

SAPIENTIA ERDÉLYI MAGYAR TUDOMÁNYEGYETEM  
MŰSZAKI ÉS HUMÁNTUDOMÁNYOK KAR,  
MAROSVÁSÁRHELY  
SZOFTVERFEJLESZTÉS SZAK

Párhuzamos képstílus átruházás konvolúciós  
neuronhálókkal

MESTERI DISSZERTÁCIÓ



TÉMAVEZETŐ:  
dr. Iclánzan Dávid  
Egyetemi tanár

SZERZŐ:  
Szilágyi Ervin

2017 Július

UNIVERSITATEA SAPIENTIA TÂRGU-MUREŞ  
FACULTATEA DE ȘTIINȚE TEHNICE ȘI UMANISTE  
SPECIALIZAREA DEZVOLTARE DE SOFTWARE

## DeepArt

### Lucrare de master



Coordonator științific:  
dr. IclăNZan Dávid

Absolvent:  
Szilágyi Ervin

2017 Iulie

SAPIENTIA UNIVERSITY TÂRGU MUREŞ  
FACULTY OF TECHNICAL AND HUMAN SCIENCES  
SOFTWARE DEVELOPMENT SPECIALIZATION

**Parallel artistic style transfer using deep  
convolutional neural networks**

**Master Thesis**



Advisor:  
dr. Iclăzan Dávid

Student:  
Szilágyi Ervin

**2017 July**

eredetisegi nyilatkozat

# KIVONAT

kivonat

Szilagyi Ervin,

.....

## ABSTRACT

abstract

Szilagyi Ervin,

.....

## ABSTRACT

english abstract

**Szilagyi Ervin,**

.....

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezető</b>	<b>11</b>
<b>2. Hasonló rendszerek feltérképezése</b>	<b>13</b>
<b>3. A rendszer</b>	<b>15</b>
3.1. Áttekintés . . . . .	15
3.2. A tanítási módszer állóképek esetében . . . . .	17
3.2.1. Az eredeti kép tanításának a veszteségi függvénye . . . . .	17
3.2.2. Az stílus kép tanításának a veszteségi függvénye . . . . .	19
3.2.3. A stilizált kép tisztítása . . . . .	20
3.2.4. A teljes veszteségfüggvény felírása és tanítása statikus képek esetében	21
3.3. A tanítási módszer mozgóképek esetében . . . . .	21
3.3.1. Naiv megközelítés . . . . .	21
3.3.2. A haló inicializálása képkockák esetében . . . . .	22
3.3.3. Optical flow bevezetése . . . . .	23
3.4. A rendszer tervezése és kivitelezése . . . . .	24
3.4.1. A rendszer interakciós és viselkedési modellje . . . . .	24
3.4.2. A rendszer strukturális modellje . . . . .	25
3.4.3. Többszálás megoldás és kommunikáció a komponensek között . . .	26
3.4.4. A rendszer implementálása . . . . .	28
<b>4. A rendszer tesztelése</b>	<b>33</b>
<b>5. Összefoglaló</b>	<b>34</b>

# Cuprins

<b>1. Întroducere</b>	<b>11</b>
<b>2. Studiu bibliografic</b>	<b>13</b>
<b>3. Sistemul</b>	<b>15</b>
3.1. Privire de ansamblu asupra . . . . .	15
3.2. A tanítási módszer állóképek esetében . . . . .	17
3.2.1. Az eredeti kép tanításának a veszteségi függvénye . . . . .	17
3.2.2. Az stílus kép tanításának a veszteségi függvénye . . . . .	19
3.2.3. Reducerea zgomotului din imaginea stilizata . . . . .	20
3.2.4. Definirea și învățarea funcției de pierdere totală la imagini statice .	21
3.3. A tanítási módszer mozgóképek esetében . . . . .	21
3.3.1. Naiv megközelítés . . . . .	21
3.3.2. A haló inicializálása képkockák esetébe . . . . .	22
3.3.3. Introducerea optical flow-ului . . . . .	23
3.4. Proiectarea și implementarea sistemului . . . . .	24
3.4.1. Modelul de interacțiune și comportament al sistemului . . . . .	24
3.4.2. Modelul structural al sistemului . . . . .	25
3.4.3. Proiectarea pe mai multe fire computaționale a unelor componente .	26
3.4.4. Implementarea sistemului . . . . .	28
<b>4. Testarea sistemului</b>	<b>33</b>
<b>5. Concluzie</b>	<b>34</b>

# Table Of Contents

<b>1. Introduction</b>	<b>11</b>
<b>2. Bibliographic study</b>	<b>13</b>
<b>3. The system</b>	<b>15</b>
3.1. Overview . . . . .	15
3.2. A tanítási módszer állóképek esetében . . . . .	17
3.2.1. The loss function of the content image . . . . .	17
3.2.2. The loss function of the style image . . . . .	19
3.2.3. Denoising the stylized image . . . . .	20
3.2.4. The definition and optimization of the total loss function for static images . . . . .	21
3.3. A tanítási módszer mozgóképek esetében . . . . .	21
3.3.1. Naiv approach . . . . .	21
3.3.2. A haló inicializálása képkockák esetébe . . . . .	22
3.3.3. Introduction of the optical flow . . . . .	23
3.4. The design and implementation of the system . . . . .	24
3.4.1. Interraction and behavioral model of the system . . . . .	24
3.4.2. Structural model of the system . . . . .	25
3.4.3. Multithreaded design and communication of components . . . . .	26
3.4.4. The implementation of the system . . . . .	28
<b>4. The testing of the system</b>	<b>33</b>
<b>5. Conclusion</b>	<b>34</b>

# 1. fejezet

## Bevezető

Napjainkban a képfeldolgozás egy elégé elterjedt kutatási terület. A kutatások célja főleg az információ kinyerésére, gépi látás kivitelezésére irányult. Minderre kiváló megoldást jelentett a mély konvolúciós hálók (ConvNets)[1][2] sikeres használata növelte ezzel ezek népszerűségét. Fontos megjegyezni, hogy a konvolúciós neuron hálók felfedezése már pár évtizede történt, tehát maga a technológia már régebb ismert volt. Az újrafelfedezésüköt és hirtelen népszerűség növekedését annak köszönhetik, hogy az utóbbi években olyan hardveres megoldások jelentek meg, amik lehetővé teszik az ilyen típusú hálók létrehozását és működtetését.

Az Nvidia cég 2007-ben bevezette az Nvidia CUDA platformot[3]. Ez egy komoly, használható fejlesztő környezetet jelentett olyan fejlesztők számára akik nagy méretű adatpárhuzamos algoritmusokat szerettek volna fejleszteni. A CUDA környezet direkt elérhetőséget nyújt a videókártya utasításkészletéhez megengedve ezzel ennek a programozását. Ugyanakkor számos olyan videókártya került piacra ami egyre komolyabb számítási készségekkel bírt. Ezt a lehetőséget értelemszerűen a kutatók ki is használták így számos újabb publikáció és javaslat jelent meg amik neuron hálókat használnak az illető probléma megoldására.

A deep konvolúciós hálók népszerűségének növekedésével egyre több olyan fejlesztői környezet jelent meg amiknek célja a mesterséges intelligencia feladatok megoldása. Ilyen könyvtárak például a Caffe[4], Keras[5], Theano[6], Tensorflow[7], Torch[8] stb. Ezek a környezetekben, habár különböző stílusban de egyazon problémákra hivatottak gyors és egyszerű megoldásokat ajánlja ugyanúgy mezei szoftverfejlesztők, mint kutatók számára.

Az gépi látás egyik fontos alkalmazási területe a képen levő tárgyak, élőlények emberek felismerése. Ilyen területen a konvolúciós hálók kimagasló teljesítményt nyújtanak, olyannyira, hogy egyes kísérletek szerint ez már nemhogy az emberi látással megegyező, hanem azt felülműlő teljesítményt nyújtanak[9]. Feltevődik a kérdés, hogyha ennyire szofisztikált a gépi látás, akkor nem-e lehetne használni arra, hogy új képeket alkosszon. Amint kiderült erre is alkalmasak. Az általam bemutatandó dolgozat is ezt a témát próbálja megcélozni. A gépi látás a tárgyak, élőlények mellett képes felismerni maga a kép

művészeti stílusát. Ez elsősorban kihasználható arra, hogy híres művészek alkotásait csoportosítsuk, rendszerezzük[10], de amint e dolgozatból ki fog derülni, ki lehet használni arra is, hogy egy művészeti stílust egy adott festményről átvigyük egy minden napí képre, fotóra.

A dolgozatom célja magyar híres festőművészek festészeti stílusát átvenni és ezt alkalmazni minden napí képekre illetve mozgóképekre. Eddigiekben, ahhoz hogy egy minden napí fényképből művészeti képet varázsolunk, képszerkesztő szoftverek segítségével lehetett elérni manuálisan. Mindezt egy olyan egyén végezhette, akinek képszerkesztési illetve képmobilálási szakismere volt adott képszerkesztési szoftverkörnyezetben. Magától értődik az, hogy ez mozgóképek esetében egy időigényes folyamat. Dolgozatom mindenekre megoldást próbál adni, azáltal, hogy az általam elkészített szoftvert bárki használhatja, nincs szükség különböző képszerkesztői szakértelemre, emellett a folyamat ideje jelentősen csökkeni fog.

## 2. fejezet

# Hasonló rendszerek feltérképezése

A neuron hálók használata a számítástechnikában nem egy újonnan kialakult terület. Frank Rosenblatt 1958-ban publikált egy olyan mintafelismerő algoritmust[11], ami egyszerű összeadást és kivonást használva képes volt "tanulni". A rendszer képes volt finomhangolni állapotát a bekövetkező iterációk során. Ezt az algoritmust perceptronnak nevezzük. 1975-ben Paul Werbos vezette be a backpropagation algoritmust[12], amit a perceptronnal együtt használva megoldotta a perceptron azon problémáját miszerint az csak lineárisan elválasztható osztályokat volt képes kategorizálni. Habár a neuron hálók tanulmányozása eléggyé ígéretesnek látszott, számítási igényük, komplexitásuk és lassú válasz idejük miatt a kutatók arra következtetésre jutottak, hogy a gyakorlatban még nem lehet alkalmazni őket.

Yann LeCun professzor és csapata 1998-ban egy újabb topológiájú hálót vezetett be[13]. A LeNet-5 elnevezésű háló konvoluciós rétegeket is tartalmazott ezért konvoluciós neuron hálónak nevezzük. A publikáció célja kézzel írott számjegyek kategorizálása volt, létrehozva ezáltal a MNIST adatbázist, ami 60000 28x28-as felbontású kézzel írott számjegyet tartalmaz, emellett tartalmaz egy 10000 tagból álló teszthalmazt. A dolgozatban bemutatott LeNet-5 háló 0,7%-os hiba aránnyal volt képes kategorizálni a számjegyeket, ami messze felülmúltja a többrétegű perceptronos megoldást.

Dave Steinkraus, Patrice Simard és Ian Buck 2005-ben publikált dolgozata[14] letette az alapjait a neuronhálók videokártyán történő programozásának. A videókártyán történő adatpárhuzamos programozás hatalmas performancia növekedést jelentett a processzoron futó neuronhálókkal szemben. Előtérbe kerül a deep learning és a mély konvoluciós hálók használata[1][2].

Eddigiekben sikerült nagyon pontos felismerő illetve osztályozó rendszereket alkotni. A mély konvoluciós hálók használata azonban nem merül ki ennyiben. 2015-ben publikálásra került egy olyan deep learning-et használó algoritmus, ami képek illetve festmények művészeti stílusát átvinni egy másik digitális képre[15]. Mostani dolgozatom is erre a publikációra alapoz, az ebben bemutatott módszereket próbálja alkalmazni illetve továbbfejleszteni. A tanuláshoz egy korábban bevezetett és gépi látáshoz használt, előre

betanított neuron hálót használnak fel, a VGG-19-et. Yaroslav Nikulin és Roman Novak tudományos kutatása[16] ezzel szemben eddig ugyanezt a módszert alkalmazta más ismertebb előre betanított hálókra, mint például AlexNet, GoogLeNet vagy VGG-16. Ugyanúgy a VGG-16 háló használata is kiváló eredményeket mutatott még a GoogLeNet és az AlexNet architektúrájuk miatt komolyabb információvesztéshez vezetnek így a végeredmény nem lesz annyira látványos. Ugyanúgy kísérletek irányultak az eredeti eljárás optimalizálására, megjelentek olyan rendszerek amik sajátos, erre a célre betanított neuron hálókat alkalmaznak[17][18][19].

2016-ban a Prisma labs inc. kiadta mobilos applikációját Prisma név alatt[20]. Az applikáció előre megadott ismert festői/grafikai stílusokat alkalmazza a telefon kamerája által készített képekre. Az applikáció az előbbieken bemutatott kutatásokra alapoz. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy maga a stílus alkalmazását a különböző fotókra nem az okostelefon végzi. A szerkeszteni kívánt képet a telefon felkülde egy szervergépre ami majd válaszként a szerkesztett képet küldi vissza.

Maga stílusátvitel nem csak állóképekre alkalmazható, ezt bizonyította Manuel R., Alexey D., Thomas B. tudományos dolgozata[21], valamit ezt próbalja megoldani a jelenlegi dolgozatom is. Értelemszerűen egy adott videót több álló képkocka alkot. Viszont ahhoz, hogy látványos művészeti mozgóképet gyártsunk, nem elegendő maga a videót darabokra vágni és minden képkockára alkalmazni a stílust. Erre adott megoldást Manuel R. és társainak kutatása.

## 3. fejezet

# A rendszer

### 3.1. Áttekintés

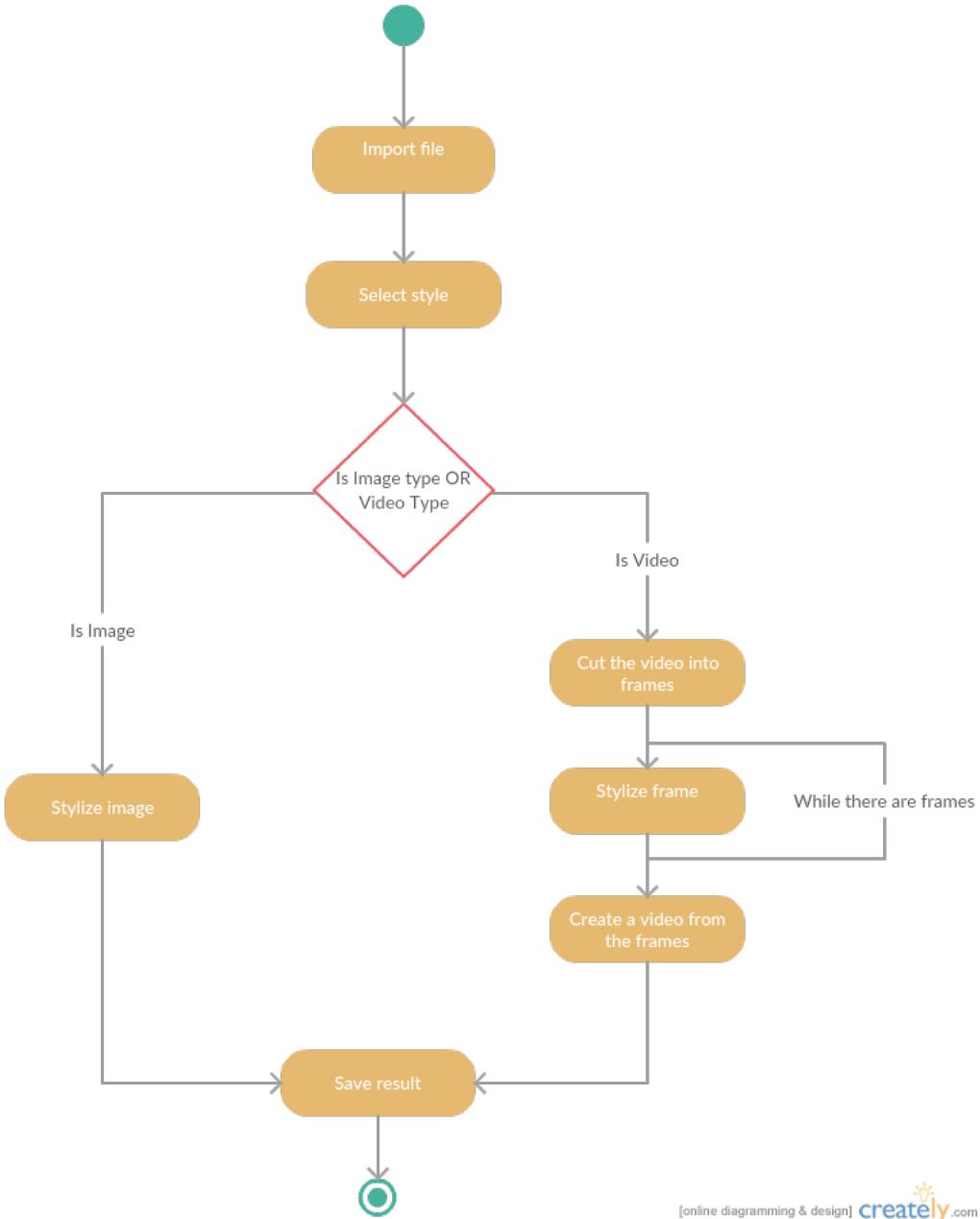
Dolgozatom célja egy olyan multiplatform számítástechnikai szoftver tervezése és fejlesztése ami deep learning-et használva képes híres magyar festők festményeinek a stílusát átvenni és alkalmazni a felhasználó által megadott digitális képekre illetve videókra. A fejlesztett szoftver könnyen használható grafikus felhasználói felülettel rendelkezik és támogatja a Linux valamint a Microsoft Windows alapú operációs rendszereket. A szoftver futtatásához a felhasználónak rendelkeznie kell egy olyan videókártyával ami támogatja az Nvidia CUDA platformot.

A szoftver fejlesztése Python3.5[23] programozási nyelvben történt, viszont egyes esetekben felhasználásra kerülnek egyes előre legyártott önállóan is futatható állományok. Emellett még használva vannak a következő Python könyvtárak:

- numpy[24]: használata elengedhetetlen akkor, ha többdimenziós tömbökkel szeretnénk dolgozni. Nagyon sok matematikai problémára tartalmaz előre definiált megoldást és efelett tökéletesen használható a tensorflow könyvtár mellett
- tensorflow[7]: talán egyik legismertebb deep learning és mély konvolúciós hálók tanítására kifejlesztett könyvtár. Teljes mértékben támogatja a videókártyán történő programozást.
- PyQt[25]: a szoftver grafikus felhasználói felületének a megvalósításához használatos, emellett komoly feladat orientált párhuzamosítást tud biztosítani.
- OpenCV[26]: képfeldolgozásra szakosodott könyvtár, főleg a különböző kiterjesztésű képek beolvasására és mentésére volt használva.

A rendszer működése felülnézetből nagyon egyszerű (3.1 ábra). A felhasználó kiválaszt egy bemeneti állományt, ami kép kiterjesztésű (.jpg, .png) vagy mozgókép kiterjesztésű (.gif, .avi, .mp4) lehet valamint kiválaszt egy stílust a megadottak közül. A rendszer

annak függvényében, hogy milyen bemenetet adtunk, eldönti, hogy kép vagy mozgóképpel kell dolgozna. Kép esetén egyszerűen lefuttatja a tanulási algoritmust amely során az átveszi a művészeti kép stílusát. Mozgókép esetén képkockákra bontja azt, majd minden képkockára alkalmazva lesz a tanítási algoritmus. Ha összes képkocka szerkesztve lett, akkor a rendszer felépít a képkockákból a kimeneti videót. Ezek után, függetlenül, hogy kép vagy videó lett a végeredmény, a rendszer kimenti azt egy megadott folderbe.



3.1. ábra. A rendszer működése felülnézetből

## 3.2. A tanítási módszer állóképek esetében

A rendszer tanításához állókép esetében két legalább képet bemenet szükséges, az eredeti kép, amire át szeretnénk ruházni a stílust és a stílust tartalmazó kép, aminek a stílusát át szeretnénk ruházni. Mindkét bemenet esetében felírunk egy veszteség függvényt amik részei a végső nagy tanítási függvénynek.

### 3.2.1. Az eredeti kép tanításának a veszteségi függvénye

A mély neurálos hálók (Deep Neural Networks) azon típusai amik a legeredményesebbek a képfeldolgozási feladatok elvégzésben a konvolúciós hálók. Mesterséges intelligencia területén a konvolúciós hálók olyan feed-forward típusú neuronhálók, amiket a biológiai elsődleges látókéregről mintáztak. A háló kifejezetten arra volt tervezve és kifejlesztve, hogy kétdimenziós formákat ismerjen fel. A háló alapértelmezetten több rétegből tevődik össze:

- konvolúciós réteg: a konvolúciós hálók alap kövei. A réteg súlyai úgynevezett konvolúciós szűrők alkotják, amelyek a forward pass lépés során tanítva vannak. Ez a tanítási lépés úgy történik, hogy a szűrőt végig toljuk a bemeneten és konvolúciónak nevezett műveletet végzünk.
- pooling layer: arra használatos, hogy a bemeneti adathalmazt méretét leszűkítsük úgy, hogy a halmaz adott értékein valamely matematikai műveletet végezünk (átlagszámolás, maximum számolás, minimum számolás). Erre azért van szükségünk, hogy növeljük a tanulás gyorsaságát, csökkentsük a számítások komplexitását megakadályozva ezzel az "overfitting" bekövetkezését.
- fully connected layer: minden bemenet minden más bemenettel kapcsolatban áll.

A konvolúciós hálók súlyzókként konvolúciós szűrőket tartalmaznak. Ezek, tárgyfelismerés tanítása esetében, az adott bemeneti kép különböző tulajdonságait fogják tartalmazni. Annak függvényében, hogy a háló topológiájában egy adott réteg hol helyezkedik el, más tulajdonságokat fognak raktározni a szűrök. Az bemeneti réteghez közel álló alacsony szintű rétegek az adott kép pixelinformációit próbálják megjegyezni ezzel szemben a magasabb szinten levő rétegek szűrői különböző tárgyakat, formákat próbálnak megjegyezni[27][28]. A hálók által tartalmazott információ vizualizálható azáltal, hogy rekonstruáljuk a bemeneti képet a súlyzók alapján. Alacsony rétegek esetében apró módosításokkal visszanyerhető az eredeti kép míg magasabb rétegek esetében objektumok, formák nyerhetők vissza.

Az eredi kép tanításához egy már előre betanított mély konvolúciós neuronhálót használunk fel. A háló tudományos kontextusban VGG-19 név alatt terjedt el amit Simonyan

K. és Zisserman A. vezetett be publikációjukban[29] ahol még a "model E" nevet viselte. Ez a háló gép látás és tárgyfelismerés céljából volt bevezetve olyan eredményeket produkálva e téren amik az emberi látással versengenek. Rétegei és topológiájának részletes bemutatása a [29] publikációban történik, valamint a 3.2 figurán is látható. Fontos megjegyezni, hogy a háló rétegeiből használva volt a 16 konvolúciós réteg, valamint az 5 pooling réteg, a teljesen összekötött rétegek nem voltak használva.

ConvNet Configuration					
A	A-LRN	B	C	D	E
11 weight layers	11 weight layers	13 weight layers	16 weight layers	16 weight layers	19 weight layers
input ( $224 \times 224$ RGB image)					
conv3-64	conv3-64 <b>LRN</b>	conv3-64 <b>conv3-64</b>	conv3-64 conv3-64	conv3-64 conv3-64	conv3-64 conv3-64
maxpool					
conv3-128	conv3-128	conv3-128 <b>conv3-128</b>	conv3-128 conv3-128	conv3-128 conv3-128	conv3-128 conv3-128
maxpool					
conv3-256 conv3-256	conv3-256 conv3-256	conv3-256 conv3-256	conv3-256 conv3-256 <b>conv1-256</b>	conv3-256 conv3-256 <b>conv3-256</b>	conv3-256 conv3-256 <b>conv3-256</b>
maxpool					
conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512 <b>conv1-512</b>	conv3-512 conv3-512 <b>conv3-512</b>	conv3-512 conv3-512 <b>conv3-512</b>
maxpool					
conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512	conv3-512 conv3-512 <b>conv1-512</b>	conv3-512 conv3-512 <b>conv3-512</b>	conv3-512 conv3-512 <b>conv3-512</b>
maxpool					
FC-4096					
FC-4096					
FC-1000					
soft-max					

3.2. ábra. VGG-19 (Model E) háló topológiája[29]

A választás azért esett erre az előre betanított hálóra, mivel Yaroslav N. és Roman N. kutatása alapján[16] összehasonlítva a AlexNet, GoogLeNet VGG-16 és VGG-19 halókat, a VGG-19 használata során sikerült a leglátványosabb képeket készíteni.

A konvolúciós neuron háló minden rétege tartalmaz egy adott számú szűrőt, amik különböző tulajdonságokat tartalmaznak a bemeneti képről. Ebből kifolyólag maga a bemenet

kódolva van a szűrőkben. Egy  $N$  tulajdonságót tartalmazó réteg  $N$  szűrővel rendelkezik amelyek mérete  $M$ . Maga a réteg kimenete lementhető egy  $N * M$ -es mátrixban. Egy adott réteg válasza egy bemeneti képre vizualizálható, ha gradient descent módszert alkalmazunk egy fehér zajt tartalmazó bemeneti képen. Tehát, legyen  $R^l$  egy adott az  $l$  haló válasza egy adott bemeneti képre. Legyen  $W^l$  ugyanaz az  $l$  háló válasza egy adott fehér zajt tartalmazó bemeneti kép esetében. Akkor felírható a veszteség függvény mint:

$$L_{content}(\vec{x}, \vec{r}, l) = \frac{1}{2} \sum R_{ij}^l - W_{ij}^l \quad (3.1)$$

Ahol  $\vec{x}$  a bemeneti képet jeleni,  $\vec{r}$  pedig azt a kimeneti képet jelenti amit a rendszer generál a rétegek tulajdonságaiból. Mindez Tensorflow környezetben a következőképpen nézne ki:

```
for layer_name in CONTENT_LAYER:
    content_loss += content_weight * (2 * tf.nn.l2_loss(
        all_layers[layer_name] - content_features[layer_name]) /
        content_features[layer_name].size)

content_loss /= len(CONTENT_LAYER)
return content_loss
```

A  $CONTENT\_LAYER$  tuple típusú ami tartalmazza azoknak a rétegeknek az azonosítóját amik részt vesznek a veszteség függvény kiszámításában. A  $content\_features$  változó egy lista, ez tartalmazza az összes réteg válaszát a bemeneti eredeti képre. A visszaküldött érték egy tensor típusú, egyik részét fogja képezni a végső optimalizálandó veszteségfüggvénynek.

### 3.2.2. Az stílus kép tanításának a veszteségi függvénye

Az előbbiekben az eredeti bemeneti kép tartalmára voltunk kíváncsiak. A stílus kép esetében viszont nem maga a kép tartalma a fontos. Ebben az esetben egy mintázatot szeretnénk kinyerni a stíusképből. Ehhez fontos megismerni maga a Gramm mátrix fogalmát. Hogyha adott egy vektorhalmazunk  $v_1 \dots v_n$ , akkor a  $G$  Gramm mátrixot a következő eljárás szerint határozzuk meg[30]:

$$G_{ij} = v_i \cdot v_j \quad (3.2)$$

Tehát hogyha az  $A$  mátrixunk oszlopait maga a  $v_1, v_2 \dots v_n$  vektorok képezik, akkor a  $G$  Gramm mátrix a következőképpen kapható meg:

$$G_{ij} = AA^T \quad (3.3)$$

A Gramm mátrix egy szorzatot jelen egy adott vektorhalmaz összes elemei között. A mi esetünkben ez a vektorhalmaz jelentheti egy adott konvolúciós réteg által kiszűrt tulajdonságokat az adott bemeneti stílusképből. Amint már említtettem, maga a konvolúciós réteg szűrői egy adott kép tulajdonságait tartalmazzák. A Gramm mátrix  $ij$  pozíciójában elhelyezkedő elem megadja, hogy egy adott réteg  $i$ -dik tulajdonsága mennyire teljesül a  $j$ -dik tulajdonság jelenlétében, tehát a két tulajdonság milyen mértékben aktiválódik egyszerre. Ha az  $ij$  pozícion levő elem közelít a 0-hoz, akkor az azt jelenti, hogy a két tulajdonság nem aktiválódik egyszerre, ezzel ellentétben, ha az érték nagy, akkor az azt jelenti, hogy a két tulajdonság nagy valószínűséggel aktiválódik egyszerre.

Hogyha az  $l$  rétegnek  $N$  szűrője van, akkor  $G \in R^{N_l * N_l}$ , ahol:

$$G_{ij}^l = \sum_k F_{ik}^l \cdot F_{jk}^l \quad (3.4)$$

Ahhoz, hogy megkapjuk egy adott háló által generált mintát, textúrát, hasonlóan mint az előzőekben, fehér zaj képet adunk bemenetként. A veszteségfüggvény egyetlen hálóra felírható mint a fehér zaj képre adott válasz és a stílus képre adott válasz átlagos négyzetes hibájaként. A  $G$  jelenti a fehér zaj képre adott választ, az  $A$  pedig a stílus képre adott választ.

$$E_l = \frac{1}{4N_l^2 M_l^2} \sum_{i,j} (G_{ij} - A_{lj})^2 \quad (3.5)$$

Az összes stílus réteg válasza felírható, mint egy összeg, ahol  $w_l$  egy súlyzó faktort jelent:

$$L_{style}(\vec{a}, \vec{x}) = \sum w_l E_l \quad (3.6)$$

### 3.2.3. A stilizált kép tisztítása

A két veszteségfüggvényt alkalmazva sikeresen át tudjuk ruházni a stílust a művészkiépről a bemeneti mindenapi képre. Viszont észlelhetjük, hogy az eredmény kép elégé zajos. Ennek érdekében bevezetünk egy újabb veszteségfüggvényt a zaj csökkentésére, ami a Total Variation Denoising algoritmusra alapszik. Az algoritmus szerint vesszük a stilizált képet és eltoljuk X koordináta mentén egy pixellel, majd az Y koordináta mentén is eltoljuk egy pixellel. Az eltolt képeket kivonjuk az eredi képekből, majd az eredmények abszolút értékeit pixelenként összeadjuk. Ezáltal egy újabb veszteségi függvényt alítunk elő, amit ugyancsak minimalizálni kell.

$$L_{tv}(\vec{a}, \vec{x}) = \sum_{i,j} |(X_{ij} - A_{i+1,j})| + \sum_{i,j} |(X_{ij} - A_{i,j+1})| \quad (3.7)$$

### 3.2.4. A teljes veszteségfüggvény felírása és tanítása statikus képek esetében

Eddig bemutatásra került a stílus kép tanításának veszteségfüggvénye, az eredeti kép veszteség függvényének tanítása valamint egy veszteségfüggvény a kimeneti kép zajtalanítására. A végső veszteségfüggvény egyszerűen felírható a három veszteségfüggvény összegeként.

$$L = L_{content} + L_{style} + L_{tv} \quad (3.8)$$

A teljes veszteségfüggvény tanítására az Adam[32] optimalizáló algoritmus alkalmaztuk. Az Adam ( Adaptive Moment Estimation) momentum algoritmus egy sztochasztikus gradiens alapú optimalizáló algoritmus. Az algoritmus felhasználja a elsődleges, valamint a másodlagos gradiensek átlagát ahhoz, hogy a veszteségfüggvényt minimalizálja. Az optimalizálási lépések a következő eljárás szerint történnek:

$$\begin{aligned} (m_t)_i &= \beta_1(m_{t-1})_i + (1 - \beta_1)(\nabla L(W_t))_i \\ (v_t)_i &= \beta_2(m_{t-1})_i + (1 - \beta_2)(\nabla L(W_t))_i^2 \\ (W_{t+1})_i &= (W_t)_i - \alpha \frac{\sqrt{1 - (\beta_2)_i^t}}{1 - (\beta_1)_i^t} \frac{(m_t)_i}{\sqrt{(v_t)_i} + \varepsilon} \end{aligned} \quad [33] \quad (3.9)$$

Ahol,  $m$  és  $v$  jelentik az elsőfokú valamint másodfokú gradienseket,  $W$  jelenti a súlyzókat,  $\beta_1$  és  $\beta_2$  jelentik a momentumokat, emellett  $\varepsilon$  egy nagyon kis értékű szám annak érdekében, hogy elkerüljük a 0-val való osztást.

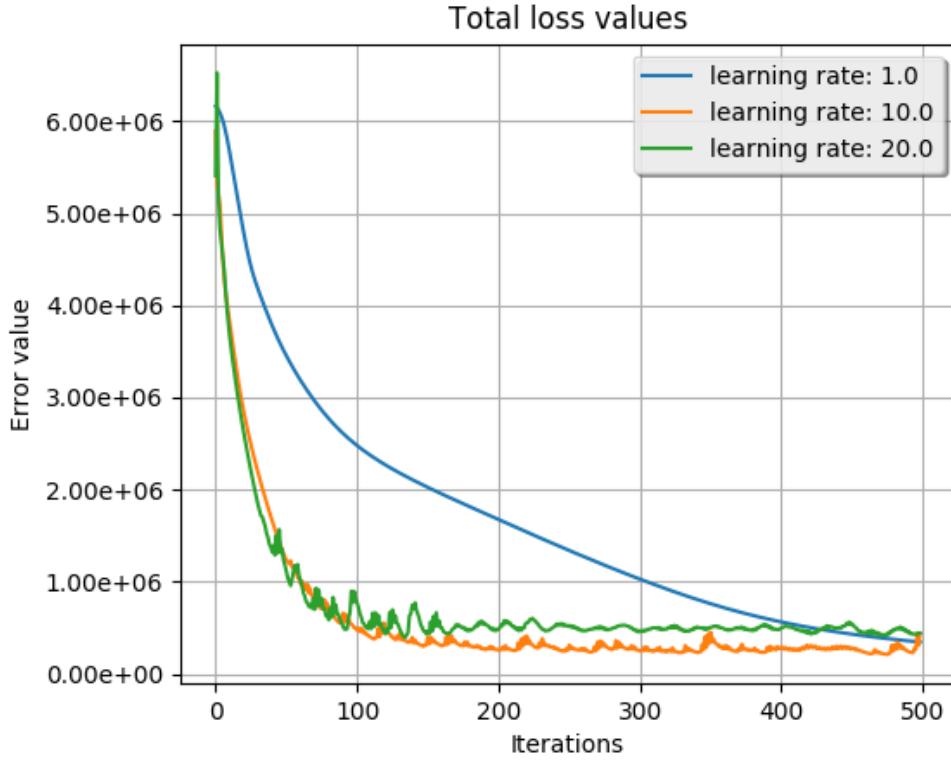
Értelemszerűen a tensorflow deep learning könyvtár beépítetten tartalmazza a Adam optimalizációs algoritmust, ezért ennek a leprogramozására nincs szükség.

## 3.3. A tanítási módszer mozgóképek esetében

### 3.3.1. Naiv megközelítés

Eddigiekben bemutatásra készült miképpen vihető át a stílus egyik statikus képről a másikra. mindenki tisztába van azzal, hogy egy videó statikus képek sorozatából tevődik össze, amiket képkockáknak (frame) nevezünk. Ennek megfelelően a naiv megközelítés az lenne, hogy ha adott egy videó, akkor vágjuk azt darabokra, pontosabban statikus képkockákra, majd az összes képkockára alkalmazzuk a stílus átruházási módszert.

A bemeneti videót frame-ekre való bontásához az ffmpeg nyílt forráskódú alkalmazást



3.3. ábra. Tanítási függvény optimalizálása különböző tanítási ráták esetében

használtuk. Az ffmpeg parancssorból futtatható, a következő paraméterek szükségesek, ahhoz, hogy a mozgóképet statikus képek sorozatává alakítsa:

```
ffmpeg -i <input_video_path> -f image2 frame%05d.<ext>
```

A *frame%05d.<ext>* egy mintát jelent ami szerint a képkockák elnevezését határozza meg. Az *<ext>* a képkockák kiterjesztését jelenti.

Miután a stílus átruházása az összes képkockára megtörtént, vesszük az összes stilizált képkockát és felépítjük belölük a kimeneti videót. Ez ugyancsak megoldható az ffmpeg alkalmazással.

```
ffmpeg "-i" frame%05d.<ext> output_name.<ext>
```

A naiv megközelítés működik, a kimenet egy olyan videó lesz, amely tartalmazza a bemeneti stíluskép jellegzetességeit. Ugyanakkor észlelhető, hogy az eredmény nem valami esztétikus. Észlelhető, hogy a képkockák közötti átmenet nem valami folyamatos. Emellett különböző zajokat, úgynevezett artifact-eket észlelhetünk.

### 3.3.2. A haló inicializálása képkockák esetében

Amint említettük, a háló inicializálására egy fehér zaj képet használtunk statikus bemeneti képre való stílusátruházáskor. Több képkocka esetében ezzel az a gond, hogy a

képkockák nem fognak egyanabba a lokális minimumba konvergálni tanításkor. Végeredményképp az átmenet egyik képkockáról a másikra nem lesz folyamatos.

Egy megoldás kísérlet erre az lenne, hogy a ha egy képkocka stilizálása történik, a hálót ne fehér zaj képpel inicializáljuk, hanem az előtte levő stilizált képkockával. Ez simább átmenetet fog eredményezni abban az esetben, ha a képkockákon nincs mozgás. Ennek a módszernek a használata szükségszerű viszont nem elégsges ahhoz, hogy szemnek is kellemes eredményt kapunk.

### 3.3.3. Optical flow bevezetése

Az optical flow egy mozgóképen megjelenő objektum különböző sebességevektorait jelenti. A képt képkocka közötti optical flow megesztimálásával mérhető az adott objektum valós mozgási sebessége. A kamerához távolabb levő objektumok kisebb sebességevektorokkal rendelkeznek mint azon objektumok amelyek ugyanazon sebességgel mozognak, viszont közelebb vannak a kamerához[34]. Az optical flow meghatározásához a DeepMatching - Deepflow algoritmust használtuk. Ennek a kimenete egy .flo kiterjesztésű fájl ami tartalmazza adott pixelek esetében a horizontális és vertikális elmozdulás vektorokat.

Az optical flow meghatározásával egy mozgóképen meghatározhatók azok a régiók, amik statikusak (adott időn belül az illető régióban nincs változás, úgymond nincs mozgás) valamint azokat a régiókat ahol változás történik. Ami még fontos nekünk meghatározni egy adott mozgó objektum/személy esetében azt az kétdimenziós intervallumot, amelyben mozog. Meghatározzuk a mozgási határait (lásd: ). Ennek a metódusát Sundaran és társai írják le a ... publikációjukban.

Két egymést követő képkocka esetében meghatározható az optical flow előre, tehát az képkockák időrendi sorrendjében, valamint meghatározható visszafele, az időrendi sorrend ellentett irányában. Jelölje  $w(i, j)$  az előre történő optical flow-t, valamint  $\hat{w}(i, j)$  a visszafele történő optical flow-t. Ekkor felírható a w torzítása a w alapján:

$$\tilde{w}(i, j) = w((i, j) + \hat{w}(i, j)) \quad (3.10)$$

A mozgás néküli zónák meghatározhatóak a következőképpen:

$$|\tilde{w} + \hat{w}|^2 > 0.01(|\tilde{w}|^2 + |\hat{w}|^2) + 0.5 \quad (3.11)$$

A mozgási határok pedig meghatározhatóak:

$$|\nabla \hat{u}| + |\nabla \hat{v}| > 0.01|\tilde{w}|^2 + 0.002 \quad (3.12)$$

A 3.11 és 3.13 képletek alapján alkotható egy olyan mátrix ami tartalmazza a mozgás néküli zonánkat valamint a mozgási határokat. Ezt a mátrixot átalakítjuk olyan módon,

hogy a mozgási határokra 1-est rakunk, a többi érték 0-ás lesz, jelöljük ez a mátrixot  $c^{(i-1,i)}$ -vel az  $i - 1$  és  $i$ -dik képkocka között. Ezt felhasználva felírhatjuk egy újabb veszteség függvényt:

$$L_{temporal}(x, w, c) = \frac{1}{D} \sum_{k=1}^D c_k \cdot (x_k - w_k)^2 \quad (3.13)$$

## 3.4. A rendszer tervezése és kivitelezése

### 3.4.1. A rendszer interakciós és viselkedési modellje

A rendszer interakciós modellje (3.4. ábra) a lehető legegyesűbb. Egyetlen aktort határozunk meg, aki maga a felhasználó. A rendszer esetében nem beszélhetünk bármilyen adminisztrációs felületről mivel nem rendelkezik semmiféle háttértárral valamint nem pillanatnyilag nem definiál semmifel hálózati komponenst.

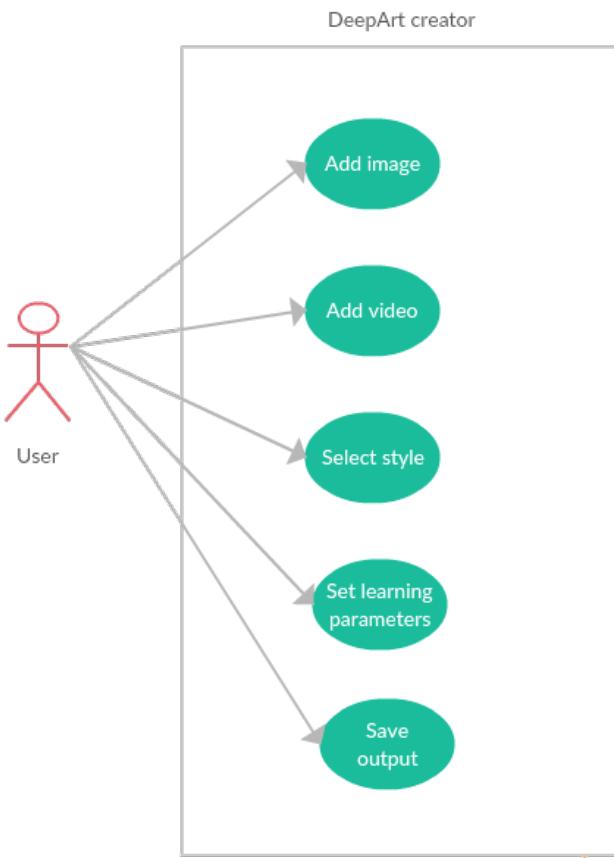
A felhasználónak lehetősége van új kép illetve videó anyag bevitelére. Ez a funkcionalitást egyazon komponens végzi aminek a egyik feladata eldönteni, hogy a kijelölt bemenet kép vagy videó típusú. A felhasználónak lehetősége van a meghatározott kiterjesztésű fájlok közül választani bemenethez.

A felhasználónak lehetősége van a rendszer által biztosított stílusok közül választani. A felhasználó nem határozhat meg új stílust. A rendszer nem biztosít erre adminisztrációs felületet.

A felhasználó meghatározhatja az átruházási folyamat tanítási paramétereit. A rendszer erre biztosít alapértelmezett értékeket amiket a felhasználó változtathat. A rendszer megjegyzi az új paramétereket, ezek új indításkor is megmaradnak. A rendszer az alapértelmezett paramétereket is megjegyzi, ezeket a felhasználó bármikor visszalíthatja az erre kifejlesztett opció használatával.

A felhasználó meghatározhatja az utvonalat ahova a kimenet le lesz mentve. A mentést a rendszer automatikusan el fogja végezni az átruházási folyamat után.

A rendszer interakciós modelljét az 3.1. ábra tartalmazza. A felhasználó kiválaszt egy bemeneti állományt a rendszer által meghatározott kiterjesztések közül (.jpg, .png, .gif, .avi, .mp4), majd kiválaszt egy stílust a megadottak közül. A rendszer annak függvényében, hogy milyen bemenetet adtunk, eldönti, hogy kép vagy mozgóképpel kell dolgoznia. Kép esetén lefuttatja a 3.2-es fejezetben ismertetett tanítási algoritmust amely során az átruházza a művészeti kép stílusát. Mozgókép esetén képkockákra bontja azt, majd alkalmazva lesz a 3.3-as fejezet tanítási metódusa. Ha összes képkocka szerkesztve lett, akkor a rendszer felépíti a képkockákból a kimeneti videót. Végezetül a rendszer lementi a megadott helyre a kimeneti állományt.



3.4. ábra. A rendszer viselkedési modellje

### 3.4.2. A rendszer strukturális modellje

A rendszer a következő komponensekből tevődik össze (3.5. ábra):

- Main Window: az alkalmazás fő ablaka, ez az ablak jelenik meg az alkalmazás indításakor, valamint erről az ablakról lehet kiválasztani a bemeneti adatot és a stílus képet. Az ablak Start gombjának a lenyomásával indítható az átruházási folyamat. Az ablak tartalmaz két beágyazott területet, ahol a bemeneti adat, valamint a végeredmény tekinthető meg.
- Settings Dialog: a főablak menüsorából (Menu Bar) jeleníthető meg. Fő feladata egy grafikus felület biztosítása a különféle beállítások és tanítási paraméterek megadásához. A felhasználó megadhatja az útvonalat ahhoz a mappához, ahol a kimenet lesz tárolva, megadhatja a bemeneti VGG19 háló útvonalat valamint a tanítási paramétereket.
- ProgressBar Dialog: a feladata kimutatni a felhasználó számára, hogy az átruházás milyen státuszban van, mennyi van még hátra amíg a folyamat befejeződik. Erre azért van szükség, mivel az átruházási folyamat időigényes, ezért fontos a felhasználó tudtára adni, hogy milyen állapotban van a folyamat. A folyamat befejeztekor egy

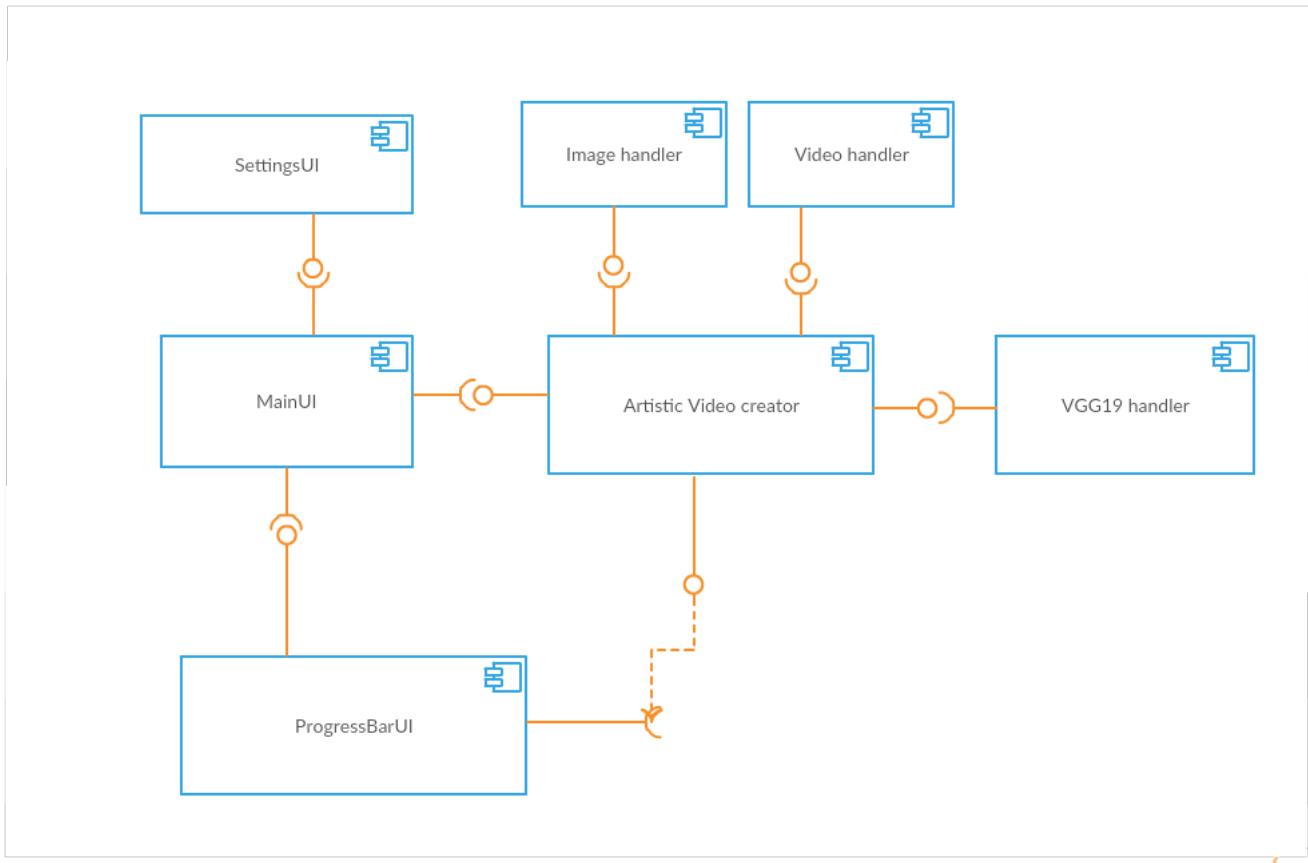
jelzést küld a Main Window komponensnek, ami ki fogja jelezni a felhasználónak a végeredményt.

- Artistic Video creator: ez képezi az aplikáció magját, ez az a komponens, ami elvégzi maga az átruházási folyamatot. A bemeneti paramétereket/adatokat a Main Window komponenstől kapja. Az átruházási folyamat a videó kártyán fog futni, de ettől függetlenül a komponens jelzéseket fog küldeni a ProgressBar komponensnek.
- Image handler: feladata a bemeneti képek beolvasása és kiíratása a merevlemezre. Beolvasáskor egy preprocesszálás műveletet végez, majd kimenetkor egy pozsprocesszálás művelet lesz elvégezve. Fontos megjegyezni, hogy ezt a komponens a processzálások miatt nem ajánlott használni applikáción belüli képkijelzésre, például a Main Window komponens esetében.
- Video handler: feladata a bemeneti videot képkockákra vágni és a kimeneti képkockákból videót készíteni. A képkockák egy temporális folderbe lesznek elmentve vágás után, ezeknek a beolvasását a Image handler komponens végzi majd.
- VGG19 handler: a komponens feladata ez előre betanított és kimentett VGG19 háló beolvasása és átalakítása egy olyan hálóvá amit a Tensorflow könyvtár fel tud dolgozni majd.

### 3.4.3. Többszás megoldás és kommunikáció a komponensek között

A egy bemeneti képre való stílus átruházás időigényes folyamat. Mozgókép esetében ez a folyamat időigénye lineárisan növekedik a képkockák számának szorzatával. Annak érdekében, hogy az alkalmazásunk reszponzív legyen elhagyhatatlan aspektus egy olyan modell kialakítása ami igénybe veszi a modern processzorok többszás működési tulajdonságát. Az Artistic video creator komponens működése során ugyan igénybe veszi a videó kártya számítási kapacitását, de ez semmiképp sem jelenti azt, hogy a futási idő elhanyagolható. Ugyanakkor fontos kiemelni azt is, azon függvényhívások sorozata ami a videókártyán fog elvégződni, szinkron módon történik. Valójában a programunk meghívja az adott függvényt majd addig várakozik, amíg megoldás nem érkezett erre.

Alkalmazásunk esetében megkülönböztetünk egy főszálat valamint egy mellékszálat (3.6. ábra). A főszálon fog futni a Main Window és a köréje csoportosuló felhasználói felülettel rendelkező komponensek, mint például a Settings vagy a ProgressBar. Az alkalmazás indításakor csak a főszál indul el ami létrehozza a Main Window és Settings komponenseket. Ezt követően, ha a felhasználó megadja a bemeneti állományt, létrejön a ProgressBar komponens. A ProgressBar azért jön létre csak ebben a pillanatban, mivel



3.5. ábra. A rendszert alkotó komponensek

a rendszernek el kell döntenie a bemenet típusát és ennek függvényében egy factory modell segítségével dönti el, hogy milyen típusú komponens jön létre. Ebben a pillanatban azonban a Progressbar komponens még nem látható a felhasználó számára.

Ha felhasználó úgy dönt, hogy a megfelelő bemenetet választotta ki, elindíthatja az átruházási folyamatot. Ekkor egy külön szál jön létre (Worker thread), ami átveszi a bemeneti adatokat és elkezdi a folyamatot. A terhelés ebben a pillanatban átkerül a másodlagos szálra, ennek eredményeképp a főszál nem fog blokkolódni. Így az felhasználói felület aktív marad a felhasználó számára és ki fogja tudni szolgálni annak kéréseit. A munkafolyamat közben az Artistic Video creator komponens kapcsolatban áll a Progress-Bar komponenssel és jelzéseket küld a munkafolyamat státusáról így ez ki tudja jelezni, hogy mennyi munka van még hátra. A munkafolyamat bármikor leállítható még azelőtt, hogy az átruházás befejeződött volna. Ilyenkor a ProgressBar üzenetet küld az Artistic Video creator komponensnek, ami beállít egy saját leállításra szánt flag-et. A folyamat két iteráció között állítható le, ha az illető flag be volt állítva. Miután a munkafolyamat sikeresen leállt, egy jelzés fog érkezni a ProgressBar komponenshez ami majd nyugtázni fogja. Ha a munkafolyamat bevégeződött, vagy a felhasználó által megszakításra került, a másodlagos szál el fog halni, az ezáltal igényelt erőforrások pedig fel fognak szabadulni.

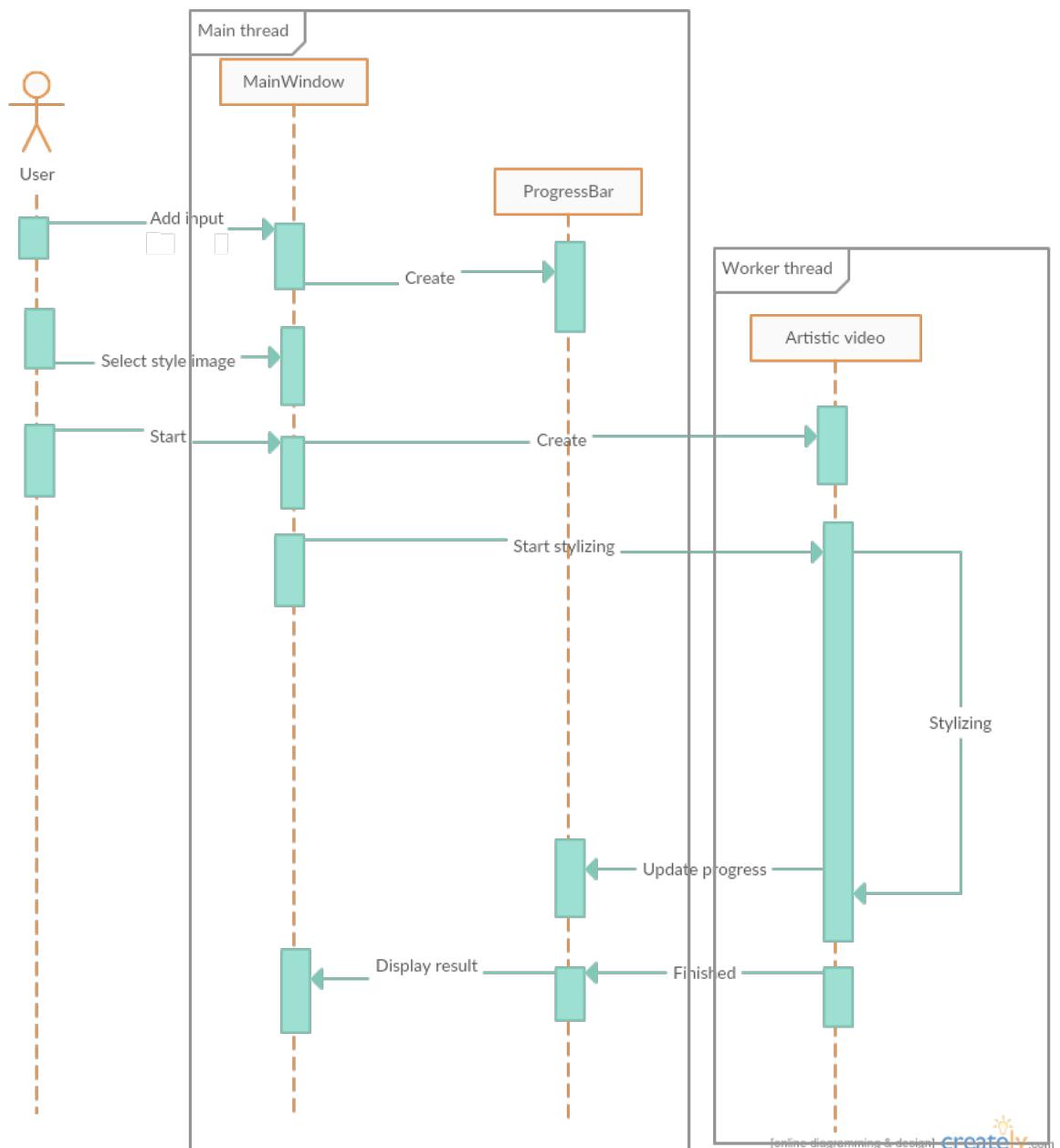
### 3.4.4. A rendszer implementálása

A rendszer implementációja Python környezetben történt. Ahogy már a bevezetőben is említésre került, aaz alább könyvtárak kerültek felhasználásra: numpy, Tensorflow, opencv, PyQt. Az elkövetkezőkben ki szeretnék térti a PyQt könyvtár bemutatására ugyanis a szoftver jelentős része ennek a felhasználásával valósult meg és az implementációban használt egyes tervezési minták a PyQt sajátosságait próbálják kiaknázni.

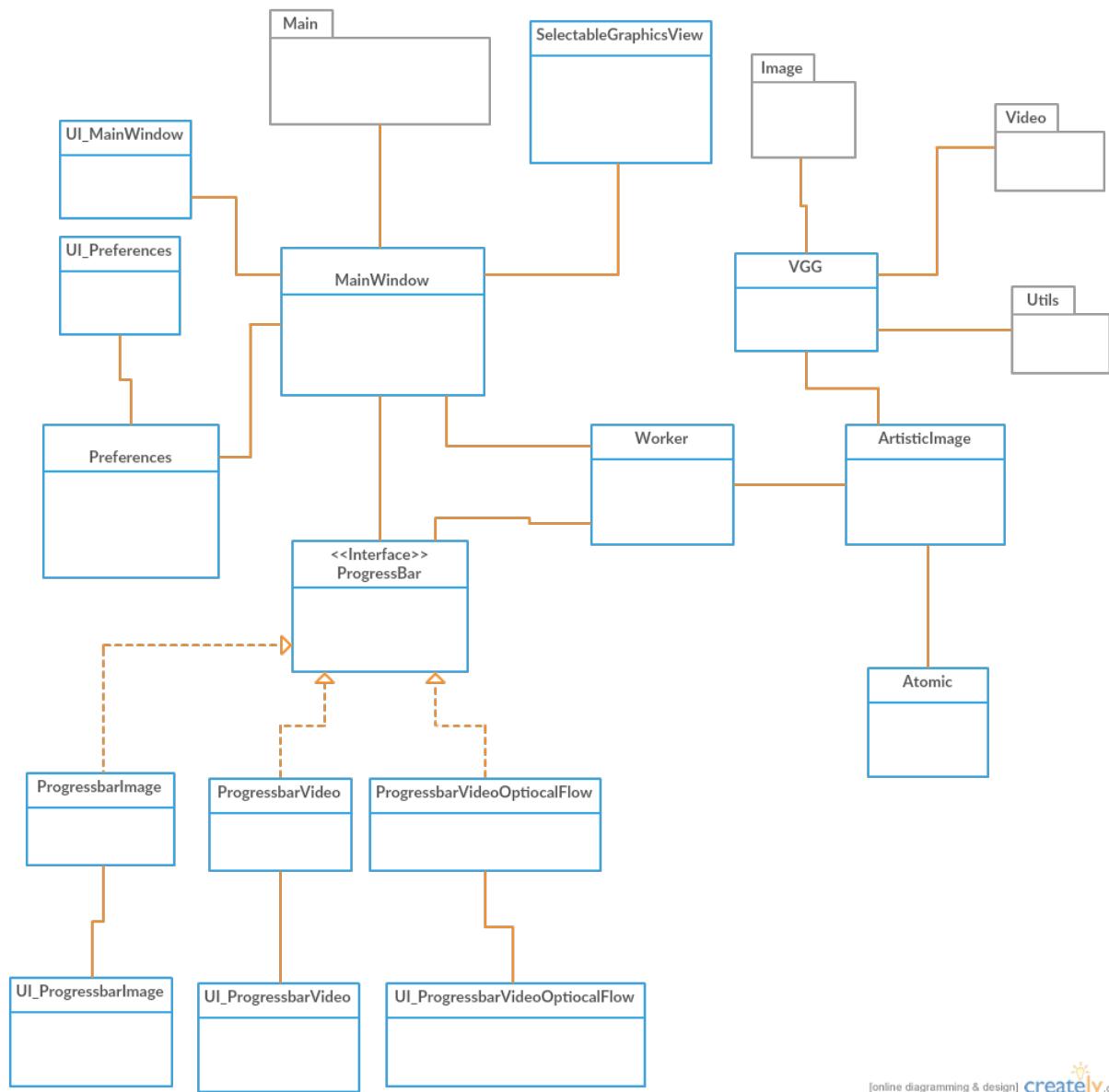
A PyQt a híres Qt könyvtárra épül. A Qt egy C++ könyvtár aminek célja olyan grafikus szoftverek megvalósítása amik különböző platformokat is támogatnak. A Qt univerzális megoldást ad a grafikus felületek elkészítésére, de emellett számos más komponenseket is implementál, mint például tömbök, listák, konténerek, párhuzamos szálak, smartpointerek, hálozati protokollok, stb. A Qt egyik újítása a SIGNAL-ok és a SLOT-ok bevezetése. Ennek működése egyszerű, egy adott osztály adattagjai és metódusai mellett deklarálhatók SIGNAL-ok és SLOT-ok is. Egy osztály egyes metódusai jelzésket adhatnak ki SIGNAL-ok segítségével amire a SLOT metódusok csatlakozhatnak. Egy adott SIGNAL kibocsátásakor a rá csatkakozott összes SLOT függvény le fog futni. Például egy grafikus felületen levő gomb lenyomásakor kibocsájtunk egy SIGNAL-t amire a neki megfelelő SLOT függvény meghívódik és lefut. A jelzéskibocsátás működik többszásas program esetében is, az is megoldható, hogy egy adott jelzésre egy más szalon futó metódus válaszoljon. Természetesen a SIGNAL-SLOT megoldás a PyQt esetében is tökéletesen működik és egy nagyon kényelmes megoldást biztosít a grafikus felület és a business logika összekötésében.

A PyQt egy másik előnye az, hogy elegánsan megoldható a modell-nézet-kontroller szoftverfejlesztési minta. Maga a nézet megvalósítható XML leíró nyelv segítségével. Ebből automatikusan generálható egy Python osztály, ami fel fogja építeni maga a kinézetet. Ezt a kontrollerbe be lehet integrálni kompozícióval majd a SIGNAL-SLOT-ok összekötése után használni lehet azt.

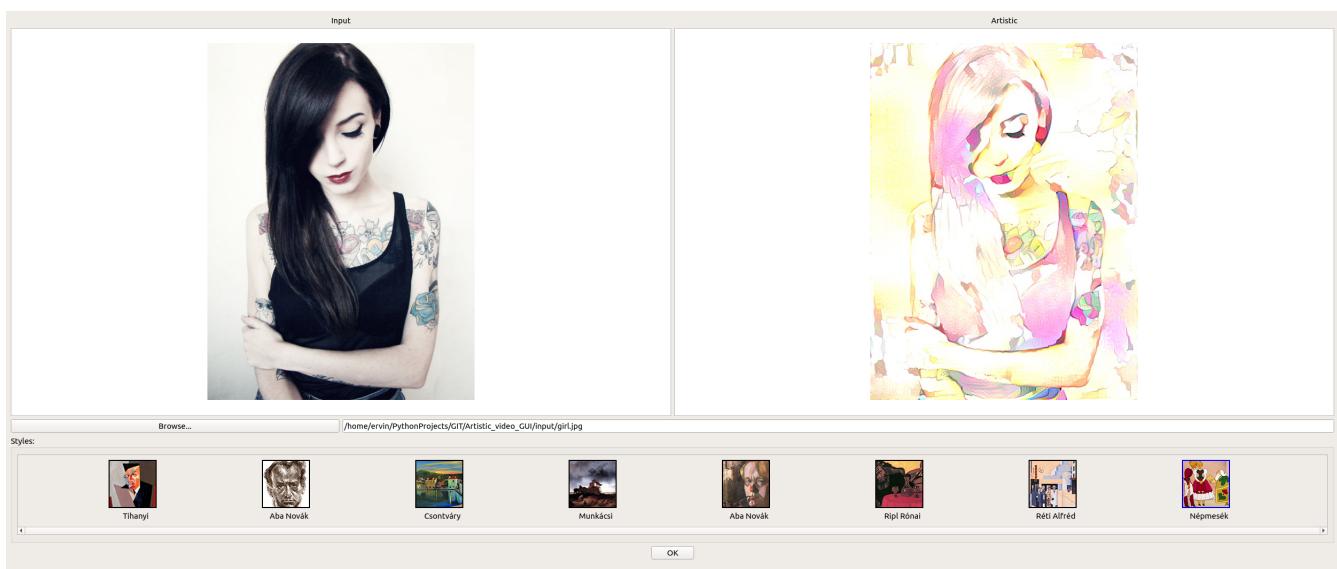
A továbbiakban részletes bemutatásra és elemzésre kerül az alkotásunk objektum orientált megvalósítása (3.7. ábra).



3.6. ábra. Átruházás szekvencia diagrammja



3.7. ábra. A rendszer osztálydiagrammja

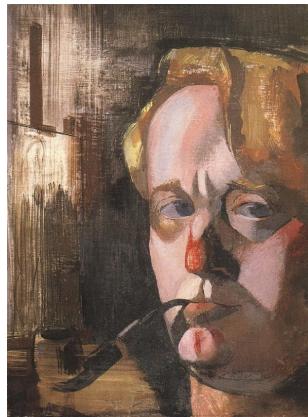


3.8. ábra. A rendszer felhasználói felülete



(a) Aba Novak Vilmos - Ön-

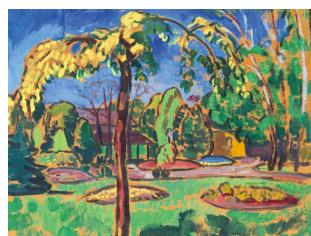
arckép



(b) Aba Novak Vilmos - Selfportrait



(c) Csontvary Kosztka Tiadar - Traui tájkép naplemente idején



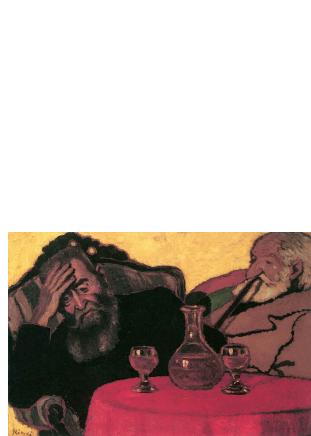
(d) Iványi Grunwald Béla - Parkrészlet Kecskeméten



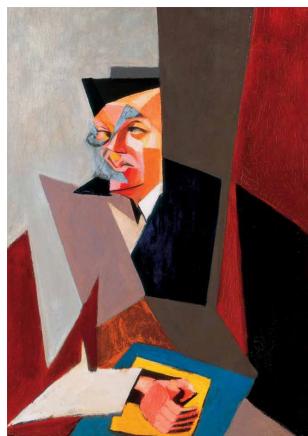
(e) Munkácsi Mihály - Vihar a pusztán



(f) Réti Alfréd



(g) Ripl-Rónai József - Apám és Piacsek bácsi vörösbor mellett



(h) Tihanyi Tzara



(i) Magyar Népmesék

3.9. ábra. Stílusnépek

## 4. fejezet

### A rendszer tesztelése

testing

## 5. fejezet

### Összefoglaló

összefoglaló

# Ábrák jegyzéke

3.1.	A rendszer működése felülnézetből . . . . .	16
3.2.	VGG-19 (Model E) háló topológiája[29] . . . . .	18
3.3.	Tanítási függvény optimalizálása különböző tanítási ráták esetében . . . . .	22
3.4.	A rendszer viselkedési modellje . . . . .	25
3.5.	A rendszert alkotó komponensek . . . . .	27
3.6.	Átruházás szekvencia diagramma . . . . .	29
3.7.	A rendszer osztálydiagramma . . . . .	30
3.8.	A rendszer felhasználói felülete . . . . .	31
3.9.	Stílusnépek . . . . .	32

# Irodalomjegyzék

- [1] Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks (2012)
- [2] Zeiler, M. D. and Fergus, R. Visualizing and understanding convolutional networks (2013)
- [3] <https://en.wikipedia.org/wiki/CUDA> (2017.04.24)
- [4] <http://caffe.berkeleyvision.org> (2017.04.24)
- [5] <https://keras.io/> (2017.04.24)
- [6] <http://deeplearning.net/software/theano/> (2017.04.24)
- [7] <https://www.tensorflow.org/> (2017.04.24)
- [8] <http://torch.ch/> (2017.04.24)
- [9] <https://computerstories.net/microsoft-computer-outperforms-human-image-recognition> (2017.04.29)
- [10] Kevin Alfianto, Mei-Chen Yeh, Kai-Lung Hua - Artist-based Classification via Deep Learning with Multi-scale Weighted Pooling (2016)
- [11] Rosenblatt F. - The Perceptron: A Probabilistic Model For Information Storage And Organization In The Brain (1958)
- [12] Werbos, P.J. - Beyond Regression: New Tools for Prediction and Analysis in the Behavioral Sciences (1975)
- [13] LeCun, Yann, Léon Bottou, Yoshua Bengio, Patrick Haffner - Gradient-based learning applied to document recognition (1998)
- [14] Dave Steinkraus, Patrice Simard, Ian Buck - Using GPUs for Machine Learning Algorithms (2005)
- [15] Gatys, L. A., Ecker, A. S., Bethge - A neural algorithm of artistic style (2015)

- [16] Yaroslav Nikulin, Roman Novak - Exploring the Neural Algorithm of Artistic Style (2016)
- [17] Justin Johnson, Alexandre Alahi, Li Fei-Fei - Perceptual Losses for Real-Time Style Transfer and Super-Resolution
- [18] Ulyanov, D., Lebedev, V., Vedaldi, A., and Lempitsky - Texture networks: Feed-forward synthesis of textures and stylized images
- [19] Ulyanov, D., Lebedev, V., Vedaldi, A., and Lempitsky - Instance Normalization: The Missing Ingredient for Fast Stylization
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Prisma\\_\(app\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Prisma_(app)) (2017.04.29)
- [21] Manuel Ruder, Alexey Dosovitskiy, Thomas Brox - Artistic style transfer for videos (2016)
- [22] asd
- [23] <https://www.python.org/> (2017.04.30)
- [24] <http://www.numpy.org/> (2017.04.30)
- [25] <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/intro> (2017.04.30)
- [26] <http://opencv.org/> (2017.04.30)
- [27] Gatys, L. A., Ecker, A. S., Bethge, M. Texture synthesis and the controlled generation of natural stimuli using convolutional neural networks (2015)
- [28] <https://research.googleblog.com/2015/06/inceptionism-going-deeper-into-neural.html> (2017.05.01)
- [29] Simonyan, K., Zisserman, A. - Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale ImageRecognition (2015)
- [30] <http://mathworld.wolfram.com/GramMatrix.html> (2017.05.02)
- [31] [https://en.wikipedia.org/wiki/Total\\_variation\\_denoising](https://en.wikipedia.org/wiki/Total_variation_denoising) (2017.05.03)
- [32] Kingma D. P., Lei Ba, J. - ADAM: A method for stochastic optimization (2015)
- [33] <http://caffe.berkeleyvision.org/tutorial/solver.html> (2017.05.14)
- [34] <https://www.mathworks.com/discovery/optical-flow.html> (2017.05.18)