

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

**INFORMATIKOS FAKULTETAS**

INTELEKTIKOS PAGRINDAI (P176B101)

**PROJEKTO ATASKAITA**

**„Devanagari simbolių atpažinimas“**

Atliko:

Martynas Kaunas IFF-6/14

Deividas Pečiulionis IFB-6

Gediminas Milašius IFF-6/2

Priėmė:

Doc. Germanas Budnikas

**KAUNAS 2019**

**Turinys**

[**1.** **Projekto užduotis** 2](#_Toc9080071)

[**2.** **Duomenys** 2](#_Toc9080072)

[**2.1.** **Duomenų pavyzdžiai** 2](#_Toc9080073)

[**2.2.** **Duomenų valymas** 4](#_Toc9080074)

[**2.3.** **Dimensijų sumažinimas** 5](#_Toc9080075)

[**3.** **Metodas su mokytoju Nr.1 (Simbolio kontūro intensyvumo žemėlapis)** 6](#_Toc9080076)

[**3.1.** **Metodo veikimas** 6](#_Toc9080077)

[**3.2.** **Rezultatai ir eksperimentai** 8](#_Toc9080078)

[**3.2.1.** **Bendras metodo tikslumas kryžminės patikros iteracijose** 8](#_Toc9080079)

[**3.2.2.** **Skaitmenų atpažinimo tikslumas kryžminės patikros iteracijose** 9](#_Toc9080080)

[**3.2.3.** **Metodo tikslumo priklausomybė nuo BwThreshold reikšmės** 11](#_Toc9080081)

[**3.2.4.** **Metodo tikslumo priklausomybė nuo paveikslėlio dimensijų** 12](#_Toc9080082)

[**3.2.5.** **Metodo tikslumo priklausomybė nuo atitikimo žemėlapiui ribos** 13](#_Toc9080083)

[**4.** **Metodas su mokytoju Nr.2 (Neuroninis tinklas)** 14](#_Toc9080084)

[**4.1.** **Metodo veikimas** 14](#_Toc9080085)

[**4.2.** **Rezultatai ir eksperimentai** 15](#_Toc9080086)

[**4.2.1.** **Bendras metodo tikslumas kryžminės patikros iteracijose** 15](#_Toc9080087)

[**4.2.3.** **Metodo tikslumo priklausomybė nuo paveikslėlio dimensijų** 17](#_Toc9080088)

[**4.2.4.** **Metodo tikslumo priklausomybė nuo BwThreshold reikšmės** 19](#_Toc9080089)

[**5.** **Metodų palyginimas** 20](#_Toc9080090)

[**6.** **Išvados** 21](#_Toc9080091)

[**7.** **Programos kodas** 22](#_Toc9080092)

[**7.1.** **Program.cs** 22](#_Toc9080093)

[**7.2.** **NeuralNetwork.cs** 31](#_Toc9080094)

[**7.3.** **Image.cs** 33](#_Toc9080095)

[**8.** **Šaltiniai** 34](#_Toc9080096)

# **Projekto užduotis**

Devanagari – alfabetas, kuris daugiausia naudojamas Indijos subkontinento bei Himalajų kalnų tautų kalbose.

Šio darbo tikslas – sukurti programą, kuri gebėtų atpažinti ir klasifikuoti .png formatu pateiktus ranka parašytų Devanagari simbolių paveikslėlius.

Tikslui pasiekti naudojami mašininio mokymosi metodai.

Programoje siekiama panaudoti keletą duomenų apdorojimo bei daugiau nei vieną skirtingą mašininiu mokymusi paremtą simbolių atpažinimo metodą.

Mašininio mokymosi metodų tikslumo įvertinimui naudojama kelių duomenų sluoksnių (k-fold) kryžminė patikra.

# **Duomenys**

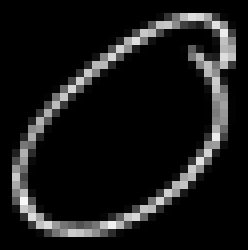
Projekte naudojami .png formato, 32x32 pikselių dydžio, ranka parašytų Devanagari simbolių paveikslėliai. Duomenys gauti iš mašininio mokymosi užduočių duomenų archyvo:

<https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Devanagari+Handwritten+Character+Dataset>

Devanagari alfabetą viso sudaro 47 skirtingi simboliai. Atsižvelgiant į skaičiavimų trukmę ir galimus skaičiavimo resursų poreikius, projekte apsiribojama 10-mi simbolių, kuriais išreiškiami alfabeto skaitmenys 0-9.

Duomenų rinkinyje yra po 2000 paveikslėlių kiekvienam Devanagari skaitmeniui. Taigi viso – 20000 paveikslėlių.

# **Duomenų pavyzdžiai**

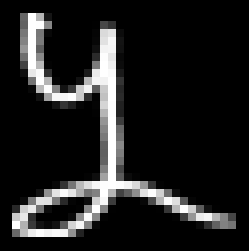
Šiame skyriuje pateikiami pavyzdiniai paveikslėliai kiekvienam iš 10 projekte naudojamų skaitmenų.

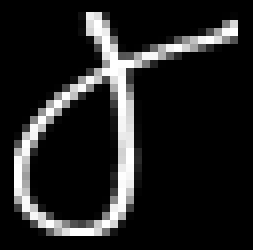
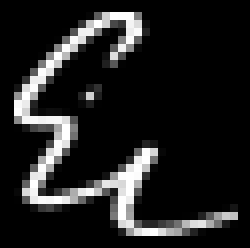
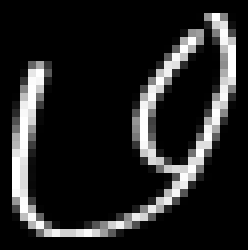
pav. 4 Devanagari "3"

pav. 3 Devanagari "2"

pav. 2 Devanagari "1"

pav. 1 Devanagari "0"



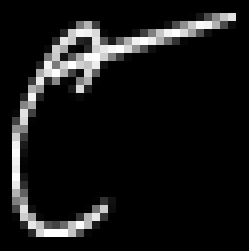
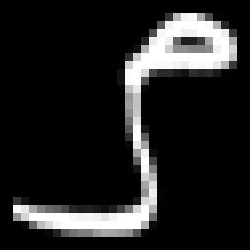


pav. 8 Devanagari "7"

pav. 7Devanagari "6"

pav. 6 Devanagari "5"

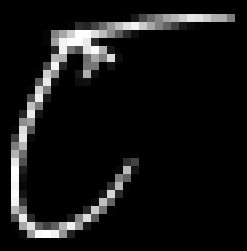
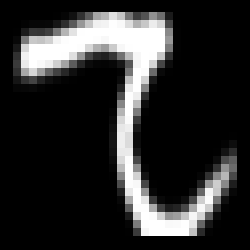
pav. 5 Devanagari "4"



pav. 10 Devanagari "9"

pav. 9 Devanagari "8"

Taip pat verta pastebėti, kad kiekvieno simbolio išvaizda 2000 paveikslėlių rinkiniuose stipriai varijuoja. Pavyzdžiui, nors visi trys pav. 11-13 pavaizduoti simboliai atrodo labai skirtingai, bet reiškia tą patį – „8“.



pav. 13 Devanagari "8" 3

pav. 11 Devanagari "8" 1

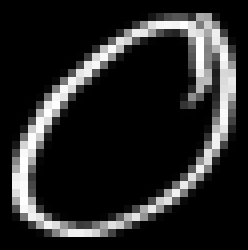
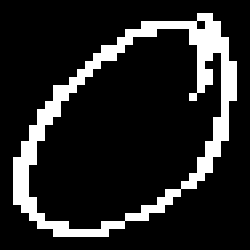
pav. 12 Devanagari "8" 2

# **Duomenų valymas**

Programoje duomenų valymą apima du pagrindiniai metodai:

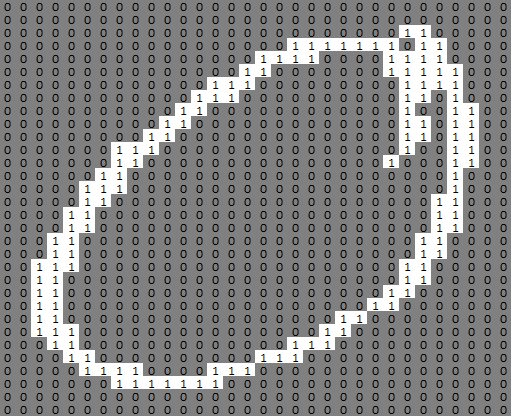
* **ImageToBlackWhite()** – Gautas duomenų failo paveikslėlis yra apdorojamas taip, kad visi pilkų atspalvių pikseliai būtų paversti juodais arba baltais pagal programoje pasirinktą šviesumo slenkstį.
* **ImageToMatrix()** – Gautas juodai/baltas paveikslėlis konvertuojamas į dvejetainę matricą, kuri naudojama vėlesniuose skaičiavimuose.

Pateikiama šių metodų veikimo schema su pavyzdiniu Devanagari nulį vaizduojančiu paveisklėliu:



**ImageToBlackWhite()**

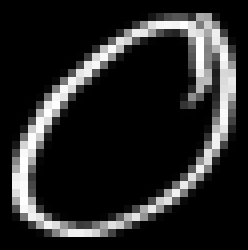
**ImageToMatrix()**



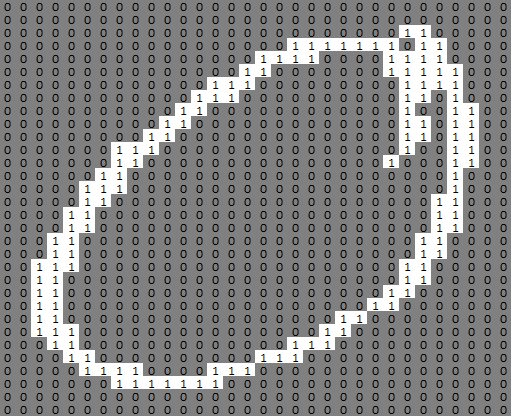
# **Dimensijų sumažinimas**

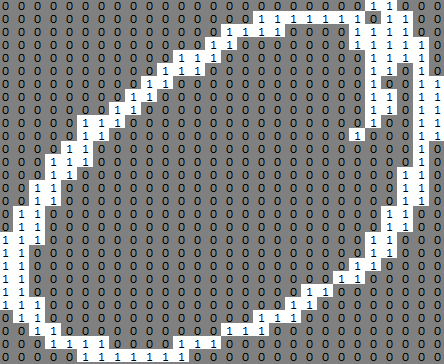
Dimensijų sumažinimas programoje gali būti atliekamas dviem skirtingais būdais:

* **Paveikslėlio sutraukimas** – paveikslėlis performuojamas į pasirinktą dydį. Pavyzdžiui 32x32 -> 16x16
* **Apkarpymas** – į matricą konvertuotas paveikslėlis apkarpomas taip, kad jo kraštuose nebeliktų tuščių juodų eilučių ir stulpelių.



**Sutraukimas į 16x16**





**Apkarpymas**

# **Metodas su mokytoju Nr.1 (Simbolio kontūro intensyvumo žemėlapis)**

Pirmasis programoje naudojamas simbolių atpažinimo metodas yra paremtas simbolio kontūro intensyvumo žemėlapio (angl. Heatmap) naudojimu.

# **Metodo veikimas**

Pirmiausia turimi duomenys apdorojami duomenų valymo ir dimensijų sumažinimo metodais (žr. 2.2 ir 2.3 skyrius). Paveikslėliai konvertuojami į dvejetaines matricas ir yra sumažinami arba apkarpomi.

Toliau vykdoma metodo kryžminė patikra. Visi duomenys padalinami į pasirinktą skaičių „sluoksnių“. Vienas duomenų sluoksnis naudojamas testavimui, likę – apmokymui. Kiekvienoje kryžminės patikros iteracijoje testavimui parenkamas vis kitas padalintų duomenų sluoksnis.

Kiekvienos kryžminės patikros iteracijos metu apskaičiuojamas kiekvieno simbolio atpažinimo tikslumas atskirai bei bendras modelio tikslumas. Iteracijos modelio apmokymo metu naudojami metodai TrainSymbolMatrix() ir Training(). Iteracijos modelio testavimą atlieka metodas Testing().

Apmokymo metu iš visų apmokymui skirtų failų yra formuojami kiekvieno simbolio intensyvumo žemėlapiai (angl. - Heatmap). Šie žemėlapiai atspindi, kaip po apmokymo modelis įsivaizduoja vieno ar kito simbolio formą. Kaip pavyzdys pateikiamas apmokymo metu gautas skaičiaus „0“ intensyvumo žemėlapis:

lentelė modelio apmokymo metu gautas Devanagari skaitmens „0“ kontūro intensyvumo žemėlapis

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 3 | 10 | 41 | 114 | 221 | 316 | 366 | 338 | 286 | 202 | 126 | 46 | 8 | 0 |
| 0 | 3 | 65 | 266 | 576 | 842 | 1058 | 1192 | 1234 | 1114 | 990 | 732 | 452 | 233 | 65 | 0 |
| 0 | 27 | 274 | 583 | 774 | 891 | 955 | 930 | 878 | 867 | 853 | 875 | 790 | 466 | 169 | 0 |
| 0 | 157 | 553 | 775 | 822 | 758 | 566 | 465 | 457 | 492 | 569 | 681 | 861 | 763 | 357 | 0 |
| 0 | 328 | 786 | 853 | 657 | 372 | 207 | 137 | 141 | 184 | 273 | 404 | 669 | 920 | 555 | 0 |
| 0 | 628 | 954 | 740 | 303 | 115 | 57 | 35 | 42 | 64 | 97 | 204 | 448 | 927 | 808 | 0 |
| 0 | 943 | 1035 | 425 | 97 | 33 | 18 | 14 | 20 | 19 | 31 | 70 | 290 | 874 | 1021 | 0 |
| 0 | 1180 | 1058 | 155 | 29 | 13 | 7 | 8 | 7 | 8 | 13 | 28 | 166 | 876 | 1118 | 0 |
| 0 | 1317 | 942 | 77 | 19 | 9 | 4 | 2 | 3 | 5 | 8 | 36 | 146 | 911 | 1023 | 0 |
| 0 | 1269 | 879 | 167 | 19 | 5 | 1 | 1 | 1 | 2 | 22 | 71 | 294 | 915 | 803 | 0 |
| 0 | 1000 | 975 | 429 | 92 | 22 | 3 | 1 | 4 | 21 | 68 | 245 | 600 | 821 | 479 | 0 |
| 0 | 422 | 1052 | 760 | 429 | 224 | 112 | 82 | 112 | 211 | 436 | 706 | 781 | 530 | 168 | 0 |
| 0 | 56 | 607 | 1018 | 895 | 735 | 639 | 644 | 733 | 876 | 923 | 742 | 449 | 147 | 17 | 0 |
| 0 | 1 | 43 | 359 | 793 | 1073 | 1175 | 1204 | 1081 | 821 | 536 | 289 | 80 | 12 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Toks žemėlapis sudaromas kiekvienam Devanagari skaitmeniui. Šie žemėlapiai rodo, kiek kartų per visus apmokymui skirtus failus kiekviename failo pikselyje pasikartoja „balta“ reikšmė. (dvejetainės matricos 1-etas).

Kiekvienas testavimui pateiktas simbolio paveikslėlis yra lyginamas su visais kontūro intensyvumo žemėlapiais, geriausiai atitinkantis žemėlapis nurodo, kaip programa klasifikuoja simbolį.

Testavimo metu naudojamas parametras „riba“ kuris nurodo, kokia intensyvumo žemėlapio reikšmio rodo į testuojamo failo panašumą į žemėlapį.

T.y: jei žemėlapio reikšmė > riba ir testuojamas pikselis = 1 (balta) tai panašumas++.

Smarkiai supaprastintas testavimo idėjos pavyzdys galėtų atrodyti taip:

Tarkime turime simbolius simbolius A ir B. Jų intensyvumo žemėlapiai sudaryti iš penkių apmokymo failų atrodo taip:

A

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 5 | 4 | 5 |
| 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 4 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | B   |  |  |  | | --- | --- | --- | | 1 | 0 | 0 | | 4 | 5 | 0 | | 1 | 5 | 0 | |

Panašumo riba = 2. Testavimui pateikiama simbolio dvejetainė matrica:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 |

Panašumas su A žemėlapiu bus = 4, panašumas su B žemėlapiu bus = 1.

Simbolis bus klasifikuojamas kaip A.

# **Rezultatai ir eksperimentai**

Šiame skyriuje pateikiami programos veikimo tikslumo grafikai. Naudotos parametrų reikšmės – BwThreshold – 0.5, simbolio sutraukimo dydis – 16x16, atitikimo žemėlapiui riba – 300.

# **Bendras metodo tikslumas kryžminės patikros iteracijose**

pav. 14 Bendras metodo 1 tikslumas KP iteracijose

Matome, kad bendras metodo, kuris naudoja simbolių kontūro intensyvumo žemėlapį, tikslumas svyruoja tarp 62-82%. Tai nėra labai blogas tikslumas, tačiau vis tiek reiškia, kad dalyje iteracijų nemažai simbolių klasifikuojama neteisingai.

# **Skaitmenų atpažinimo tikslumas kryžminės patikros iteracijose**

pav. 15 Skaitmenų atpažinimas pirmojoje KP iteracijoje

pav. 15 Skaitmenų atpažinimas ketvirtojoje KP iteracijoje

pav. 16 Skaitmenų atpažinimas trečiojoje KP iteracijoje

pav. 17 Skaitmenų atpažinimas ketvirtojoje KP iteracijoje

pav. 18 Skaitmenų atpažinimas penktojoje KP iteracijoje

Analizuojant atskirų skaitmenų atpažinimo procentus galima pastebėti tam tikrus dėsningumus.

Vienus skaičius programai atpažinti sekasi geriau nei kitus. Skaitmens „2“ atpažinimo procentas nė vienoje iš penkių iteracijų neviršija 50%. Kita vertus skaitmens „9“ atpažinimas 4/5 iteracijų viršija 90% ir tik vienoje žemiausiai nukrenta iki 73,8%

Kai kuriuose iteracijose pastebimas žymus pavienių skaitmenų atpažinimo tikslumo sumažėjimas (trečia iteracija „7“ ir „8“, penkta iteracija „1“). Šį sumažėjimą galima paaiškinti tuo, kad duomenų rinkinyje esančiuose paveikslėliuose esanti skaitmenų išvaizda labai stipriai varijuoja. Jei testavimo metu pasitaiko nestandartinis skaitmens rašymo būdas, kurio nebuvo apmokymui skirtuose duomenyse, suprantama, kad atpažinimo tikslumas gerokai nukenčia.

Atmetus šiuos tikslumo sumažėjimus, kitų simbolių atpažinimo tikslumas tarp iteracijų yra gan pastovus ir patenkinamas – apie 60-80%

# **Metodo tikslumo priklausomybė nuo BwThreshold reikšmės**

BwThreshold – parametras, kuris nustatato, kaip metodas ImageToBlackWhite() įvertina pilkus pikselius. Pilki pikseliai pagal šio parametro nustomą šviesumo ribą perdažomi juodai arba baltai. Šiame skyriuje pateiktas grafikas rodo, kaip keičiasi bendras metodo tikslumas kintant BwThreshold reikšmei.

pav. 19 Metodo 1 bendro tikslumo priklausomybė nuo BwThreshold reikšmės

Matome, kad aukščiausias bendras tikslumas pasiekiamas, kai reikšmė 0.5. Reikšmę didinant arba mažinant metodo tikslumas mažėja.

# **Metodo tikslumo priklausomybė nuo paveikslėlio dimensijų**

Duomenų rinkinyje esančių paveikslėlių dydis - 32x32 pikseliai. Prieš atliekant skaičiavimus paveikslėliai yra sumažinami iki pasirinkto dydžio. Šiame skyriuje pateiktas grafikas rodo, kaip keičiasi bendras metodo tikslumas kintant paveikslėlių dydžiui.

pav. 20 Metodo 1 bendro tikslumo priklausomybė nuo sutraukto paveikslėlio dimensijų

Matome, kad aukščiausias tikslumas pasiekiamas, kai paveikslėlio dimensijos 16x16. Kai dimensijos didesnės, artimesnės originalioms, tikslumas beveik toks pat. Tačiau, dimensijas mažinant žemiau 16 pikselių tikslumas ima mažėti. Tikėtina, kad pernelyg stipriai sumažinus analizuojamų paveikslėlių dimensijas prarandamas paveikslėlio aiškumas bei unikalios simbolių detalės, kurių metodui reikia, kad būtų galima atskirti simbolius.

# **Metodo tikslumo priklausomybė nuo atitikimo žemėlapiui ribos**

Metode Testing(), kuris kryžminės patikros metu atlieka testavimo duomenų rinkinio paveikslėlių klasifikaciją, naudojamas parametras „riba“. Ši riba nurodo, kokį dydį turi pasiekti pikselį atitinkanti reikšmė simbolio kontūro intensyvumo žemėlapyje, kad testuojamo paveikslėlio baltas pikselis būtų įskaičiuotas kaip atitinkantis žemėlapį. Šiame skyriuje pateiktas grafikas rodo, kaip keičiasi bendras metodo tikslumas kintant šios ribos reikšmei.

pav. 21 Metodo 1 bendro tikslumo priklausomybė nuo atitikimo žemėlapiui

Matome, kad aukščiausias tikslumas pasiekiamas, kai ribos reikšmė – 300. Ribą didinant arba mažinant tikslumas sparčiai mažėja.

# **Metodas su mokytoju Nr.2 (Neuroninis tinklas)**

# **Metodo veikimas**

Antrasis metodas įgyvendintas naudojant „Accord“ mašininio mokymo karkaso neuroninių tinklų biblioteką Accord.Neuro.

Daugiau apie „Accord“ galima sužinoti čia:

<http://accord-framework.net/index.html>

Duomenų apdorojimui naudojami 2.2 ir 2.3 skyriuose aprašyti spalvų vienodinimo bei paveikslėlių dydžio mažinimo metodai.

Naudojant NeuralNetwork.cs klasės metodą Teach() neuroninis tinklas mokomas tol, kol pasiekiama programoje nustatyta persimokymo reikšmė (Pavyzdžiui – tikslumas nebedidėja penkias epochas iš eilės, todėl nusprendžiama,kad tinklas persimokė ir apmokymą reikai nutraukti) arba pasiekiamas nustatytas epochų skaičius.

# **Rezultatai ir eksperimentai**

Šiame skyriuje pateikiami grafikai, kuriose pavaizduotas antrojo metodo rezultatų tikslumu kitimas priklausomai nuo programos parametrų.

# **Bendras metodo tikslumas kryžminės patikros iteracijose**

pav. 22 Bendras Metodo 2 tikslumas KP iteracijose

Iš gautų rezultatų matoma, kad simbolių atpažinimo tikslumas, naudojant neuroninius tinklus, svyruoja nuo 72.775% iki 84.9%. Klasifikatoriaus tikslumas yra gana didelis, bet vis tiek pasitaiko nemažai klaidingų klasifikavimų.

* + 1. **Skaitmenų atpažinimo tikslumas kryžminės patikros iteracijose**

pav. 23 Skaitmenų atpažinimas pirmojoje KP iteracijoje

pav. 24 Skaitmenų atpažinimas antrojoje KP iteracijoje

pav. 25 Skaitmenų atpažinimas trečiojoje KP iteracijoje

pav. 26 Skaitmenų atpažinimas ketvirtojoje KP iteracijoje

pav. 27 Skaitmenų atpažinimas penktojoje KP iteracijoje

Atlikus neuroninio tinklo metodo kryžminę patikrą galima pastebėti, kad didžiausius sunkumus kelia dviejų simbolių, „2“ ir „3“, atpažinimas ir klasifikavimas. Aukščiausias „2“ atpažinimo procentas buvo ketvirtoje iteracijoje – 89%, o „3“ – antroje iteracijoje su 95% tikslumu. Mažiausias atpažinimo tikslumo procentas „2“ atveju yra 25.5% penktoje iteracijoje, o „3“ atveju – 18.5% ketvirtoje iteracijoje. Iš grafikų galima pastebėti, kad ,esant dideliam „2“ atpažinimo tikslumui, „3“ atpažinimo tikslumas būna mažas ir atvirkščiai. Didžiausias pasiektas tikslumas buvo simbolio „1“ ir „7“– 99.5%.

Trečioje iteracijoje galima pastebėti didelį visų simbolių atpažinimo tikslumo sumažėjimą. Tai gali lemti atrinkti testavimo duomenys, kurie yra nukrypę nuo daugumos apmokymuose naudotų simbolių simbolių.

# **Metodo tikslumo priklausomybė nuo paveikslėlio dimensijų**

pav. 28 Skaitmenų atpažinimo procentai naudojant antrą metodą - neuroninį tinklą su 8x8 dimensijų paveikslėliais

Bendas tikslumas 78.51%.

pav. 29 Skaitmenų atpažinimo procentai naudojant antrą metodą - neuroninį tinklą su 16x16 dimensijų paveikslėliais

Bendas tikslumas 79.52%.

pav. 30 Skaitmenų atpažinimo procentai naudojant antrą metodą - neuroninį tinklą su 32x32 dimensijų paveikslėliais

Bendras tikslumas – 79.3%.

Matome, kad kai simbolių atpažinimui naudojamas neuroninis tinklas, didžiausias tikslumas pasiekiamas, kai naudojami sumažinti 16x16 dimensijų paveikslėliai. Palikus paveikslėlio dimensijas nesumažintas, gautas tikslumas sumažėja tik per 0.2%, o sumažinus iki 8x8 tikslumas nukrenta 1%, palyginus su 16x16 paveikslėlių atpažinimo tikslumu.

Paveikslėlių dydį sumažinus iki 16x16 daugumos skaitmenų atpažinimo procentas išleika gan aukštas – virš 80%. Skaitmenų „2“ ir „3“ procentas yra gana mažas, žemiau 60%. Toks žemas šių dviejų simbolių atpažinimo tikslumas yra matomas ir naudojant 8x8 bei 32x32 paveikslėlius.

Sumažinus paveikslėlius iki 8x8 daugumos skaitmenų atpažinimo tikslumas sumažėja, žemiau 80% ribos yra „2“, „3“ ir „5“. Tačiau antroje iteracijoje pasiektas tikslumas yra 90.38%.

# **Metodo tikslumo priklausomybė nuo BwThreshold reikšmės**

pav. 31 Metodo 2 bendro tikslumo priklausomybė nuo BwThreshold reikšmės

Matome, kad neuroninis tinklas aukščiausią tikslumą pasiekia kai BwThreshold reikšmė padidinama iki 0.6. Reikšmės didėjimas arba mažėjimas neturi didelės įtakos metodo tikslumui – bendras tikslumas keičiasi tik 1-2%.

# **Metodų palyginimas**

Išanalizavus skyriuose 3-4 pateiktus pirmojo ir antrojo metodo rezultatus galima daryti išvadą, kad antrasis metodas, kuris naudoja neuroninio tinklo biblioteką, simbolius klasifikuoja tiksliau nei pirmasis, kuris naudoja simbolių kontūro intensyvumo žemėlapį.

Aukščiausias pasiektas pirmojo metodo bendrasis tikslumas – 82.1%

Žemiausias pasiektas pirmojo metodo tikslumas – 62%

Aukščiausias pasiektas antrojo metodo bendrasis tikslumas – 84,9%

Žemiausias pasiektas antrojo metodo tikslumas – 72,8%

Abu metodai davė gan įvairius kiekvieno simbolio atpažinimo rezultatus. Pirmojo metodo atskirų simbolių atpažinimo tikslumas tarp iteracijų ir priklausomai nuo apmokymui bei testavimui naudojamų duomenų svyravo net tarp 15-99%.

Antrojo metodo rezultatai taip pat turėjo nemažą varijacijos lygį, tarp 18.5-99.5%.

Apibendrinant metodų veikimo rezultatus – siekiant didžiausio įmanomo klasifikacijos tikslumo beveik visais atvejais patartina naudoti antrąjį metodą dėl didesnio atpažinimo tikslumo. Antrojo metodo bendrasis tikslumas daugumoje eksperimentų buvo keliais procentais aukštesnis.

# **Išvados**

Projektinio darbo metu sukurta programa, kuri geba atpažinti ir klasifikuoti Devanagari alfabeto skaitmenis 0-9.

Programoje realizuoti keli įvairūs duomenų apdorojimo ir dimensijų mažinimo metodai – paveikslėlių spalvų supaprastinimas, paveikslėlių konvertavimas į dvejetainę matricą, paveikslėlių dydžio sutraukimas, paveikslėlių apkarpymas.

Simbolių atpažinimas realizuotas dviem skirtingais mašininio mokymo metodais. Pirmasis – pilnai suprogramuotas ir naudoja apmokymo metu sukurtus simbolių kontūro intensyvumo žemėlapius (angl. - Heatmap). Antrasis – naudoja „Accord“ karkaso biblioteką accord.neuro, kuria įgyvendimas neuroninio tinklo apmokymas ir testavimas.

Pirmasis metodas pasiekia iki 82.1% bendrą simbolių klasifikavimo tikslumą.

Antrasis metodas pasiekia iki 84,9% bendrą simbolių klasifikavimo tikslumą.

Abiems metodams sunkiausiai sekėsi atpažinti skaitmenį „du“, skaitmenų atpažinimo tikslumas taip pat stipriai priklauso nuo apmokymo ir testavimo metu naudojamų duomenų.

Bendras metodų tikslumo procentas panašus, tačiau remiantis metodų bandymų ir programoje naudotų parametrų BwThreshold, paveikslėlių dimensijos, atpažinimo riba, eksperimentų rezultatais, galma daryti išvadą, kad antrasis metodas daugumoje atvejų yra keliais procentais tikslesnis ir patikimesnis.

# **Programos kodas**

# **Program.cs**

using System;

using System.Collections.Generic;

using System.Linq;

using System.Drawing;

using System.IO;

using System.Drawing.Drawing2D;

using System.Threading;

namespace IntelektikaPR

{

class Program

{

private static readonly string TrainingData = Path.Combine(Environment.CurrentDirectory, @"Data\Data");

private static readonly string TestData = Path.Combine(Environment.CurrentDirectory, @"Data\Test");

//metodo 1 simbolių "heatmap" matricos

static double[,] Digit0;

static double[,] Digit1;

static double[,] Digit2;

static double[,] Digit3;

static double[,] Digit4;

static double[,] Digit5;

static double[,] Digit6;

static double[,] Digit7;

static double[,] Digit8;

static double[,] Digit9;

//į kokį dydį performuojami paveiksliukai

private const int ConvWidth = 16;

private const int ConvHeigth = 16;

static readonly Color ColorBlack = Color.FromArgb(255, 0, 0, 0);

static readonly Color ColorWhite = Color.FromArgb(255, 255, 255, 255);

private const double BwThreshold = 0.5;

private static readonly List<Vertex> Vertices = new List<Vertex>();

static void Main(string[] args)

{

//new Thread(NeuralNetworkTests).Start();

List<double> result = XValidation(5, TrainingData);

Console.WriteLine("Kryžminės patikros rezultatai:");

int i = 0;

double sum = 0;

foreach (double value in result)

{

Console.WriteLine((i + 1) + " kryžminės patikros bendras tikslumas: " + $"{value:F1}" + " %");

i++;

sum += value;

}

double avg = (double)sum / 5;

Console.WriteLine("Bendras tikslumas: " + $"{avg:F1}" + " %");

Console.ReadLine();

}

// Vykdoma pirmo ir antro metodų kryžminė patikra

public static List<double> XValidation(int dataSetCount, string data)

{

List<double> result = new List<double>();

int start = 0; // testuojamų duomenų pradžios indeksas

int step = (int)(2000.0 / dataSetCount); // testuojamų duomenų indekso žingsnis tarp iteracijų

int end = (int)(2000.0 / dataSetCount); // testuojamų duomenų pabaigos indeksas

List<List<string>> listList = new List<List<string>>();

// Surašomi failų pavadinimai į sąrašą. Sąrašas saugo kiekvieno skaitmens paveikslėlių sąrašą (kelius (path) iki paveikslėlių).

for (int i = 0; i < 10; i++)

{

List<string> list = new List<string>();

foreach (string fpath in Directory.GetFiles(Path.Combine(data, "digit\_" + i), "\*.png"))

{

list.Add(fpath);

}

listList.Add(list);

}

//Pradedamas apmokymas

for (int i = 0; i < dataSetCount; i++)

{

Console.WriteLine("Vykdoma " + (i + 1) + " kryžminės patikros iteracija.");

List<List<string>> temp = new List<List<string>>();

List<List<string>> test = new List<List<string>>();

for (int j = 0; j < 10; j++)

{

List<string> t = listList[j].ToList();

int step2 = step;

if (i >= dataSetCount - 1) step2 = listList[j].ToList().Count - start;

List<string> t2 = listList[j].GetRange(start,step2).ToList();

temp.Add(t);

test.Add(t2);

}

if (i < dataSetCount - 1)

{

//Pašalinami testuojami duomenys iš apmokymo sąrašo, kai i < kryž. patikros iteracijų sk. - 1

foreach (List<string> list in temp)

{

list.RemoveRange(start, step);

}

}

else

{

//Pašalinami testuojami duomenys iš apmokymo sąrašo, kai i == kryž. patikros iteracijų sk. - 1

foreach (List<string> list in temp)

{

list.RemoveRange(start, list.Count - start);

}

}

// Pradedamas apmokymas

Digit0 = Digit1 = Digit2 = Digit3 = Digit4 = Digit5 = Digit6 = Digit7 = Digit8 = Digit9 = null;

Digit0 = TrainSymbolMatrix(Digit0, temp[0]);

Digit1 = TrainSymbolMatrix(Digit1, temp[1]);

Digit2 = TrainSymbolMatrix(Digit2, temp[2]);

Digit3 = TrainSymbolMatrix(Digit3, temp[3]);

Digit4 = TrainSymbolMatrix(Digit4, temp[4]);

Digit5 = TrainSymbolMatrix(Digit5, temp[5]);

Digit6 = TrainSymbolMatrix(Digit6, temp[6]);

Digit7 = TrainSymbolMatrix(Digit7, temp[7]);

Digit8 = TrainSymbolMatrix(Digit8, temp[8]);

Digit9 = TrainSymbolMatrix(Digit9, temp[9]);

NeuralNetworkValidation(temp, test);

int corr = 0; // teisingų spėjimų kiekis

int count = 0; // bendras spėjimų kiekis

double[] foldresults = new double[10];

// Vykdoma kryžminė patikra. Ciklas keliauja per sąrašo skaičius (0-9)

for (int j = 0; j < 10; j++)

{

corr = 0; // teisingų spėjimų kiekis

count = 0; // bendras spėjimų kiekis

// Ciklas keliauja per j - tojo skaitmens paveikslėlių sąrašą

int step2 = step;

if (i >= dataSetCount - 1) step2 = listList[j].ToList().Count - start;

foreach (string fpath in listList[j].GetRange(start, step2))

{

count++;

double[,] img = processImage(fpath);

//Atlieka skaitmens testavimą

string rez = Testing(img, Digit0, Digit1, Digit2, Digit3, Digit4, Digit5, Digit6, Digit7, Digit8, Digit9);

if (rez == "" + j) corr++;

}

Console.WriteLine("Skaitmens " + j + " atpažinimo tikslumas: " + $"{(double)corr / count \* 100:F1} %");

foldresults[j] = (double)corr / count \* 100;

Console.WriteLine(corr + " " + count);

}

double sum = 0;

for (int z = 0; z < foldresults.Length; z++)

{

sum += foldresults[z];

}

double acc = sum / foldresults.Length;

result.Add(acc);

Console.WriteLine("Tikslumas: " + string.Format("{0:F1} %", acc));

Console.WriteLine("------------------------------------------------------------------------");

Console.WriteLine();

// Paslenkama testuojamų duomenų pradžios bei pabaigos indeksas

start = start + step;

end = end + step;

}

return result;

}

//------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

//METODAS SU MOKYTOJU 1 BEGIN

//------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

public static double[,] TrainSymbolMatrix(double[,] symbolmatrix, List<string> trainpath)

{

symbolmatrix = processImage(trainpath[0]);

foreach (string fpath in trainpath)

{

double[,] img = processImage(fpath);

symbolmatrix = Training(img, symbolmatrix);

}

return symbolmatrix;

}

//Apmokymas. Gaunam svorinę matricą. "Kaip atrodo simbolis".Kuo daugiau kartų tame pikselyje buvo balta - tuo didesnis skaičius

public static double[,] Training(double[,] trainmatrix, double[,] finalMatrix)

{

double[,] newFinalmatrix = new double[ConvWidth, ConvHeigth];

for (int i = 0; i < trainmatrix.GetLength(0); i++)

{

for (int j = 0; j < trainmatrix.GetLength(1); j++)

{

newFinalmatrix[i, j] = Math.Round((trainmatrix[i, j] + finalMatrix[i, j]));

}

}

return newFinalmatrix;

}

//Testavimas, tikrinama, kurią apmokymo metu gautą svorių matricą geriausiai atitinka testuojamas paveiksliukas

public static string Testing(double[,] testmatrix, double[,] SymbolMatrix0, double[,] SymbolMatrix1, double[,] SymbolMatrix2, double[,] SymbolMatrix3, double[,] SymbolMatrix4,

double[,] SymbolMatrix5, double[,] SymbolMatrix6, double[,] SymbolMatrix7, double[,] SymbolMatrix8, double[,] SymbolMatrix9)

{

int[] scores = { 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0 };

string[] results = { "0", "1", "2", "3", "4", "5", "6", "7", "8", "9" };

int riba = 300; //kiek baltos spalvos pasikartojimų heatmap'e skaitosi kaip "atitikimas"

for (int i = 0; i < testmatrix.GetLength(0); i++)

{

for (int j = 0; j < testmatrix.GetLength(1); j++)

{

if ((SymbolMatrix0[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[0] += 1;

}

if ((SymbolMatrix1[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[1] += 1;

}

if ((SymbolMatrix2[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[2] += 1;

}

if ((SymbolMatrix3[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[3] += 1;

}

if ((SymbolMatrix4[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[4] += 1;

}

if ((SymbolMatrix5[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[5] += 1;

}

if ((SymbolMatrix6[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[6] += 1;

}

if ((SymbolMatrix7[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[7] += 1;

}

if ((SymbolMatrix8[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[8] += 1;

}

if ((SymbolMatrix9[i, j] >= riba) && (testmatrix[i, j] == 1))

{

scores[9] += 1;

}

}

}

int maxValue = scores.Max();

int maxIndex = scores.ToList().IndexOf(maxValue);

return results[maxIndex];

}

//-------------------------------------------------------------------------------

//METODAS SU MOKYTOJU 1 END

//-------------------------------------------------------------------------------

//-------------------------------------------------------------------------------

//METODAS SU MOKYTOJU 2 BEGIN

//-------------------------------------------------------------------------------

/// <summary>

/// Performs the Neural Network tests for cross validation.

/// </summary>

public static void NeuralNetworkValidation(List<List<string>> trainingList, List<List<string>> testList)

{

// Read the training data.

Console.WriteLine("Reading input data.");

var inputData = ReadAllImages(trainingList)

.OrderBy(o => Guid.NewGuid()) // Scramble the list

.ToArray(); // Execute the request

// Prepare data for the neural network.

var outputVector = inputData.Select(d => d.Key)

.Select(iValue => // Create a key array, with index of the key having value 1, rest = 0.

{

var a = new double[10];

a[iValue] = 1;

return a;

}).ToArray();

var inputVector = inputData.Select(d => d.Value.ToDoubleArray())

.ToArray(); // Create a value array, with having appropriate indexes.

// Create a neural network

var network = new NeuralNetwork(inputVector, outputVector);

// Execute the learning process

network.Teach();

// Read the test data.

Console.WriteLine("Reading output data.");

var outputData = ReadAllImages(testList);

// Print out the result.

var correctCount = outputData.GroupBy(k => k.Key)

.Select(g => new

{

Index = g.Key,

TotalElements = g.Count(),

SuccessCount = g.Count(testData => testData.Key == network.Compute(testData.Value))

}).ToArray();

foreach (var el in correctCount)

{

Console.WriteLine($"Neural network accuracy for number {el.Index}: {(double)el.SuccessCount / el.TotalElements:P}");

}

var overallSuccess = correctCount.Sum(e => e.SuccessCount);

Console.WriteLine($"Overall neural network accuracy: [{overallSuccess} / {outputData.Length}] - {(double)overallSuccess / outputData.Length:P}");

}

/// <summary>

/// Reads all of the contents of a given folder and creates an array of Key - Image pairings

/// </summary>

/// <returns>An array of Key-Image pairings. Key is int - image's true number</returns>

public static KeyValuePair<int, Image>[] ReadAllFolders(string folderPath)

{

var index = 0;

var inputData = Enumerable.Empty<KeyValuePair<int, Image>>();

foreach (var directory in Directory.EnumerateDirectories(folderPath))

{

inputData = inputData.Concat(ReadFolder(directory) // Read the contents and concatinate the image data.

.Select(f => new KeyValuePair<int, Image>(index, f))) // Attach an index to a given image, i.e. 2 = file in directory no.2

.ToArray(); // Execute the request immedietly.

index++;

Console.WriteLine($"{index \* 10}%");

}

return (KeyValuePair<int, Image>[])inputData;

}

/// <summary>

/// Reads folder data for images

/// </summary>

/// <param name="folderPath">Path to search for images</param>

/// <returns>List of Images in the given folder.</returns>

public static IEnumerable<Image> ReadFolder(string folderPath)

{

var rect = new Rectangle(2, 2, 28, 28);

#if DEBUG

var index = 0;

#endif

foreach (var filePath in Directory.EnumerateFiles(folderPath))

{

#if DEBUG

//if (index++ >= 200) continue;

#endif

var bitmap = new Bitmap(filePath);

Bitmap og = new Bitmap(filePath); //Paima iš failo

Bitmap conv = new Bitmap(ConvWidth, ConvHeigth); //Sumažina

using (Graphics gr = Graphics.FromImage(conv))

{

gr.SmoothingMode = SmoothingMode.HighQuality;

gr.InterpolationMode = InterpolationMode.HighQualityBicubic;

gr.PixelOffsetMode = PixelOffsetMode.HighQuality;

gr.DrawImage(og, new Rectangle(0, 0, ConvWidth, ConvHeigth));

}

conv = ImageToBlackWhite(conv, BwThreshold); //Pilkus pixelius -> juodus/baltus

conv.RotateFlip(RotateFlipType.Rotate270FlipY);

yield return new Image(conv);

//yield return new Image(bitmap.Clone(rect, bitmap.PixelFormat));

}

}

/// <summary>

/// Reads all of the contents of a given list of lists and creates an array of Key - Image pairings

/// </summary>

/// <returns>An array of Key-Image pairings. Key is int - image's true number</returns>

public static KeyValuePair<int, Image>[] ReadAllImages(List<List<string>> images)

{

var index = 0;

var inputData = Enumerable.Empty<KeyValuePair<int, Image>>();

foreach (var list in images)

{

inputData = inputData.Concat(ReadList(list) // Read the contents and concatinate the image data.

.Select(f => new KeyValuePair<int, Image>(index, f))) // Attach an index to a given image, i.e. 2 = file in directory no.2

.ToArray(); // Execute the request immedietly.

index++;

Console.WriteLine($"{index \* 10}%");

}

return (KeyValuePair<int, Image>[])inputData;

}

/// <summary>

/// Reads list data for images

/// </summary>

/// <param name="list">list of image paths</param>

/// <returns>List of Images in the given folder.</returns>

public static IEnumerable<Image> ReadList(List<string> list)

{

var rect = new Rectangle(2, 2, 28, 28);

#if DEBUG

var index = 0;

#endif

foreach (var filePath in list)

{

#if DEBUG

//if (index++ >= 200) continue;

#endif

var bitmap = new Bitmap(filePath);

Bitmap og = new Bitmap(filePath); //Paima iš failo

Bitmap conv = new Bitmap(ConvWidth, ConvHeigth); //Sumažina

using (Graphics gr = Graphics.FromImage(conv))

{

gr.SmoothingMode = SmoothingMode.HighQuality;

gr.InterpolationMode = InterpolationMode.HighQualityBicubic;

gr.PixelOffsetMode = PixelOffsetMode.HighQuality;

gr.DrawImage(og, new Rectangle(0, 0, ConvWidth, ConvHeigth));

}

conv = ImageToBlackWhite(conv, BwThreshold); //Pilkus pixelius -> juodus/baltus

conv.RotateFlip(RotateFlipType.Rotate270FlipY);

yield return new Image(conv);

//yield return new Image(bitmap.Clone(rect, bitmap.PixelFormat));

}

}

//-------------------------------------------------------------------------------

//METODAS SU MOKYTOJU 2 END

//-------------------------------------------------------------------------------

//-------------------------------------------------------------------------------

//DUOMENŲ TVARKYMAS BEGIN

//-------------------------------------------------------------------------------

// Paima paveikslėlį iš failo, sumažina, pilkus pixelius padaro juodais/baltais, konvertuoaj į 0/1 matricą, yra galimybė apkarpyti

public static double[,] processImage(string fpath)

{

Bitmap og = new Bitmap(fpath); //Paima iš failo

Bitmap conv = new Bitmap(ConvWidth, ConvHeigth); //Sumažina

using (Graphics gr = Graphics.FromImage(conv))

{

gr.SmoothingMode = SmoothingMode.HighQuality;

gr.InterpolationMode = InterpolationMode.HighQualityBicubic;

gr.PixelOffsetMode = PixelOffsetMode.HighQuality;

gr.DrawImage(og, new Rectangle(0, 0, ConvWidth, ConvHeigth));

}

conv = ImageToBlackWhite(conv, BwThreshold); //Pilkus pixelius -> juodus/baltus

conv.RotateFlip(RotateFlipType.Rotate270FlipY);

double[,] img = ImageToMatrix(conv); //konvertuoja į 0/1 matricą

//img = CutMatrix(img); //apkarpo -2px nuo kiekvieno krašto

return img;

}

//Paverčia visus pilkus pixelius juodais arba baltais pagal slenksčio reikšmę

public static Bitmap ImageToBlackWhite(Bitmap imgSrc, double threshold)

{

int width = imgSrc.Width;

int height = imgSrc.Height;

Color pixel;

Bitmap imgOut = new Bitmap(imgSrc);

for (int row = 0; row < height - 1; row++)

{

for (int col = 0; col < width - 1; col++)

{

pixel = imgSrc.GetPixel(col, row);

if (pixel.GetBrightness() < threshold)

{

Vertices.Add(new Vertex(col, row));

imgOut.SetPixel(col, row, ColorBlack);

}

else

{

imgOut.SetPixel(col, row, ColorWhite);

}

}

}

return imgOut;

}

//Konvertuoja juodą/baltą paveiksliuką į 0/1 matricą

public static double[,] ImageToMatrix(Bitmap img)

{

int height = img.Height;

int width = img.Width;

double[,] Matrix = new double[ConvWidth, ConvHeigth];

for (int i = 0; i < width; i++){

for (int j = 0; j < height; j++){

if (img.GetPixel(i, j).Equals(ColorBlack))

{

Matrix[i, j] = 0;

}

else if (img.GetPixel(i, j).Equals(ColorWhite))

{

Matrix[i, j] = 1;

}

}

}

return Matrix;

}

//Nukerpa tuščius 2px nuo kiekvieno krašto

public static double[,] CutMatrix(double[,] matrix)

{

double[,] newmatrix = new double[ConvWidth - 2, ConvHeigth - 2];

for (int i = 2; i < matrix.GetLength(0) - 2; i++)

{

for (int j = 2; j < matrix.GetLength(1) - 2; j++)

{

newmatrix[i - 2, j - 2] = matrix[i, j];

}

}

return newmatrix;

}

//spausdina 0/1 matricą

public static void PrintMatrix(double[,] matrix)

{

for (int i = 0; i < matrix.GetLength(0); i++)

{

for (int j = 0; j < matrix.GetLength(1); j++)

{

Console.Write($"{matrix[i, j]}");

}

Console.Write(Environment.NewLine + Environment.NewLine);

}

}

public class Vertex

{

public Vertex(int i, int j)

{

X = i;

Y = j;

}

public int X { get; set; }

public int Y { get; set; }

public override string ToString()

{

return $"({X}/{Y})";

}

}

//-------------------------------------------------------------------------------

//DUOMENŲ TVARKYMAS END

//-------------------------------------------------------------------------------

}

}

# **NeuralNetwork.cs**

using System;

using Accord.Math;

using Accord.Neuro;

using Accord.Neuro.Learning;

namespace IntelektikaPR

{

class NeuralNetwork

{

private readonly double[][] \_inputData;

private readonly double[][] \_outputData;

private const int EpochsMax = 2000;

private const int OverfittedErrorTreshold = 5;

private ActivationNetwork Network { get; }

public NeuralNetwork(double[][] inputData, double[][] outputData)

{

\_inputData = inputData;

\_outputData = outputData;

Network = new ActivationNetwork(new SigmoidFunction(),

inputData[0].Length, // Input neuron count

outputData[0].Length); // Output neuron count

Network.Randomize();

}

public void Teach()

{

// Teacher method.

// Perceptron was experimentally found to give best results.

var teacher = new PerceptronLearning(Network);

// Value to track network's effectivness.

// If value increases over time, network is overfitted - terminate learning process.

var previousError = double.MaxValue;

// Value tracks the amount of times error value increased.

// Once it reaches a treshold, stop trainig - network is overfitted.

var errorIncreaseCount = 0;

// Epochs tracks the amount of cycles neural network took.

// Used to prevent infinite training.

var epochs = 0;

Console.WriteLine("Teaching network.");

// Train the neural network.

// Training lasts until EITHER network starts to get overfitted with data,

// or trainig has reached maximum epoch count.

while (errorIncreaseCount < OverfittedErrorTreshold && epochs < EpochsMax)

{

var error = teacher.RunEpoch(\_inputData, \_outputData);

if (error > previousError)

errorIncreaseCount++;

else

errorIncreaseCount = 0;

previousError = error;

epochs += 1;

if (epochs % 20 == 0)

Console.WriteLine($"{(double)epochs / EpochsMax \* 100}%");

}

}

public int Compute(Image img)

{

return Compute(img.ToDoubleArray());

}

private int Compute(byte[,] img)

{

var inputVector = new double[img.Length];

var index = 0;

foreach (var pixel in img)

{

inputVector[index++] = (double)pixel / 255;

}

return Compute(inputVector);

}

private int Compute(double[] inputVector)

{

var output = Network.Compute(inputVector);

output.Max(out var index);

return index;

}

}

}

# **Image.cs**

using System;

using System.Drawing;

namespace IntelektikaPR

{

public class Image

{

public Bitmap Bitmap { get; }

public Image(Bitmap bitmap)

{

Bitmap = bitmap;

}

/// <summary>

/// Converts the given Image object to a 2D [width, height] byte array.

/// Each byte consists of grayscale 0-255 value for the image.

/// </summary>

/// <returns>Byte array consisting of values 0-255 for each element.</returns>

public byte[,] ToByteMatrix()

{

var matrix = new byte[Bitmap.Width, Bitmap.Height];

for (int i = 0; i < Bitmap.Width; i++)

{

for (int j = 0; j < Bitmap.Height; j++)

{

// Take the blue value, as image is monochrome, B, G, and R are identical.

matrix[i, j] = Bitmap.GetPixel(i, j).B;

}

}

return matrix;

}

/// <summary>

/// Converts the given Image object to a width-first double array.

/// Each number consists of grayscale 0-1 value for the image.

/// 0 = Black, 1 = White, 0.5 = Gray

/// </summary>

/// <returns>Double array consisting of values 0-255 for each element.</returns>

public double[] ToDoubleArray()

{

var vector = new double[Bitmap.Width \* Bitmap.Height];

for (int i = 0; i < Bitmap.Width; i++)

{

for (int j = 0; j < Bitmap.Height; j++)

{

// Take the blue value, as image is monochrome, B, G, and R are identical.

vector[i \* Bitmap.Width + j] = (double)Bitmap.GetPixel(i, j).B / 255;

}

}

return vector;

}

}

}