

VILNIAUS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS
PROGRAMŲ SISTEMŲ KATEDRA

**Mažos duomenų imties problemos poveikis
klasifikacijos tikslumui naudojant dirbtinius
neuroninius tinklus**

**(The Effect of a Small Dataset Problem on Classification
Accuracy Using Artificial Neural Networks)**

Kursinis darbas

Atliko:	3 kurso 5 grupės studentė Miglė Vaitulevičiūtė	(parašas)
Darbo vadovas:	dr. Vytautas Valaitis	(parašas)

TURINYS

IVADAS	3
1. DIRBTINIS NEURONINIS TINKLAS	4
1.1. Dirbtinio neuroninio tinklo sudėtis	4
1.2. Dirbtinio neuroninio tinklo veikimas	4
1.3. Aktyvavimo funkcijos	5
1.4. Nuostolio funkcijos	5
1.5. Optimizavimo funkcijos	6
2. KONVOLIUCINIS NEURONINIS TINKLAS	8
2.1. Konvoliucija	8
2.2. Konvoliucinio neuroninio tinklo sluoksniai	9
2.2.1. Konvoliucinis sluoksnis	9
2.2.2. Sujungimo sluoksnis	9
2.2.3. Pilno sujungimo sluoksnis	9
2.3. Architektūros	10
2.4. Modelio reguliavimas	11
3. TECHNOLOGIJOS	12
3.1. ImageNet	12
3.2. Keras	12
3.3. TensorFlow	12
4. EKSPERIMENTAS	13
4.1. Duomenų rinkinys	13
4.2. Programos veikimas	13
4.3. Modelių mokymas	14
4.3.1. Modelio reguliavimas	14
4.3.2. Modelio modifikavimas	16
REZULTATAI IR IŠVADOS	20
LITERATŪRA	21

Įvadas

Dirbtinių neuroninių tinklų idėja buvo sugalvota 1943 metais [Pit43], bet dėl resursų trūkumo dirbtinių neuroninių tinklų efektyviai ir naudingai taikyti neišėjo. Tobulėjant technologijoms bei kompiuteriams galint vykdyti vis daugiau ir daugiau skaičiavimų dirbtiniai neuroniniai tinklai sparčiai įgijo populiarumą.

Vienas iš pagrindinių sprendžiamų uždavinių yra klasifikacija - procesas, kurio metu yra ieškoma panašių ypatybių tarp skirtingų objektų, pavyzdžiui paveiksliukų, ir jie yra skirstomi į atitinkamas klases [Pau01]. Tokį uždavinį gali atlikti dirbtinių neuroninių tinklų tipas - konvoliuciniai neuroniniai tinklai. Klasifikacijos uždavinys yra aktualus, kadangi jo panaudojimas yra labai skirtingas - nuo medicinos iki savivaldžių automobilių.

Konvoliuciniai neuroniniai tinklai gali būti naudojami:

- Veido atpažinimui - identifikuoti arba verifikuoti asmenį. Pavyzdžiui, DeepFace sistema sukurta FaceBook [TL14], kuri atpažįsta žmonių veidus nuotraukose, arba Face ID sistema sukurta Apple, kuri yra skirta identifikuoti asmenį, kuris bando atrakinti telefoną.
- Medicinoje - širdies, plaučių, prostatos, krūties vėžių [GVR⁺10], akių ligų diagnozavimui [Gau15].
- Žmonių elgesio analizė realiu laiku - DeepGlint nustato žmones nuotraukose ir nuspėja jų elgesį [BX16].
- Vertimas - Google Translate gali versti tekstą iš paveiksliukų realiu laiku [Ras15].

Daugiausia resursų išnaudojanti dirbtinių neuroninių tinklų dalis yra mokymas. Jam reikia skirti daug laiko ir turėti didelę duomenų imtį (angl. dataset), kuriame kiekvienas paveiksliukas turėtų žymę (angl. label). Tačiau realiaame pasaulyje duomenų kiekis ir žmogiškieji bei laiko resursai yra riboti, todėl yra siekiama keičiant dirbtinio neuroninio tinklo architektūrą bei jo parametrus gauti kuo didesnę tikslumą. Dirbtinio neuroninio tinklo tikslumą lemia ne vien kokybiški duomenys, didelį poveikį turi ir tinklo gylis - kiek daug sluoksnių turi dirbtinis neuroninis tinklas.

Šio darbo tikslas yra palyginti skirtingų gylių dirbtinius neuroninius tinklus pagal tikslumą, kai mokymui yra naudojama maža duomenų imtis.

Užduotys:

1. DAR REIKIA SUGALVOTIII
2. Palyginti SGD, Adam, Adagrad ir RMSprop optimizavimo funkcijas.

1. Dirbtinis neuroninis tinklas

Pagal apibendrintą žmogaus smegenų veikimą buvo sugalvoti dirbtiniai neuroniniai tinklai [GBC16]. Bendrai žmogaus smegenys turi šimtus milijardų neuronų, kurie yra sujungti sinapsėmis. Per šiuos neuronus sklinda elektroniniai impulsai, perduodantys informaciją. Tokiu būdu žmonės gali atpažinti objektus, garsus ir t.t. Dirbtiniai neuroniniai tinklai veikia panašiai. Jie turi daug besijungiančių neuronų, kurie gauna informaciją ir pagal tą informaciją gali nuspręsti koks tai objektas. Tačiau ties tuo ir baigiasi žmogaus smegenų ir dirbtinių neuroninių tinklų panašumas, kadangi dirbtiniai neuroniniai tinklai yra matematinis algoritmas su aritmetiniais kintamaisiais. Algoritmas yra suvokiamas tik žmogui, kuris suprogramavo dirbtinį neuroninį tinklą, pačiam tinklui algoritmas nieko nereiškia, nuovokos nesuteikia.

1.1. Dirbtinio neuroninio tinklo sudėtis

Dirbtinis neuroninis tinklas yra sluoksnių rinkinys - neuronų grupė sudaro sluoksnį, kuris yra sujungtas tarpusavyje su kitais sluoksniais [ZGD03]. Vienas iš sluoksnių privalo būti įvesties sluoksnis, kuris atitinkamai pagal užduoti gali gauti įvairios formos informaciją - paveikslukai, vaizdo medžiaga, garsas ir t.t. Ši informacija yra reikalinga tam, kad tinklas galėtų ją išanalizuoti ir išmokti. Tuo tikslu, kad vėliau gavęs panašią informaciją galėtų ją atpažinti - tam reikalingas išvesties sluoksnis. Jis yra priešingame dirbtinio neuroninio tinklo gale negu įvesties sluoksnis. Tarp anksčiau apibūdintų sluoksnių yra įvairaus dydžio vidinė sluoksnių sistema, kuri atlieka pagrindinį darbą [Woo18].

1.2. Dirbtinio neuroninio tinklo veikimas

Jungtys tarp neuronų yra pateiktos skaitine išraiška ir vadinamos svoriu. Kuo didesnis šis svoris tuo didesnę įtaką turi vienas neuronas kitam. Vienam neuronui yra pateikiama visų prieš jį buvusių neuronų informacija ir jungčių svoriai. Kiekvieno neurono informacija yra sudauginama su jo svoriu ir visi šie duomenys yra sudedami tarpusavyje bei pridedama slenksčio reikšmė (angl. bias). Taip iš vektoriaus gaunamas vienas rezultatas ir jei šis rezultatas tinka aktyvavimo funkcijai, jis yra perduodamas tolimesniems neuronams [Shi12]. Tokio tipo veikimo projektavimas yra vadinamas „feedforward“ tinklu.

Tačiau jungčių svoriai nėra pastovūs. Kai dirbtinis neuroninis tinklas mokosi, galutinis rezultatas yra lyginamas su tikėtinu teisingu rezultatu, jei šie rezultatai skiriasi, svoriai yra keičiami atitinkamai [RS17], tai vadinama „backpropagation“. Tokiu būdu yra gerinamas rezultatas ir mažinamas skirtumas tarp tikėtinio ir gauto atsakymo.

1.3. Aktyvavimo funkcijos

Aktyvavimo funkcijų (angl. activation function) yra įvairių, todėl specifinės problemos gali reikalauti vienos ar daugiau konkrečių aktyvavimo funkcijų [VK11]. Pagrindė yra dviejų tipų aktyvavimo funkcijos - tiesinės ir netiesinės. Tiesinės nėra tokios populiarios, kadangi jos neleidžia

įvesčiai būti lanksčiai. Nors tiesinė funkcija labai dažnai naudojama išvesties sluoksnyje. Netiesinės funkcijos dažniausiai naudojamos vidiniuose sluoksniuose. Šiuo metu labiausiai naudojama yra ReLU, kadangi naudojant šią funkciją mokymo rezultatai nuolatos gerėja, tačiau ReLU funkcijos sprautumas nesuteikia efektyvumo tinklui [XWC⁺15].

Aktyvavimo funkcijos yra skirstomos į:

- Tiesinė:
 - Žingsninė (angl. step function) - išėjimas yra 0 arba 1.
- Netiesinė:
 - Sigmoidinė (angl. sigmoid function) - išėjimas intervale [0; 1].
 - Hiperbolinio tangento (angl. hyperbolic tangent) - išėjimas intervale [-1; 1].
 - Minkštojo maksimumo (angl. softmax function) - sunormuoja išėjimo vektorius į 1.
 - ReLU - išėjimas intervale [0; begalybė].

Šio darbo eksperimento dalyje buvo naudotos ReLU ir sigmoidinė aktyvavimo funkcijos.

1.4. Nuostolio funkcijos

Mokantis dirbtiniam neuroninam tinklui jo gaunami rezultatai gali labai skirtis nuo tikėtinų rezultatų, todėl nuostolio funkcija apskaičiuoja kaip stipriai skiriasi gautas rezultatas nuo tikėtino. Kuo didesnis nuostolis tuo toliau nuo teisingo atsakymo yra dirbtinis neuroninis tinklas [Dav15]. Paprasčiausia ir dažniausiai naudojama nuostolio funkcija yra vidutinio kvadrato klaida. Ši funkcija apskaičiuoja kvadratinį skirtumą tarp tikėtino ir gauto rezultatų. Tačiau šios funkcijos vienas iš didesnių trūkumų - neproporcingas išskyrimas didelių rezultatų. Kadangi funkcija didėja kvadratiniai, o ne tiesiniai, kai gaunamas rezultatas tolsta nuo tikėtino rezultato.

Priklausomai nuo to kokią problemą yra bandoma išspręsti yra naudojamos skirtingos funkcijos. Viena iš problemų yra klasifikacijos - dažniausiai išvesties rezultatas yra tikimybės vertė $f(x)$. Bendrai, funkcijos reikšmės dydis parodo gauto rezultato tikslumą. Dauguma klasifikacijos nuostolių funkcijos stengiasi maksimaliai padidinti tikslumą [Agr17].

Kelios klasifikacijos nuostolio funkcijos:

- Binarinė kryžiaus entropija (angl. binary cross entropy).
- Neigiama registravimo tikimybė (angl. negative log likelihood).
- Maržos klasifikatorius (angl. margin classifier).
- Minkštų maržų klasifikatorius (angl. soft margin classifier).

1.5. Optimizavimo funkcijos

Optimizavimo funkcijos naudojamos vidinių tinklo parametrų atnaujinimui, kad sumažinti gaunamų rezultatų netikslumą [Nik16]. Visos optimizavimo funkcijos gali būti suskirstytos į du tipus - nuolatinio mokymosi greičio ir prisitaikančio mokymosi. Lentelėje 1 išvardinti visos populiariausios optimizavimo funkcijos.

1 lentelė. Optimizavimo funkcijos

Pavadinimas	Tipas	Privalumai	Trūkumai	Veikimas
SGD	Nuolatinio mokymosi greičio	Parametrų atnaujinimai turi aukštą dispersiją, kas leidžia lengviau rasti lokalų minimumą.	Didelis svyravimas trukdo konverguoti.	Parametrų atnaujinimas vykdomas kiekvienai mokymo iteracijai.
Adam	Prisitaikančio mokymosi	Greitai konverguoja ir modelio mokymosi greitis yra didelis bei efektyvus.	Praleidžia mažą lokalų minimumą.	Suskaičiuoja mokymosi greitį kiekvienam parametrai bei saugo eksponentiškai nykstantį prieš tai buvusį kvadratinio gradiento vidurkį ir eksponentiškai mažėjantį prieš tai buvusį gradiento vidurkį, panašų į momentą.
Adagrad	Prisitaikančio mokymosi	Nereikia rankiniu būdu derinti mokymosi greičio.	Mokymosi greitis visada yra mažėjantis ir nykstantis, kas lėtina konvergavimą.	Leidžia mokymosi greičiui priklausyti nuo parametrų. Dideli atnaujinimai nedažniems parametrams, maži atnaujinimai dažniems parametrams.
RMSprop	Prisitaikančio mokymosi	Greitai konverguoja.	Momentas nedidina funkcijos efektyvumo.	Dalija mokymosi greitį iš eksponentiškai nykstančio kvadratinio gradiento vidurkio.

Nuolatinio mokymosi greičio funkcijos turi hiperparametrą - mokymosi greitį. Jis privalo būti nustatytas, tačiau pasirinkti tinkamą mokymosi greitį gali būti sudėtinga - pasirinkus per mažą vidiniai parametrai gali labai lėtai konverguoti, o pasirinkus per didelį parametrams gali trukdyti konverguoti ir priversti nuostolio funkciją svyruoti apie minimumą arba diverguoti [Leo98]. Šio tipo funkcijos turi panašų hiperparametrą - momentą - kuris didina mokymosi greitį, kai jis artėja prie minimumo.

Vienos iš pagrindinių problemų nuolatinio mokymosi greičio funkcijų, tai kad jos privalo turėti nustatytus hiperparametrus iš anksto ir jie labai stipriai priklauso nuo modelio bei sprendžiamos problemos. Dar vienas trūkumas - toks pats mokymosi greitis yra pritaikomas visiems vidinių parametrų atnaujinimams.

Prisitaikančio mokymosi funkcijos turi atskirus kiekvieno parametro mokymosi greičio metodus, kurie teikia euristikos metodą, nereikalaujant brangaus rankinio darbo nustatant hiperparametrus mokymosi greičiui. Tačiau šios funkcijos generalizuoja blogiau negu nuolatinio mokymosi greičio funkcijos, nors ir mokymosi metu pasirodo geriau [WRS⁺17].

2. Konvoliucinis neuroninis tinklas

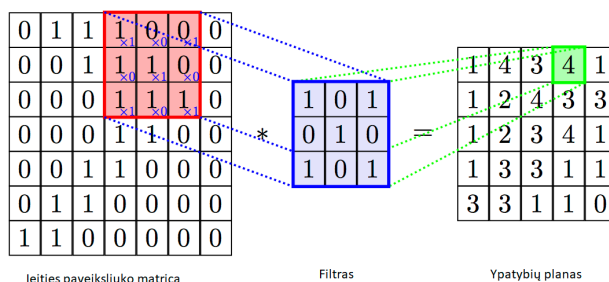
Konvoliuciniai neuroniniai tinklai yra labai panašūs į paprastus dirbtinius neuroninius tinklus (daugiau informacijos skyriuje „Dirbtinis neuroninis tinklas“). Tačiau pagrindinis skirtumas tarp šių tinklų yra, kad konvoliucinio įvesties sluoksnis priima tik tai paveikslukus, kurie jei padaryti su standartine skaitmenine kamera, turi tris komponentus - raudoną, žalią ir mėlyną. Šiuos komponentus galima įsivaizduoti kaip tris 2D matricas sudėtas viena ant kitos. Kiekvienos matricos i-osios eilutės ir j-ojo stulpelio elementas atitinka nuotraukos pikselį, kurio reikšmė yra intervale nuo 0 iki 255. Kadangi naudojamos informacijos tipas yra specifinis, tai labai sumažina tinklo parametrų kiekį ir tinklą padaro efektyvesnį [YK18].

Objektų atpažinimas paveikslukuose yra sudėtingas dėl šių iššūkių:

- Segmentavimas - paveikslukai gali atvaizduoti įvairias scenas, kuriose gali būti pavaizduota daug objektų, kurie vienas kita gali dalinai uždengti.
- Šviesa - pikselių intensyvumas gali būti paveiktas šviesos šaltinio ar pačio objekto.
- Deformacija - objektai gali būti deformuoti įvairiais būdais, pavyzdžiui, kiekvieno žmogaus ranka parašyti skaičiai skiriasi.
- Galimybės - objektų klasės dažnai nustatomos pagal tai kaip patys objektai yra naudojami, pavyzdžiui, kėdės yra objektai sukurti sėdėti, tačiau jos gali turėti įvairų dizainą.
- Žvilgsnio taškas - keičiant vietą iš kurios yra žiūrima gali keistis objekto forma, informacija šokinėja per įvesties sluoksnio dimensiją (t.y. pikselius).

2.1. Konvoliucija

Konvoliucija yra matematinė operacija, kuri apibūdina taisyklę, kuri parodo kaip reikia sujungti du informacijos rinkinius [PG17]. Paveikslukų analizėje, statinė ir pagrindinė funkcija yra įvesties paveikslukas, kuris yra analizuojamas, o antroji, judanti funkcija, žinoma kaip filtras, nes ji išskiria paveiksluko ypatybę. Abi funkcijos yra susietos daugyba (2 pav.).



1 pav. Konvoliucijos veikimas

Tačiau konvoliuciniai tinklai turi daug filtrų, kurie pereina per vieną paveiksluką, kiekvienas išskirdamas skirtingą paveiksluko ypatybę [Epp17]. Pirmuose sluoksniuose šiuos filtras galima apibūdinti kaip horizontalių, vertikalinių ar įstrižių linijų filtras, kurie sukuria paveikslėlio kraštų planą. Tinklas paima visus filtras, gabaliukus paveikslukų ypatybių vietų, ir juos sudeda į planą, kuris parodo ypatybės vietą. Mokydamasis skirtingų proporcijų ypatybių, tinklas leidžia lengvai kurti greitą ypatybių atpažinimą.

2.2. Konvoliucinio neuroninio tinklo sluoksniai

Konvoliuciniai neuroniniai tinklai tai yra sluoksnių rinkinys, kuris turi įvesties, vidinius ir išvesties sluoksnius. Tačiau priklausomai kokio tipo konvoliucinis neuroninis tinklas vidiniai sluoksniai gali skirtis. Konvoliuciniai neuroniniai tinklai turi tris pagrindinius sluoksnių tipus, kurie sudaro vidinį sluoksnį. Šie tipai yra konvoliucinis, sujungimo ir pilno sujungimo sluoksniai [RPA⁺18].

2.2.1. Konvoliucinis sluoksnis

Konvoliucinis sluoksnis yra pagrindinis konvoliucinio neuroninio tinklo sluoksnis, kuris atlieka daugiausia skaičiavimų, nustato visas paveiksluko ypatybes. Kadangi, įvesties informacija (paveikslukas) yra didelės dimensijos neefektyvu visų neuronų sujungti vienus su kitais, todėl neuronai yra sujungiami su lokaliu informacijos kiekiu, kuris yra lygus filtro dydžiui ir vadinamas erdvinio mastu [Li15].

Neuronų kiekis po konvoliucijos (ypatybių plano dydis) yra nustatomas trimis parametrais:

- Gylis - atitinka filtrų skaičių.
- Žingsnis - pikselių kiekis, kuris parodo per kiek reikia slinkti filtro matrica per įvesties informacijos matricą.
- Nulių pamušalas - įvesties informacijos matricos kraštus užpildyti nuliais.

2.2.2. Sujungimo sluoksnis

Periodiškai sujungimo sluoksnis yra įterpiamas tarp konvoliucinių. Pagrindinis sluoksnio tikslas yra laipsniškai mažinti erdvinį filtruojamo paveiksluko mastą. Šis veiksmas yra atliekamas tam, kad sumažinti parametų ir skaičiavimų kiekį bei kontroliuoti perjungimą. Sujungimo sluoksnis veikia nepriklausomai nuo kiekvieno gabalėlio gylio ir keičia jo dydį erdviškai, naudodamas MAX operaciją [LGT18]. Dažniausiai šis sluoksnis yra naudojamas su 2x2 dydžio filtru - kas antras po konvoliucijos gauto gabaliuko kiekvienas gylio sluoksnis yra mažinamas per pusę ties ilgiu ir pločiu, taip yra atsikratoma 75 procentų aktyvacijų. Po šios operacijos gabaliuko gylis nepasikeičia.

Dažniausiai yra naudojamos dvi šio sluoksnio variacijos. Pirmasis yra vadinamas persidengiantis sujungimas, kur filtro dydis yra lygus 3 ir žingsnis yra lygus 2. O kitas dažniau naudojamas turi filtro dydį lygų 2 ir žingsnį taip pat 2. Sujungimo sluoksniai su labai dideliais parametrais yra destruktivūs.

2.2.3. Pilno sujungimo sluoksnis

Konvoliucinio ir sujungimo sluoksnių išeitys yra aukšto lygio ypatybės, kurios yra gautos iš įvesties paveiksluko. Pilno sujungimo sluoksnis yra sujungtas su visais neuronais iš sluoksnio buvusio prieš jį. Šio sluoksnio tikslas yra panaudojant tas ypatybes, kurios yra gautos iš prieš tai buvusių sluoksnių, nustatyti kokioms klasėms priklauso įvesties paveikslukas pagal mokymo informacijos rinkinį, kai neuroninio tinklo problema yra klasifikacija [Kar16]. Jei šiam sluoksniui yra naudojama minkštojo maksimumo funkcija tuomet sudėtis visų gautų galimybių turi būti lygi

1. Minkštojo maksimumo funkcija priima vektorių įvertinimų ir jų suspaudžia į vektorius, kuriame yra klasių tikimybių įvertinimai intervale nuo 0 iki 1, kur tikimybė arčiausiai vieneto reiškia, kad yra užtikrintas dėl tos klasės.

2.3. Architektūros

Konvoliuciniai neuroniniai tinklai turi keletą skirtingų architektūrų, kurios naudojamos pagal sprendžiamą problemą. 1 lentelėje pateikta informaciją apie įvairias architektūras.

2 lentelė. Konvoliucinių neuroninių tinklų architektūros

Pavadinimas	Metai	Parametrų kiekis	Veikimas	ILSVRC vieta
LeNet	1998	60 000	Geriausiai atpažįsta ranka parašytus skaičius. Susideda iš sluoksnių - kelių pasikartojančių konvoliucijos ir sujungimo bei pasibaigia dviem pilno sujungimo sluoksniais.	-
AlexNet	2012	60 000 000	Veikimu panašus į LeNet, tačiau turi daug daugiau parametrų ir filtrų bei sudėtus konvoliucinius sluoksnius.	pirma
GoogLeNet/Inception	2014	4 000 000	Vidiniai sluoksniai sudėti paraleliai, naudojami Inception moduliai. Vienas modulis savyje turi 1x1, 3x3 ir 5x5 dydžių konvoliucijos filtrų bei vidurkio sudėjimo sluoksnius.	pirma
VGGNet	2014	138 000 000	Panašus veikimas į AlexNet, tačiau daug gilesnis. Naudojamų filtrų dydis yra 3x3 ir jie yra sudėti vienas po kito.	antra
ResNet	2015	25 000 000	Turi labai daug sluoksnių, sudėtų vienas po kito, kurie turi liekamąjį bloką, kuris įvesties informaciją perduoda tolimesniam sluoksniui ją pridėdamas ir taip sumažina konvoliucijos ir aktyvavimo funkcijų kiekį.	pirma

2.4. Modelio reguliavimas

Pilnas konvoliucinio neuroninio tinklo apmokymas gali užtrukti labai ilgą laiką ir išnaudoti daug resursų. Todėl yra kai kurios įstaigos arba žmonės, kurie apmoko savo tinklą ir jo svorius bei reikšmes, vadinamą modeliu, pateikia visuomenei, tačiau šis modelis yra nepritaikytas individualiai žmogaus užduočiai. Modelį reikia reguliuoti - iš naujo apmokyti paskutinius sluoksnius su individualios užduoties parametrais.

Daugelis konvoliucinių neuroninių tinklų apmokytų su natūraliais paveiksliais turi fenomeną. Pirmuosiuose sluoksniuose jie išmoksta ypatybių panašių į Gaboro filtrą (tiesinis filtras naudojamas tekstūroms analizuoti) ir spalvų dėmes. Šios pirmojo sluoksnio ypatybės nepriklauso nuo duomenų rinkinio, bet yra bendros ir tinkamos daugeliui duomenų rinkinių ir užduočių [YCB⁺14]. Dėl šio fenomeno galima naudoti modelius neapmokytus su specifiniu duomenų rinkiniu, bet jį minimaliai modifikuotą, kitoms užduotims spręsti, kas leidžia sutaupyti resursų bei turėti mažesnę duomenų rinkinį.

3. Technologijos

Naudojamų technologijų išsirinkimas yra pradinis žingsnis siekiant įvykdyti kursiniame darbe išsikeltas užduotis. Šiame skyriuje pateiktos populiariausios šių laikų technologijos bei glaustai apribėžti jų pagrindiniai funkcionalumai.

3.1. ImageNet

Projektas ImageNet buvo sugalvotas profesorės Li Fei-Fei 2009 metais. Projekto tikslas buvo sukurti didelę sukatégorizuotų paveiksliukų ir jų etikečių duomenų bazę, kuri būtų skirta vizualinio objekto atpažinimo programinės įrangos tyrimams. Ši duomenų bazė yra suorganizuota pagal WorldNet hierarchija - anglų kalbos žodžiai yra grupuojami į sinonimų rinkinius, kurie turi apibūdinimus ir naudojimo pavyzdžius bei saugo ryšių kiekį tarp sinonimų arba jų narių. ImageNet turi daugiau nei 100 000 sinonimų rinkinių, kur didžioji dalis yra daiktavardžiai (80 000+).

ImageNet projektas kiekvienais metais daro konkursą vadinamą „ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge“ (trumpinys ILSVRC). Konkurso užduotis yra išmokinti modelį, kuris galėtų įvesties paveiksliuką teisingai klasifikuoti į 1000 skirtingų objektų klasių, kurios atitinka realius daiktus, gyvūnus ir t.t. Modeliai yra apmokomi su apie 1.2 milijonų paveiksliukų ir dar 50 000 paveiksliukų yra naudojami validacijai mokymo metu bei 100 000 paveiksliukų yra panaudojami galutiniam modelio testavimui. Šis konkursas yra paveiksliukų klasifikacijos algoritmų etalonas.

3.2. Keras

Keras yra aukšto lygio programų sąsaja skirta neuroniniams tinklams. Sąsaja parašyta su „Python“ programavimo kalba ir vidinėje pusėje galinti veikti su „TensorFlow“ ir kitomis bibliotekomis. Keras buvo sukurtas tikintis suteikti greitą eksperimentavimą, kad sugalvojus idėją pasiekti rezultato būtų galima su kiek įmanoma mažiau uždelsimo.

Ši sąsaja savyje turi visus pagrindinius neuroninio tinklo kūrimo blokus, pavyzdžiui, sluoksniai, aktyvavimo ir optimizavimo funkcijos. Taip pat Keras suteikia modelius, kurie yra apmokyti naudojant ImageNet duomenų bazę. Šiuos modelius galima reguliuoti, pridėti papildomų sluoksnių, pasirinkti esamus sluoksnius bei juos iš naujo apmokyti.

3.3. TensorFlow

TensorFlow yra atviros programinės įrangos biblioteka skirta aukšto našumo skaitiniams skaičiavimams. Jo lanksti architektūra leidžia lengvai diegti skaičiavimus įvairiose platformose - procesoriuose, grafikos procesoriuose. Sukurtas „Google“ dirbtinio intelekto skyriaus, tad yra labai palaikomas automatinis ir gilusis mokymasis, tačiau dėl bibliotekos ir skaičiavimų lankstumo yra naudojamas įvairiose mokslinėse srityse.

4. Eksperimentas

Šio eksperimento tikslas yra išanalizuoti mokymosi tikslumą su skirtingų gylių neuroniniais tinklais, kai mokymui yra naudojamas mažas paveikslėlių rinkinys. Taigi, pirmas šio eksperimento žingsnis - išsirinkti konvoliucinį neuroninį tinklą. Poskyriuje „Architektūros” yra trumpai apibūdinti pagrindiniai konvoliucinių neuroninių tinklų tipai. Iš jų buvo išsirinktas VGG, kadangi jo veikimas ir sluoksnių išsidėstymas yra tinkamiausi išsikeltam tikslui įgyvendinti. Buvo nuspręsta daryti paprastą, binarinę paveikslėlių klasifikaciją - nustatymas ar katė, ar šuo pavaizduotas paveikslėlyje.

4.1. Duomenų rinkinys

Šiais laikais konvoliuciniai neuroniniai tinklai pranoksta prieš tai buvusias naujausias technologijas naudotas paveikslukų klasifikacijai. Viena iš pagrindinių priežasčių yra dideli ir gerai aprašyti duomenų rinkiniai, kaip kad ImageNet duomenų bazė. Geriausiai tinklas pasirodo, kai yra apmokomas su bendromis ypatybėmis ir dar efektyviau pasirodo kai yra sureguliuoti su specifiniu duomenų rinkiniu [CMB⁺16]. Optimalus duomenų kiekis, kad gerai sureguliuoti modelį yra apie 10 000 paveikslukų.

Tačiau realybėje visų klasių objektų paveikslukų nėra be galo daug, kadangi reikia turėti daug paveikslukų ir skirti labai daug laiko bei žmogiškųjų resursų jų žymėjimui. Todėl tenka tinklus apmokyti su limituotais duomenų rinkiniais. Pagal šią realaus pasaulio problemą buvo įvykdyta viena iš eksperimento tikslo sąlygų - mažas duomenų rinkinys. Buvo surastas ir naudotas duomenų rinkinys, kuris turi 10 000 paveikslėlių - 8 000 mokymosi tikslui ir 2 000 validacijos.

4.2. Programos veikimas

Ankstesniame skyriuje „Technologijos” yra išvardintos visos technologijos, kurios buvo naudotos šio eksperimento programai parašyti.

Ruošiantis eksperimentui reikia paruošti kompiuterį darbui - įrašyti „Python” programavimo įrankius, paruošti „Anaconda” komandinę eilutę, „NVIDIA CUDA” įrankius, Keras ir TensorFlow. Tačiau kompiuteris privalo turėti tinkamą procesorių ar grafinį procesoriaus bloką - kompiuteris, kurį naudoju turėjo Nvidia 1080 Ti. Programa, kuri reguliuoja modelį ir modifikuoja, nelabai skiriasi, tad modelio reguliavimo eiga, kuri buvo vėliau pritaikyta ir modifikavimo daliai.

Modelio reguliavimui pirmiausia reikia turėti modelį, kurį galima reguliuoti. Keras pateikia modelius, apmokytus su ImageNet, ir jų svorius, tad reikia tik importuoti tinkamą modelį - šiuo atveju VGG16. Importavimo metu reikia nustatyti, kad pilnai sujungtas sluoksnis nebūtų pridėtas, kadangi tada galima parinkti kokių dimensijų paveikslukai naudojami ir kiek spalvų sluoksnių jie turi (standartiniai paveikslukai turi 3). Tuomet reikia nustatyti kokius importuoto modelio sluoksnius norima mokinti ir kuriuos - ne. Iš visų esamų sluoksnių mokinimui buvo parinkti tik paskutiniai 4, kadangi jie yra atsakingi už specifinių ypatybių išmokimą. Po šių egzistuojančio modelio paruošimų reikia sukurti naują Kero modelį, prie kurio reikia pridėti paruoštą egzistuojantį modelį bei pridėti kelis kitus sluoksnius tam tikru išsidėstymu - plokštinimo, tankumo, išmetimo ir tankumo. Pirmasis išmetimo sluoksnis turi aktyvacijos funkciją ReLU, o paskutinis - sigmoidinę. Po

visų sluoksnių pridėjimo modelis iš viso turėjo 40 406 849 parametrų, iš kurių mokinami buvo 32 771 585, o tik 7 635 264 buvo nekeičiami.

Naudotų sluoksnių paaiškinimai:

- Plokštinimo sluoksnis - skirtas tam, kad įeinančius duomenis suploti į atitinkamą sluoksnių skaičių, jeigu sluoksnio parametras nenustatytas suplojama į vieną sluoksnį.
- Tankumo sluoksnis - atlieka tokią pačią funkciją kaip kad pilno sujungimo sluoksnis (daugiau informacijos poskyriuje „Pilno sujungimo sluoksnis“).
- Išmetimo sluoksnis - sluoksnyje atsitiktinai yra išjungiami tam tikri neuronai su Bernulio pasiskirstymo tikimybe. Dažniausiai nustatytas 50 procentų.

Po modelio paruošimo, reikia nustatyti kokio dydžio paveikslėlių paketais bus mokomas ir validuojamas modelis. Kadangi partijų dydį reikia nustatyti pagal kompiuterio atmintį, po parametrų bandymų buvo nustatyta, kad geriausi dydžiai yra mokymosi partijai 100 paveikslėlių, o validacijos - 25. Tuomet nustatomas paveikslėlių aplankalo kelias, jų ir partijos dydis bei nustatomas klasės režimas į binarinį, nes duomenų rinkinys susideda iš dviejų klasių - kačių ir šunų.

Paruošę modelį bei paveikslėlių rinkinį, galima pradėti mokinti ir validuoti modelį. Taigi, nustatomas modelio kompiliavimo metodas, kur turi būti - nuostolio ir optimizavimo funkcijos. Daugiau apie nuostolio ir optimizavimo funkcijas galima skaityti skyriuose „Nuostolio funkcijos” ir „Optimizavimo funkcijos”. Tačiau nuostolio funkcija šiame modelyje yra binarinė kryžiaus entropija bei ji yra nekeičiama viso eksperimento metu. Šio eksperimento metu bus naudojamos keturios optimizavimo funkcijos - SGD, Adam, Adagrad ir RMSprop. Po modelio sukompiliavimo yra aprašomas mokymo metodas, kuriam turi būti pateikta - paruošti paveikslukai, žingsnis per epochą, epochų kiekis, paruošti validacijos paveikslukai ir jų žingsnis. Taigi, šiame eksperimente epocha yra nustatyta 80, kadangi tokia išeina pagal visų turimų paveikslukų skaičių ir paketo dydį.

Modelio modifikavimo veikimas yra toks pats išskyrus, kad pridedami ne 4 sluoksniai, o 14 sluoksnių, kurie visi yra tankumo sluoksniai su aktyvacijos funkcija ReLu. Jie yra pridedami tarp plokštinimo ir kito tankumo sluoksnio. Po visų sluoksnių pridėjimo iš viso buvo 51 952 449 parametrų, iš kurių buvo 44 317 185 mokinami, o tiek pat buvo nemokinami kaip ir reguliuojant modelį. Taigi, modifikavimo metu prisidėjo papildomi 11 545 600 parametrų.

4.3. Modelių mokymas

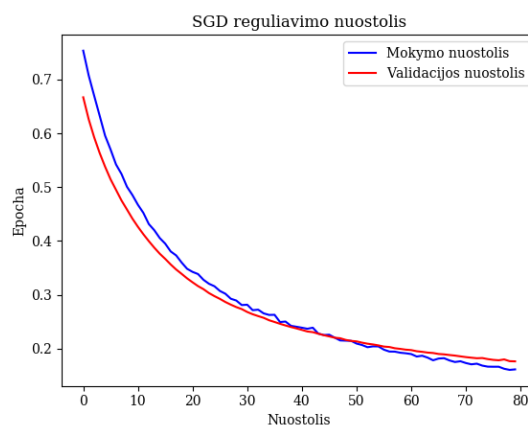
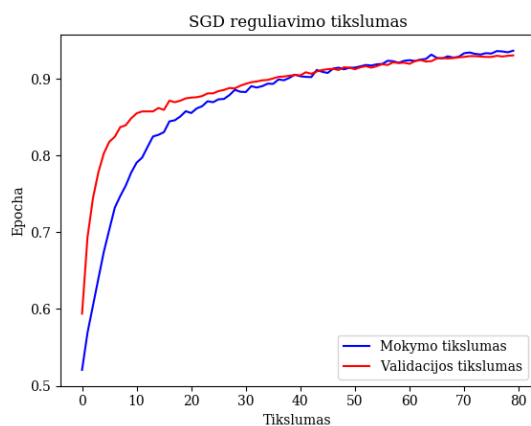
Parašius programas, kurios reguliuoja bei modifikuoja modelį, buvo pradėta jį mokyti ir validuoti su skirtingomis optimizavimo funkcijomis. Mokymosi greitis buvo išrinktas $1e-4$, kas yra 0.0001.

4.3.1. Modelio reguliavimas

Pasirinkta buvo pradėti eksperimentą nuo modelio modifikavimo, kadangi tokiu būdu galima pamatyti kaip modelio paskutiniai keli sluoksniai yra apmokomi ir kaip tikslumas ir nuostolis keičiasi mokymo metu, kai yra naudojamas negilus modelis.

Taigi, pirmiausiai buvo pasirinkta SGD optimizavimo funkcija. Apmokius modelį buvo gauti

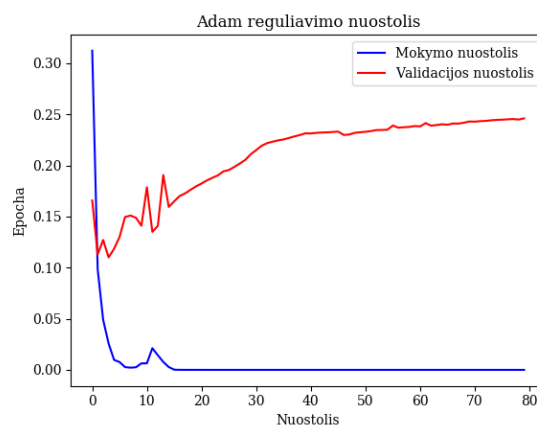
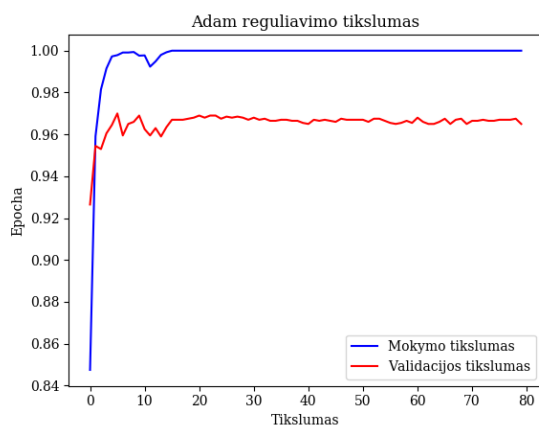
grafikai - 3 ir 4 paveikslukai.



2 pav. Modelio mokymosi ir validacijos tikslu- 3 pav. Modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant SGD

Grafikas (3 pav.) parodo, kad tikslumas kyla kuo daugiau modelis išmoka ir validacijos funkcija pirmiausiai pranoksta mokymosi, bet vėliau susilygina. Aukščiausias tikslumo rezultatas yra apie 94 procentus. Grafikas (4 pav.) rodo nuostolį per epochas. Iš jo matoma, kad mokymosi ir validacijos nuostoliai ties 47 epocha susikerta ir validacijos nuostoliai tampa didesni už mokymosi.

Vėliau keičiama optimizavimo funkcija į Adam - mokymosi rezultatai matomi grafikuose - 5 ir 6 paveikslukuose.

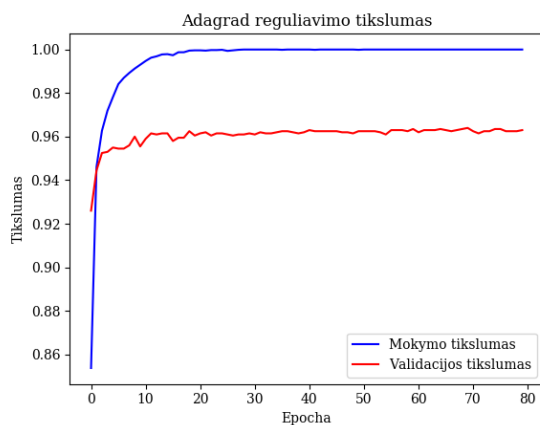


4 pav. Modelio mokymosi ir validacijos tikslu- 5 pav. Modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant Adam

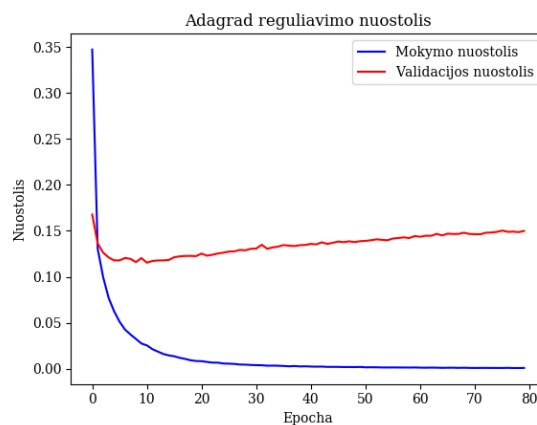
Tikslumo grafikas (5 pav.) parodo, kad mokymosi tikslumas per kelias pirmas epochas pasiekia beveik 100 procentinį tikslumą, tačiau validacijos lieka apie 96 procentus ir daugiau nebekyla. O nuostolio grafikas (6 pav.) parodo, kad mokymosi nuostolis staigiai nukrenta iki beveik 0 procentų nuostolių. Tačiau validacijos nuostoliai per kelias epochas nukrenta, o po to staigiai pradeda augti ir išsilygina ties 24 procentais.

Trečiasis testuojama optimizavimo funkcija yra Adagrad. Jos grafikai yra 7 ir 8 paveikslukai.

Galima daryti išvadą, jog tikslumo grafikas (7 pav.) parodo, kad mokymosi tikslumas per pirmas 20 epochų pakyla beveik iki 100 procentų, o validacijos tikslumas pakyla iki 96 procentų ir



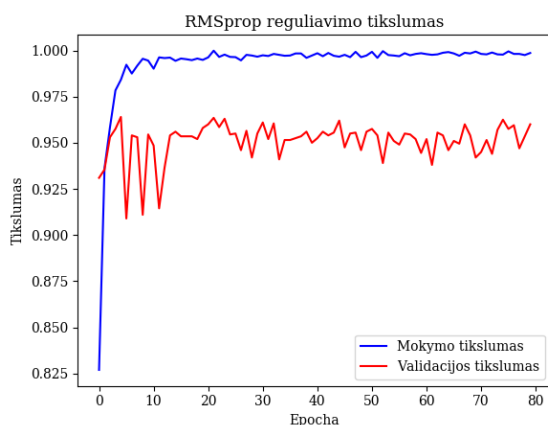
6 pav. Modelio mokymosi ir validacijos tikslumas naudojant Adagrad



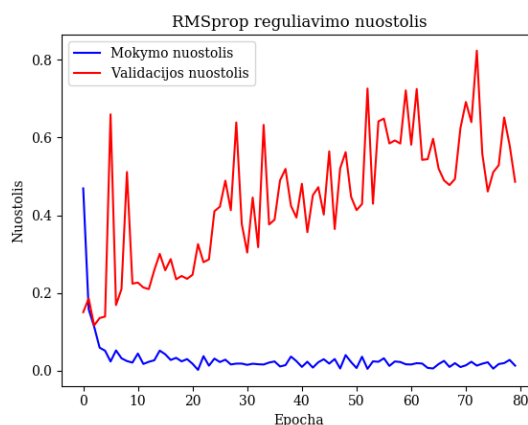
7 pav. Modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant Adagrad

ties tiek pasilieka. O nuostolio grafikas (8 pav.) parodo, kad taip pat kaip ir mokymosi tikslumas taip ir nuostolis per pirmas 20 epochų nukrenta iki beveik 0 procentų ir ties ten lieka. Kai validacijos nuostolis nukrenta iki tolygiai auga iki 11 procentų, o po to tolygiai kyla iki 15 procentų.

Paskutinis bandymo optimizavimo funkcija yra RMSprop. Ji yra parodyta 9 ir 10 paveikslukuose.



8 pav. Modelio mokymosi ir validacijos tikslumas naudojant RMSprop



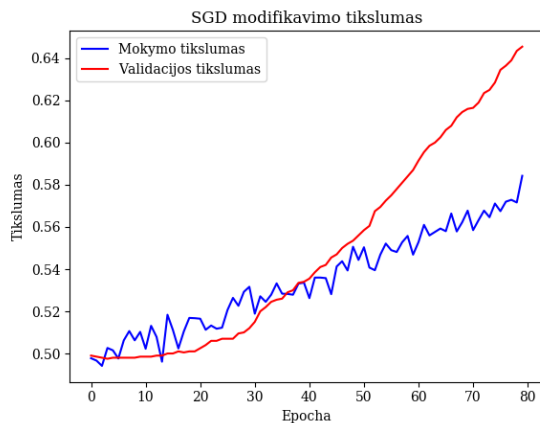
9 pav. Modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant RMSprop

Tad, tikslumo grafikas (9 pav.) parodo, kad mokymosi funkcija šokteli iki 100 procentų ir ten išsilaiko, kai validacijos funkcija stipriai svyruoja tarp 93 ir 95 procentų, bet per visas epochas neišsilygina. O nuostolio grafikas (10 pav.) parodo, kad mokymosi funkcija nukrenta iki beveik 0 procentų ir ten išsilaiko. Tačiau validacijos funkcija labai stipriai svyruoja ir didėja. Pasiekdama aukščiausią nuostolį ties 82 procentais.

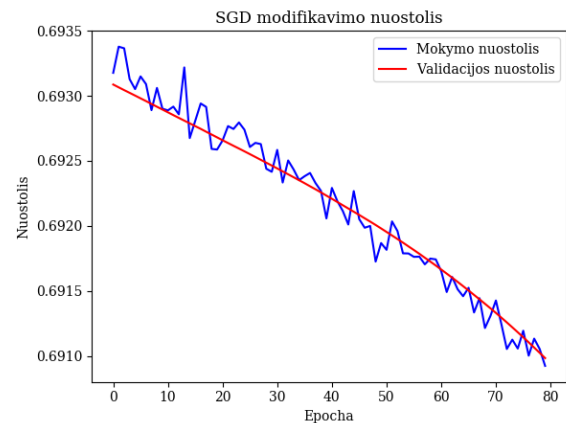
4.3.2. Modelio modifikavimas

Iš naujo apmokyti modeliai su 14 papildomų sluoksnių. Visi parametrai ir duomenų rinkinys liko tokie patys tik optimizavimo funkcija vėl buvo keičiama.

Kaip ir prieš tai pirmoji modifikavimo funkcija yra SGD. Jos grafikai yra 11 ir 12 paveikslukai.



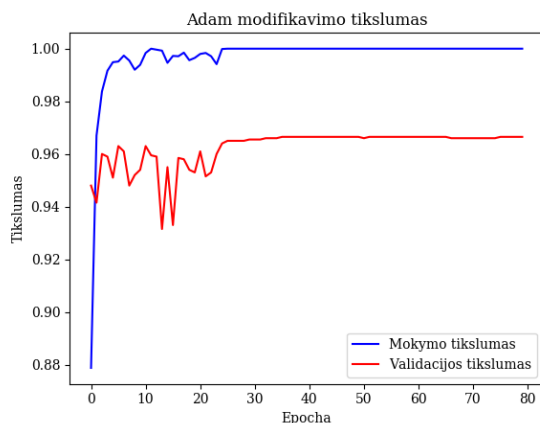
10 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos tikslumas naudojant SGD



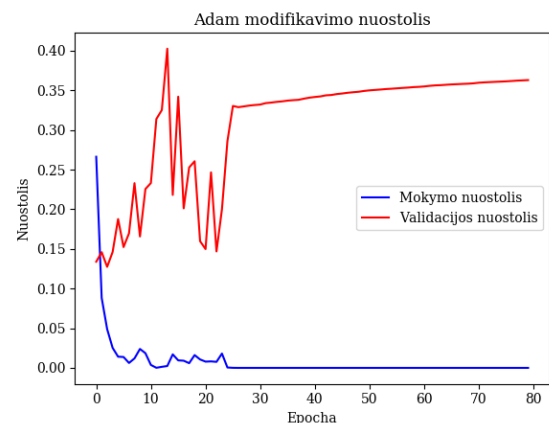
11 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant SGD

Tikslumo grafikas (11 pav.) matyti, kad mokymosi funkcija tolygiai svyruojančiai didėja, tačiau validacijos tikslumas ties 37 epocha pranoksta mokymosi bei pati validacijos funkcija tolygiai kyla ir neturi tokių svyravimų kaip mokymosi. Palyginus su 3 paveiksluko tikslumu, po papildomų sluoksnių pridėjimo nei validacijos nei mokymosi tikslumas nepasiekia tokio aukšto tikslumo, koks buvo mažesnio gylio modelyje. Nuostolio grafike (12 pav.) parodyta, kad mokymosi ir validacijos funkcijos tolygiai mažėja, tačiau mokymosi svyruoja. Tačiau mažiausias nuostolis šiame grafike yra 69 procentai, kai 4 paveiksluke, kur parodyta netokio gilaus modelio nuostoliai, mažiausi pasiekti nuostoliai yra 20 procentų.

Antra bandoma optimizavimo funkcija yra Adam. Jos grafikai yra 13 ir 14 paveikslukai.



12 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos tikslumas naudojant Adam

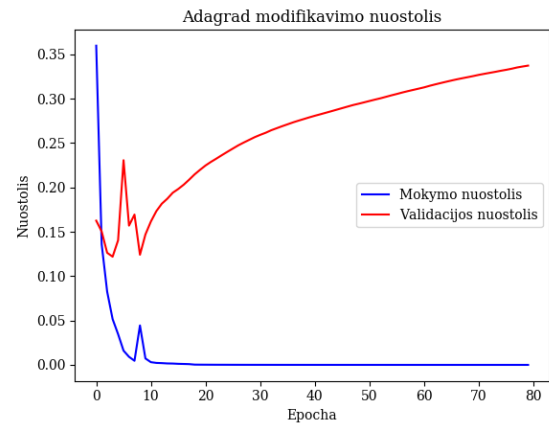
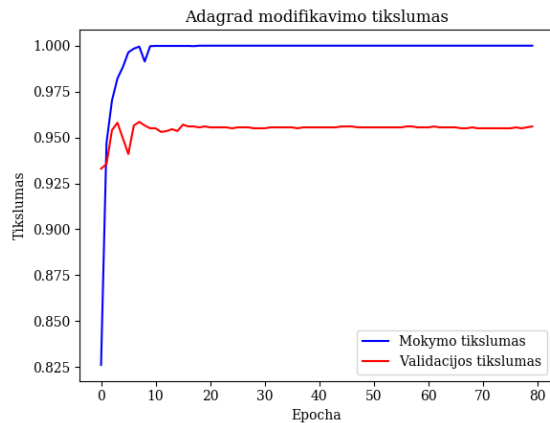


13 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant Adam

Tikslumo grafiką (13 pav.) palyginus su 5 paveiksluku matyti, kad mokymosi tikslumo funkcija pakilo iki 100 procentų, panašiu greičiu. Validacijos funkcija gilesniame modelyje pirmose 25 epochų ganėtinai stipriai svyravo, tačiau po to išsilygino ties 96 procentais. Tačiau nuostolio grafikas (14 pav.) labai skiriasi nuo 6 paveiksluko, kur parodyta ne tokio gilaus modelio nuostolis.

Mokymosi funkcija kaip ir mažesnio gylio modelio mažėja iki 0 procentų, tačiau validacijos nuostolis daug stipriau svyruoja pirmose 25 epochose, o po to išsilygina ir pradeda tolygiai didėti, pasiekdama didžiausia nuostolį ties 36 procentais.

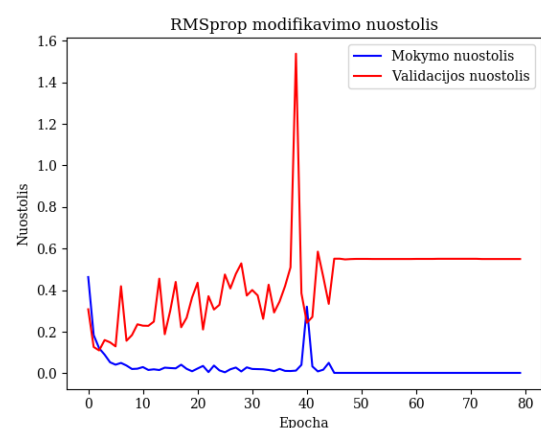
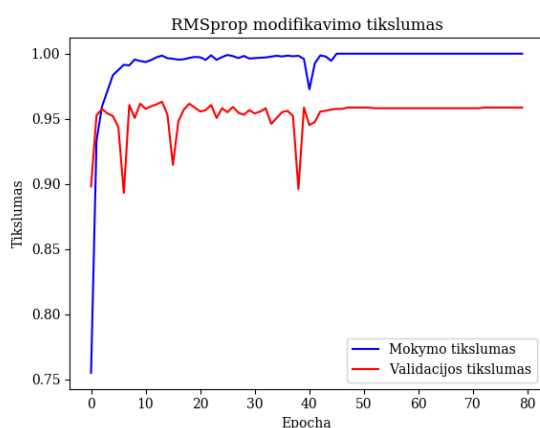
Prieš paskutinę funkciją yra Adagrad. Šios funkcijos grafikai yra 15 ir 16 paveikslukai.



14 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos tikslumas naudojant Adagrad 15 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant Adagrad

Tikslumo grafikas (15 pav.) yra labai panašus į mažesnio gylio tikslumo grafiką (7 pav.), kadangi mokymosi tikslumo funkcijos yra beveik vienodos, o validacija šiuo atveju yra šiek tiek mažesnio tikslumo gilesniame modelyje - susilygina ties 95 procentais. Nuostolio grafikas (16 pav.) kaip ir 8 paveiksluke, parodo, kad mokymosi nuostolis staigiai mažėja iki 0 procentų. O validacijos nuostolis pirmose 10 epochų stipriai svyruoja ir po to sparčiai auga ir pasiekia maksimalią nuostolio reikšmę ties 34 procentais, kai mažesnio gylio modelio yra apie 15 procentų.

Paskutinė optimizavimo funkcija yra RMSprop. Jos grafikai yra 17 ir 18 paveikslukai.



16 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos tikslumas naudojant RMSprop 17 pav. Gilesnio modelio mokymosi ir validacijos nuostolis naudojant RMSprop

Tikslumo grafike (17 pav.) matyti, kad mokymosi funkcija pakyla iki 100 procentų, o validacijos funkcija svyruoja iki 40 epochos, o po to išsilygina ties 95 procentais, kai toks pat rezultatas matomas ir 9 paveikslėlyje, kuriame parodyta mažiau gilaus modelio tikslumas. Nuostolio grafikas

(18 pav.) parodo, kad mokymosi funkcija pasiekia 0 procentų. Tačiau validacijos funkcija svyruoja pirmas 45 epochas, o po to išsilygina ties 55 procentais.

Rezultatai ir išvados

Darbo rezultatai:

- Pasirinktas tiriamas konvoliucinis neuroninis tinklas - VGG.
- Sukurta programa, kuri reguliuotų ir modifikuotų pasirinktą konvoliucinį neuroninį tinklą.
- Apmokytas reguliuotas ir modifikuotas modelis.
- Mokymo metu buvo keičiamos optimizavimo funkcijos - iš viso panaudotos SGD, Adam, Adagrad ir RMSprop funkcijos.
- Gauti modelio mokymo ir validacijos tikslumo ir nuostolio grafikai.

Darbo išvados:

- Apmokius skirtingų gylių neuroninius tinklus, buvo nustatyta, kad gilesnis tinklas mokomojoje dalyje pasirodė labai gerai - tikslumas auga ir nuostolis mažėja iki 0 procentų, tačiau validacijos metu tikslumas pakyla iki tam tikros reikšmės ir pasidaro pastovus, o praradimas tolygiai auga. Galima daryti išvadą, kad gilesnis neuroninis tinklas su mažu kiekiu duomenų gali juos įsiminti, o ne išmokti atpažinti.
- Mažo gylio modeliuose geriausia naudoti Adagrad optimizavimo funkciją, kadangi jos pasiektas validacijos tikslumas yra 96 procentai, nors ir Adam funkcija pasiekė tokį patį tikslumą. Tačiau Adam funkcijos validacijos nuostolis 80 epochoje siekė 25 procentus, kai Adagrad siekė tik 15 procentų ir augimo tendencija buvo daug mažesnė.
- Didesnio gylio modeliuose geriau naudoti Adam optimizavimo funkciją, kadangi validacijos tikslumas yra 96 procentai, o nuostolio funkcija pasiekia 35 procentus. O Adagrad funkcija pasiekia tikslumą 95 procentų ir nuostolį 35 procentų, tačiau turi labai didelę augimo tendenciją.

Literatūra

- [Agr17] Apoorva Agrawal. Loss functions and optimization algorithms. <https://medium.com/data-science-group-iitr/loss-functions-and-optimization-algorithms-demystified-bb92daff331c>. 2017.
- [BX16] Su Chang, Bian Ziyang, Xu Tingfa ir Luo Xuan. Human abnormal behavior detection based on rgb-d video's skeleton information entropy. *Proceedings of the 2015 international conference on communications, signal processing, and systems*. Springer Berlin Heidelberg, 2016, p. 715–723. ISBN: 978-3-662-49831-6.
- [CMB⁺16] Brian Chu, Vashisht Madhavan, Oscar Beijbom, Judy Hoffman ir Trevor Darrell. Best practices for fine-tuning visual classifiers to new domains. *Computer vision - ECCV 2016 workshops - amsterdam, the netherlands, october 8-10 and 15-16, 2016, proceedings, part III*, 2016, p. 435–442. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-49409-8_34.
- [Dav15] Cameron Davidson-Pilon. *Bayesian methods for hackers*. Addison-Wesley Professional, 2015.
- [Epp17] Sagi Eppel. Setting an attention region for convolutional neural networks using region selective features, for recognition of materials within glass vessels. *Corr*, abs/1708.08711, 2017. arXiv: 1708.08711. URL: <http://arxiv.org/abs/1708.08711>.
- [Gau15] Ranjana Raut, Gauri Borkhade. Application of neural network for diagnosing eye disease. *International journal of electronics, communication and soft computing science engineering (ijecscse)*, 4:174–176, 2015. Published By International Journal of Electronics, Communication and Soft Computing Science and Engineering.
- [GBC16] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio ir Aaron Courville. *Deep learning*. MIT Press, 2016. <http://www.deeplearningbook.org>.
- [GVR⁺10] N. Ganesan, K. Venkatesh, M. A. Rama ir A. Malathi Palani. Article: application of neural networks in diagnosing cancer disease using demographic data. *International journal of computer applications*, 1(26):76–85, 2010-02. Published By Foundation of Computer Science.
- [YCB⁺14] Jason Yosinski, Jeff Clune, Yoshua Bengio ir Hod Lipson. How transferable are features in deep neural networks? *Corr*, abs/1411.1792, 2014. arXiv: 1411.1792. URL: <http://arxiv.org/abs/1411.1792>.
- [YK18] Adam JATOWT, Yihong ZHANG ir Yukiko KAWAI. Picture or words: predicting twitter image post popularity with deep learning, 2018. URL: <http://db-event.jp/jpn.org/deim2018/data/papers/365.pdf>.
- [Kar16] Ujjwal Karn. An intuitive explanation of convolutional neural networks. <https://ujjwalkarn.me/2016/08/11/intuitive-explanation-convnets/>. 2016.

- [Leo98] C.T. Leondes. *Image processing and pattern recognition. Neural Network Systems Techniques and Applications*. Elsevier Science, 1998, p. 323–324. ISBN: 9780080551449. URL: <https://books.google.lt/books?id=oDewAeVxr-4C>.
- [LGT18] C. Y. Lee, P. Gallagher ir Z. Tu. Generalizing pooling functions in cnns: mixed, gated, and tree. *Ieee transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 40(4):863–875, 2018-04. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/TPAMI.2017.2703082.
- [Li15] Fei-Fei Li. Convolutional neural networks. <https://cs231n.github.io/convolutional-networks/>. 2015.
- [Nik16] Mina Niknafs. Neural network optimization. 2016.
- [Pau01] Colm O’ Riordan Paul O’ Dea Josephine Griffith. Combining feature selection and neural networks for solving classification problems. *Intelligent exploration of the web*:389–401, 2001-07.
- [PG17] Josh Patterson ir Adam Gibson. *Deep learning*. O’Reilly Media, Inc., 2017.
- [Pit43] Warren S. McCullochWalter Pitts. A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of mathematical biophysics*, 5:115–133, 1943-12. ISSN: 0007-4985. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02478259>.
- [Ras15] Sebastian Raschka. *Python machine learning*. Packt Publishing, 2015, p. 342–343. ISBN: 1783555130, 9781783555130.
- [RPA⁺18] Reza Reiazi, Reza Paydar, Ali Abbasian Ardakani ir Maryam Etedadialiabadi. Mam-mography lesion detection using faster r-cnn detector. 2018-01.
- [RS17] Thaqif Rajab ir Roselina Salleh. Classification of diabetes disease using backpropa-gation and radial basis function network. 2:3–4, 2017.
- [Shi12] D. Shiffman. *The nature of code*. D. Shiffman, 2012. dalis 10. ISBN: 9780985930806. URL: <https://books.google.lt/books?id=hoK6lgEACAAJ>.
- [TL14] Ranzato Marc’Aurelio Taigman Yaniv Yang Ming ir Wolf Lior. Deepface: closing the gap to human-level performance in face verification. *Proceedings of the 2014 iee conference on computer vision and pattern recognition*. IEEE Computer Society, 2014, p. 1701–1708. ISBN: 978-1-4799-5118-5. DOI: 10.1109/CVPR.2014.220. URL: <https://doi.org/10.1109/CVPR.2014.220>.
- [VK11] A Vehbi Olgac ir Bekir Karlik. Performance analysis of various activation functions in generalized mlp architectures of neural networks. 1:111–122, 2011-02.
- [Woo18] C. Woodford. Neural networks. <https://www.explainthatstuff.com/introduction-to-neural-networks.html>. 2018.
- [WRS⁺17] A. C. Wilson, R. Roelofs, M. Stern, N. Srebro ir B. Recht. The Marginal Value of Adaptive Gradient Methods in Machine Learning. *Arxiv e-prints*, 2017. eprint: 1705.08292 (stat.ML).

- [XWC⁺15] Bing Xu, Naiyan Wang, Tianqi Chen ir Mu Li. Empirical evaluation of rectified activations in convolutional network. *Corr*, abs/1505.00853, 2015. arXiv: 1505 . 00853. URL: <http://arxiv.org/abs/1505.00853>.
- [ZGD03] Qi-Jun Zhang, K. C. Gupta ir V. K. Devabhaktuni. Artificial neural networks for rf and microwave design - from theory to practice. *Ieee transactions on microwave theory and techniques*, 51(4):1339–1350, 2003-04. ISSN: 0018-9480. DOI: 10 . 1109/TMTT . 2003.809179.