [22] Kris Hauser. *Robotic Systems – Chapter 8. What is motion planning?* University of Illinois. 2020. URL: <http://motion.cs.illinois.edu/RoboticSystems/WhatIsMotionPlanning.html> (visited on 05/17/2022).
- [23] Todd Hester et al. “Deep q-learning from demonstrations”. In: *Thirty-second AAAI conference on artificial intelligence*. 2018.
- [24] Jonathan Ho and Stefano Ermon. “Generative adversarial imitation learning”. In: *Advances in neural information processing systems* 29 (2016), pp. 4565–4573.
- [25] Peter J. Huber. “Robust Estimation of a Location Parameter”. In: *The Annals of Mathematical Statistics* 35.1 (1964), pp. 73–101. DOI: [10.1214/aoms/1177703732](https://doi.org/10.1214/aoms/1177703732). URL: <https://doi.org/10.1214/aoms/1177703732>.
- [26] Auke Jan Ijspeert, Jun Nakanishi, and Stefan Schaal. “Movement imitation with nonlinear dynamical systems in humanoid robots”. In: *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 02CH37292)*. Vol. 2. IEEE. 2002, pp. 1398–1403.
- [27] Abhishek Jha et al. “Imitation learning in industrial robots: a kinematics based trajectory generation framework”. In: *Proceedings of the Advances in Robotics*. 2017, pp. 1–6.
- [28] Alex Krizhevsky, Ilya Sutskever, and Geoffrey E Hinton. “Imagenet classification with deep convolutional neural networks”. In: *Advances in neural information processing systems* 25 (2012), pp. 1097–1105.

- [29] Tobias Kunz and Mike Stilman. “Time-optimal trajectory generation for path following with bounded acceleration and velocity”. In: *Robotics: Science and Systems VIII* (2012), pp. 1–8.
- [30] Seppo Linnainmaa. “The representation of the cumulative rounding error of an algorithm as a Taylor expansion of the local rounding errors”. In: *Master’s Thesis (in Finnish)*, Univ. Helsinki (1970), pp. 6–7.
- [31] YuXuan Liu et al. “Imitation from observation: Learning to imitate behaviors from raw video via context translation”. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2018, pp. 1118–1125.
- [32] Corey Lynch and Pierre Sermanet. “Language conditioned imitation learning over unstructured data”. In: *Proceedings of Robotics: Science and Systems*. doi 10 (2021).
- [33] Corey Lynch et al. “Learning latent plans from play”. In: *Conference on Robot Learning*. PMLR. 2020, pp. 1113–1132.
- [34] Warren S McCulloch and Walter Pitts. “A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity”. In: *The bulletin of mathematical biophysics* 5.4 (1943), pp. 115–133.
- [35] S Muench et al. “Robot programming by demonstration (rpd)-using machine learning and user interaction methods for the development of easy and comfortable robot programming systems”. In: *Proceedings of the International Symposium on Industrial Robots*. Vol. 25. INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS, & ROBOTIC INDUSTRIES. 1994, pp. 685–685.
- [36] Ashvin Nair et al. “Overcoming exploration in reinforcement learning with demonstrations”. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2018, pp. 6292–6299.
- [37] Preetum Nakkiran et al. “Deep double descent: Where bigger models and more data hurt”. In: *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2021.12 (2021), p. 124003.
- [38] Alex Owen-Hill. *The Decade of Artificial Intelligence*. 2021. URL: <https://blog.robotiq.com/what-are-the-different-programming-methods-for-robots> (visited on 01/16/2022).
- [39] Peter Pastor et al. “Online movement adaptation based on previous sensor experiences”. In: *2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. IEEE. 2011, pp. 365–371.
- [40] Peter Pastor et al. “Skill learning and task outcome prediction for manipulation”. In: *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE. 2011, pp. 3828–3834.
- [41] Dario Pavllo, David Grangier, and Michael Auli. “Quaternet: A quaternion-based recurrent model for human motion”. In: *arXiv preprint arXiv:1805.06485* (2018).

- [42] Dean A Pomerleau. *Alvinn: An autonomous land vehicle in a neural network*. Tech. rep. CARNEGIE-MELLON UNIV PITTSBURGH PA ARTIFICIAL INTELLIGENCE and PSYCHOLOGY . . ., 1989.
- [43] Selva Prabhakaran. *Cosine Similarity - Understanding the math and how it works (with python codes)*. 2018. URL: <https://www.machinelearningplus.com/nlp/cosine-similarity/> (visited on 05/13/2022).
- [44] LZA TK ITTEA protokoli. *reinforcement learning*. 2017. URL: <https://termini.gov.lv/kolekcijas/97/skirkis/454193> (visited on 01/20/2022).
- [45] Pēteris Račinskis. *Masters – github repository*. 2022. URL: <https://github.com/peteris-racinskis/masters> (visited on 05/11/2022).
- [46] Pēteris Račinskis. *Masters Data – github repository*. 2022. URL: https://github.com/peteris-racinskis/masters_data (visited on 05/11/2022).
- [47] Alec Radford et al. “Improving language understanding by generative pre-training”. In: (2018).
- [48] Scott Reed et al. “A Generalist Agent”. In: *arXiv preprint arXiv:2205.06175* (2022).
- [49] Stéphane Ross, Geoffrey J Gordon, and J Andrew Bagnell. “No-regret reductions for imitation learning and structured prediction”. In: *In AISTATS*. Citeseer. 2011.
- [50] Stefan Schaal, Auke Ijspeert, and Aude Billard. “Computational approaches to motor learning by imitation”. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* 358.1431 (2003), pp. 537–547.
- [51] Stefan Scherzinger, Arne Roennau, and Rüdiger Dillmann. “Forward dynamics compliance control (FDCC): A new approach to cartesian compliance for robotic manipulators”. In: *2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2017, pp. 4568–4575.
- [52] Stefan Scherzinger, Arne Roennau, and Rüdiger Dillmann. “Contact skill imitation learning for robot-independent assembly programming”. In: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. IEEE. 2019, pp. 4309–4316.
- [53] David Silver et al. “Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search”. In: *nature* 529.7587 (2016), pp. 484–489.
- [54] *STAT 501, 14.1 – Autoregressive Models*. Penn State. 2021. URL: <https://online.stat.psu.edu/stat501/lesson/14/14.1> (visited on 05/18/2022).
- [55] Andrea D. Steffen. *Robotics Takes Plastic Recycling To The Next Level*. 2021. URL: <https://www.intelligentliving.co/robotics-plastic-recycling-next-level/> (visited on 01/20/2022).
- [56] Richard S Sutton and Andrew G Barto. “Reinforcement learning: An introduction”. In: MIT press, 2018, pp. 60–77.

- [57] *Tensorflow Core v2.8.0 API documentation – Binary Cross-Entropy loss*. Google. 2022. URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/losses/BinaryCrossentropy (visited on 05/12/2022).
- [58] *Tensorflow Core v2.8.0 API documentation – Huber loss*. Google. 2022. URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/keras/losses/Huber (visited on 05/12/2022).
- [59] *Tensorflow Core v2.8.0 API documentation – Ragged Tensors*. Google. 2022. URL: https://www.tensorflow.org/guide/ragged_tensor (visited on 05/12/2022).
- [60] *Tensorflow Core v2.8.0 API documentation – ReLU activation function*. Google. 2022. URL: https://www.tensorflow.org/api_docs/python/tf/nn/relu (visited on 05/12/2022).
- [61] *Tensorflow Tutorials – image classification*. Google. 2022. URL: https://www.tensorflow.org/tutorials/keras/classification?hl=en#compile_the_model (visited on 05/12/2022).
- [62] Faraz Torabi, Garrett Warnell, and Peter Stone. “Behavioral cloning from observation”. In: *arXiv preprint arXiv:1805.01954* (2018).
- [63] Faraz Torabi, Garrett Warnell, and Peter Stone. “Generative adversarial imitation from observation”. In: *arXiv preprint arXiv:1807.06158* (2018).
- [64] Ashish Vaswani et al. “Attention is all you need”. In: *Advances in neural information processing systems*. 2017, pp. 5998–6008.
- [65] Ning Wang, Chuize Chen, and Alessandro Di Nuovo. “A framework of hybrid force/motion skills learning for robots”. In: *IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems* 13.1 (2020), pp. 162–170.
- [66] Eric Weisstein. *Wolfram Math World – Metric*. 2022. URL: <https://mathworld.wolfram.com/Metric.html> (visited on 05/13/2022).
- [67] Fangyi Yu. *A Thorough Guide to Time Series Analysis*. 2021. URL: <https://towardsdatascience.com/a-thorough-guide-to-time-series-analysis-5439c63bc9c5> (visited on 05/18/2022).
- [68] Tianhao Zhang et al. “Deep imitation learning for complex manipulation tasks from virtual reality teleoperation”. In: *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE. 2018, pp. 5628–5635.