

VILNIAUS UNIVERSITETAS
MATEMATIKOS IR INFORMATIKOS FAKULTETAS
PROGRAMŲ SISTEMŲ KATEDRA

**Labai panašių neuroninių klasių atskyrimas
dirbtiniais neuroniniais tinklais**

**(Separation of very similar neuronal classes by artificial neural
networks)**

Kursinis darbas

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

Vilnius – 2018

TURINYS

ĮVADAS	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	7
2.1. Konvoliucija	7
2.2. Konvoliucinio neuroninio tinklo sluoksniai	8
2.2.1. Konvoliucinis sluoksnis	8
2.2.2. Sujungimo sluoksnis	8
2.2.3. Pilno sujungimo sluoksnis	8
2.3. Modelio reguliavimas	9
2.4. Architektūros	9
3. EKSPERIMENTAS	11
3.1. Technologijos	11
3.1.1. ImageNet	11
3.1.2. Keras	11
3.1.3. TensorFlow	11
3.2. Work work work	11
REZULTATAI IR IŠVADOS	13
LITERATŪRA	14

Įvadas

Darbo tikslas: patikrinti mokymosi tikslumo kokybę su skirtingų gylių dirbtiniais neuroniniais tinklais, kai mokymui yra naudojamas mažas paveikslėlių rinkinys.

Užduotys:

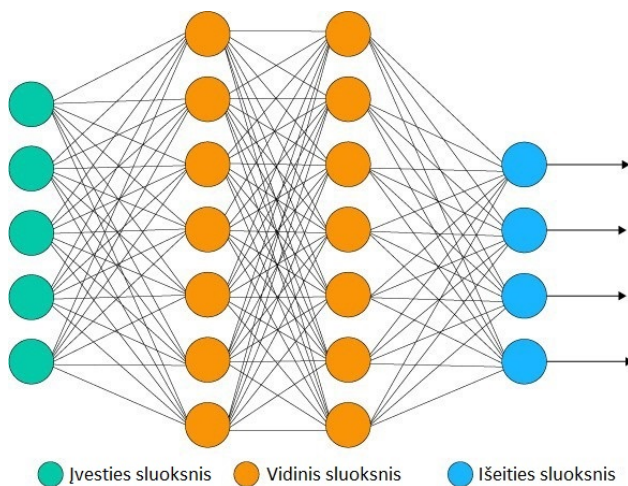
1. Pasirinkti analizuojamą dirbtinį neuroninį tinklą.
2. Pritaikyti ir modifikuoti neuronų tinklą išsikeltam darbo tikslui.
3. Gautą neuronų tinklą su skirtingais gyliais apmokyti.
4. Surasti ir naudoti geriausią optimizavimo funkciją.

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 tuos neuronus sklinda elektroniniai impulsai perduodantys informaciją - taip žmonės gali atpažinti objektus, garsus ir t.t. Dirbtiniai neuroniniai tinklai veikia panašiai. Jie irgi turi daug besijungiančių neuronų, kurie gauna informaciją ir pagal tą informaciją gali nuspręsti koks objektas yra paveikslėlyje. Tačiau ties tuo ir baigiasi žmogaus smegenų ir dirbtinių neuroninių tinklų panašumas, kadangi dirbtiniai neuroniniai tinklai yra kompiuterinė simuliacija - matematinis algoritmas su aritmetiniais kintamaisiais. Ši simuliacija yra suvokiama tik žmogui, kuris suprogramavo dirbtinį neuroninį tinklą, pačiam tinklui simuliacija nieko nereiškia, nuovokos nesuteikia.

1.1. Dirbtinio neuroninio tinklo sudėtis

Dirbtinis neuroninis tinklas yra sluoksnių rinkinys (1 pav.) - neuronų grupė sudaro sluoksnį, kuris yra sujungtas tarpusavyje su kitais sluoksniais. Vienas iš sluoksnių privalo būti įvesties sluoksnis, kuris atitinkamai pagal užduotį gali gauti įvairios formos informaciją - paveiksliukai, 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 išeities sluoksnis. Jis yra priešingame dirbtinio neuroninio tinklo gale negu įeities sluoksnis. Tarp anksčiau apibūdintų sluoksnių yra įvairaus dydžio sluoksnių sistema, kuri atlieka pagrindinį darbą [Woo18].



1 pav. Sluoksnių rinkinys

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. Taip iš vektoriaus gaunamas vienas

rezultatas ir jei šis rezultatas tinka aktyvavimo funkcijai, jis yra perduodamas tolimesniems neuronams. Tokio tipo veikimo dizainas 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, tai vadinama „backpropagation”. Tokiu būdu yra gerinamas rezultatas ir mažinamas skirtumas tarp tikėtino ir gauto atsakymų.

1.3. Aktyvavimo funkcijos

Aktyvavimo funkcijų yra įvairių, kadangi sprendžiant tam tikrą problemą yra geriau naudoti vienas funkcijas, o kitas problemas - kitas funkcijas. 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 išeities 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 (binarinė) - išėjimas yra 0 arba 1.
- Netiesinė:
 - Sigmoidinė - išėjimas intervale [0; 1].
 - Hiperbolinio tangento - išėjimas intervale [-1; 1].
 - Minkštojo maksimumo - sunormuoja išėjimo vektorius į 1.
 - ReLU - išėjimas intervale [0; begalybė].

1.4. Nuostolio funkcijos

Kai dirbtinis neuroninis tinklas mokosi, 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 išeities 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.
- Neigiama registravimo tikimybė.

- Maržos klasifikatorius.
- Minkštų maržų klasifikatorius.

1.5. Optimizavimo funkcijos

Optimizavimo funkcijos naudojamos vidinių tinklo parametrų atnaujinimui, kad sumažinti gaunamų rezultatų netikslumą. Visos optimizavimo funkcijos gali būti suskirtos į du tipus - nuolatinio mokymosi greičio ir prisitaikančio mokymosi.

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. Šio tipo funkcijos turi panašų hiperparametrą - momentą - kuris didina mokymosi greitį, kai jis artėja prie minimumo.

Vienos iš pagrindinių problemų nuolatinio mokymosi greičio funkcijų, kad jos privalo turėti nustatytus hiperparametrus iš anksto ir jie labai stipriai priklauso nuo modelio ir sprendžiamos problemos. Dar vienas trūkumas, kad 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 darbo rankiniu būdu 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

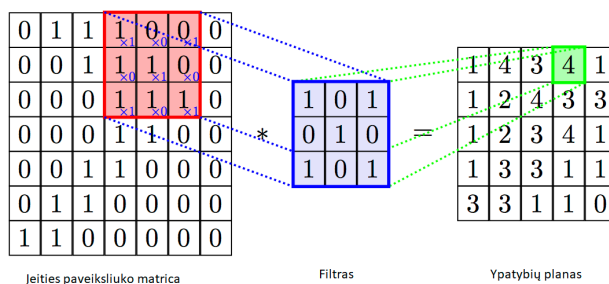
Konvoliuciniai neuroniniai tinklai yra labai panašūs į paprastus dirbtinius neuroninius tinklus (daugiau informacijos skyriuje „Dirbtinis neuroninis tinklas“). Tačiau pagrindinis skirtumas tarp šių tinklų yra, kad konvoliucinio įėjties sluoksnis priima tik tai paveikslukus, kurie jei padaryti su standartine 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.

Objektų atpažinimas paveikslukuose yra sudėtingas dėl šių iššukių:

- 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 įėjties 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 įėjties paveikslukas, kuris yra analizuojamas, o antroji, judanti funkcija, žinoma kaip filtras, nes ji išskiria paveiksluko ypatybę. Abi funkcijos yra susietos daugyba (2 pav.).



2 pav. Konvoliucijos veikimas

Tačiau konvoliuciniai tinklai turi daug filtrų, kurie pereina per vieną paveiksluką, kiekvienas išskirdamas skirtingą paveiksluko ypatybę. Pirmuose sluoksniuose šiuos filtrus galima įsivaizduoti kaip horizontalių, vertikalinių ar įstrižių linijų filtrus, kurie sukuria paveikslėlio kraštų planą. Tinklas paima visus filtrus, 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 įėjties, vidinius ir išėjties 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.

2.2.1. Konvoliucinis sluoksnis

Šis sluoksnis yra pagrindinis konvoliucinio neuroninio tinklo sluoksnis, kuris atlieka daugiausia skaičiavimų, nustato visas paveiksluko ypatybes. Kadangi, įėjties informacija (paveikslukas) yra didelės dimencijos 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 matricą per įėjties informacijos matricą.
- Nulių pamušalas - įėjties informacijos matricios 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 veikslas 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. 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 labai destruktavyūs.

2.2.3. Pilno sujungimo sluoksnis

Konvoliucinio ir sujungimo sluoksnių išeitis yra aukšto lygio ypatybės, kurios yra gautos iš įėjties 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 įėjties 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 jį suspaudžia į vektorius, kuriame

yra klasių tikimybių įvertinimai intervale nuo 0 iki 1, kur tikimybė arčiausiai vieneto reiškia, kad labiausiai užtikrintas dėl tos klasės.

2.3. 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 išmoka 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 modifikuoti, kitoms užduotims spręsti, kas leidžia sutaupyti resursų bei turėti mažesnę duomenų rinkinį.

2.4. Architektūros

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

Pavadinimas	Metai	Parametrų kiekis	Veikimas	ILSVRC vieta
LeNet	1998	60 000	Geriausiai atpažysta 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 įeities informaciją perduoda tolimesniam sluoksniui ją pridėdamas ir taip sumažina konvoliucijos ir aktyvavimo funkcijų kiekį.	pirma

1 lentelė. Konvoliucinių neuroninių tinklų architektūros

3. Eksperimentas

Šiame skyriuje pateikta kaip buvo įvykdytos išsikeltos užduotys.

3.1. Technologijos

Naudojamų technologijų išsirinkimas yra pradinis žingsnis siekiant įvykdyti išsikeltas užduotys. Šiame skyriuje pateiktos populiariausios šių laikų technologijos bei trumpai papasakota apie jas.

3.1.1. ImageNet

ImageNet yra projektas sugalvotas profesorės Li Fei-Fei 2009 metais. Projekto tikslas buvo sukurti didelę sukatégorizuotų paveikslukų 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+).

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

3.1.2. 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.

3.1.3. TensorFlow

TensorFlow yra atviros programinės įrangos biblioteka skirta aukšto našumo skaitinimas 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.

3.2.

dataset: 8000 train 2000 validate

epoch - 40 trainbatch - 200 valbatch - 50

ft: layers = 23 trainable = 8 total param - 40 406 849 trainable - 32 771 585 netrainable - 7 635 264

add lay: layer = 34 trainable = 19 total param - 51 952 449 trainable - 44 317 185 netrainable - 7 635 264

Rezultatai ir išvados

Darbo rezultatai:

- Pasirinktas tiriamas konvoliucinis neuroninis tinklas - VGG.
- Rasta geriausia ir tinkamiausia optimizavimo funkcija - XX.
- VGG buvo pritaikytas ir modifikuotas išsikeltam tikslui.
- Konvoliucinis neuroninis tinklas buvo apmokytas.

Darbo išvados:

-
-

Literatūra

- [Agr17] Apoorva Agrawal. Loss functions and optimization algorithms. <https://medium.com/data-science-group-iitr/loss-functions-and-optimization-algorithms-demystified-bb92daff331c>. 2017.
- [Dav15] Cameron Davidson-Pilon. *Bayesian methods for hackers*. Addison-Wesley Professional, 2015.
- [GBC16] Ian Goodfellow, Yoshua Bengio ir Aaron Courville. *Deep learning*. MIT Press, 2016. <http://www.deeplearningbook.org>.
- [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>.
- [Kar16] Ujjwal Karn. An intuitive explanation of convolutional neural networks. <https://ujjwalkarn.me/2016/08/11/intuitive-explanation-convnets/>. 2016.
- [Li15] Fei-Fei Li. Convolutional neural networks. <https://cs231n.github.io/convolutional-networks/>. 2015.
- [PG17] Josh Patterson ir Adam Gibson. *Deep learning*. O'Reilly Media, Inc., 2017.
- [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>.