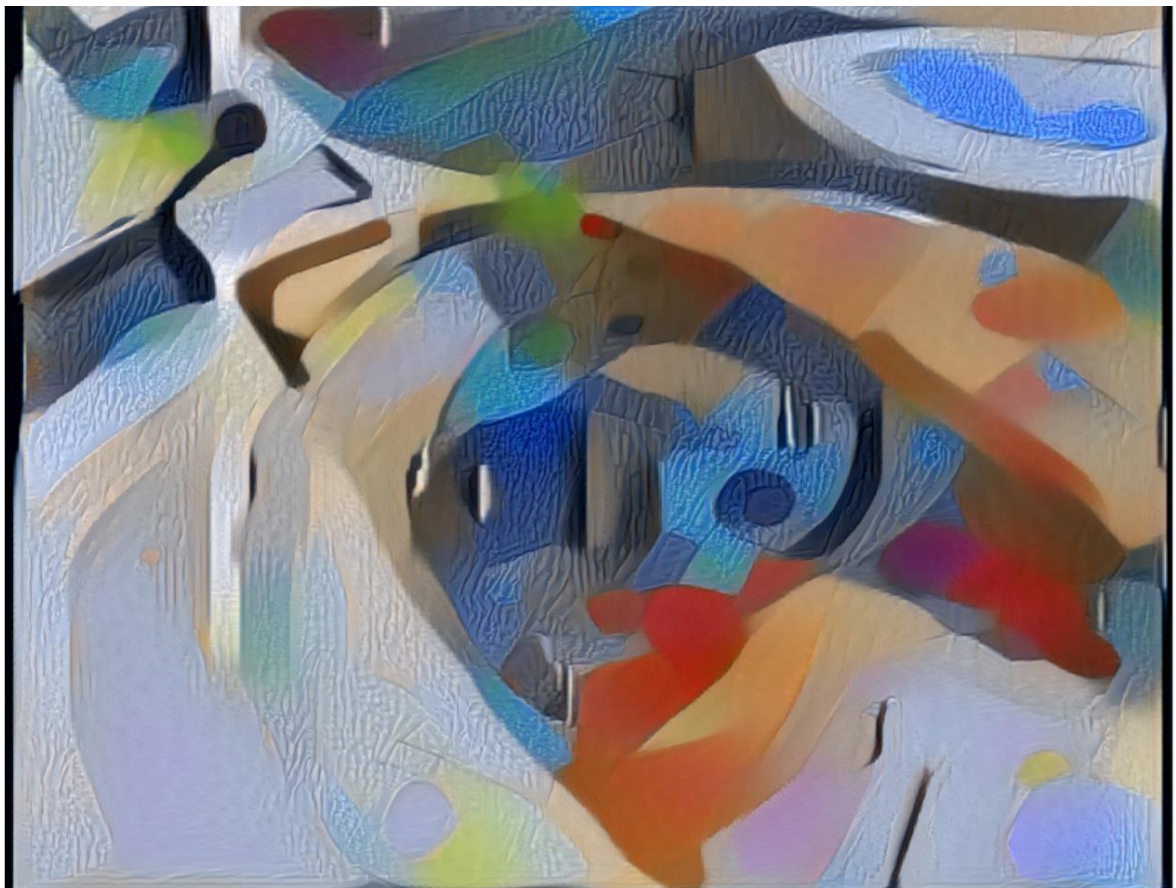




**Τμήμα Τεχνών Ήχου & Εικόνας,
Ιόνιο Πανεπιστήμιο**

Πτυχιακή Εργασία

“Τέχνη και Τεχνητή Νοημοσύνη”



Φοιτήτρια: Ευαγγελία Γιαννακού, TX2015107

Επιβλέπουσα: Τάνια Τσιρίδου

Εξεταστική Επιτροπή: Ιωάννα Μηλιαρέση, Εμμανουήλ Ροβίθης

Κέρκυρα, 25/01/2022

Συνοπτική περίληψη (Abstract)

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση σύγχρονων τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης, που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή έργων τέχνης, γραφικών και μουσικής, καθώς και η παρουσίαση κάποιων πειραματικών εφαρμογών. Αρχικά γίνεται μία σύντομη επισκόπηση της ιστορίας της τεχνητής νοημοσύνης και παρουσιάζονται σύγχρονοι καλλιτέχνες, που το έργο τους εντάσσεται ή αναφέρεται σε μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης. Έπειτα, γίνεται αναφορά στο θεωρητικό και επιστημονικό υπόβαθρο των κυριότερων κατηγοριών νευρωνικών δικτύων, που βρίσκουν εφαρμογή στη σύγχρονη καλλιτεχνική πράξη. Στη συνέχεια, αναλύονται επιλεγμένες τεχνολογίες για την επεξεργασία ήχου, την παραγωγή μουσικής, την παραγωγή και σύνθεση εικόνων. Τέλος, παρουσιάζεται τμηματικά η διαδικασία δημιουργίας πειραματικού οπτικοακουστικού έργου¹.

¹ Η εικόνα εξωφύλλου προέρχεται από το προσωπικό αρχείο της γράφουσας και έχει δημιουργηθεί με μεθόδους AI.

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά στη διεπιστημονική έρευνα σύγχρονων μορφών τέχνης που αναπτύσσονται με μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης και αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, οι οποίες υπάγονται στην επιστήμη των υπολογιστών.

Η εργασία αποτελείται από δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος γίνεται αρχικά μια αναδρομή στην ιστορία της τεχνητής νοημοσύνης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται καλλιτέχνες και έργα που εντάσσονται στο κίνημα της τέχνης AI. Τέλος, αναπτύσσεται το θεωρητικό και επιστημονικό υπόβαθρο των κυριότερων κατηγοριών νευρωνικών δικτύων. Στο δεύτερο μέρος, γίνεται περαιτέρω ανάλυση επιλεγμένων αλγορίθμων, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία καλλιτεχνικών έργων, και παρουσιάζεται η διαδικασία δημιουργίας πειραματικού οπτικοακουστικού έργου με χρήση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης.

Αναλυτικότερα, στην ιστορική αναδρομή παρουσιάζεται συνοπτικά η διαδρομή της τεχνητής νοημοσύνης από τις πρώτες αναφορές στους μύθους της αρχαιότητας μέχρι τη σημερινή εποχή, οπότε η χρήση της όχι μόνο είναι εκτεταμένη σε όλους τους τομείς της ζωής, αλλά και υπάρχουν σοβαρές ανησυχίες για τους κινδύνους που υποβόσκουν από την ανεξέλεγκτη χρήση.

Έπειτα, αφού γίνεται μια σύντομη επεξήγηση του όρου τέχνη AI, παρουσιάζεται ένα σύνολο σύγχρονων καλλιτεχνών των οποίων το έργο αναπτύσσεται με διαφορετικές μεθόδους μηχανικής μάθησης ή εμπνέεται από την ευρεία χρήση της τεχνητής νοημοσύνης στον σύγχρονο κόσμο.

Στη συνέχεια, αναπτύσσεται η βασική θεωρία των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, παρουσιάζονται κάποιες από τις επικρατέστερες κατηγορίες αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, αναλύεται το θεωρητικό και επιστημονικό τους υπόβαθρο και αναφέρονται ενδεικτικές εφαρμογές τους στη δημιουργία τέχνης. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται α) τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs), τα οποία αποτελούν την κύρια θεωρητική βάση για την ανάπτυξη μιας συλλογής αλγορίθμων μηχανικής μάθησης, β) τα συνελικτικά νευρωνικά δίκτυα (CNNs), τα οποία έχουν ευρεία εφαρμογή στην επεξεργασία εικόνων, γ) τα παραγωγικά ανταγωνιστικά δίκτυα (GANs), τα οποία χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα για την παραγωγή καλλιτεχνικών

έργων, και δ) τα επαναλαμβανόμενα νευρωνικά δίκτυα (RNNs), που χρησιμοποιούνται κυρίως για επεξεργασία ακολουθιακών δεδομένων, όπως ο προφορικός και γραπτός λόγος και η μουσική.

Δεδομένου ότι υπάρχει ένα τεράστιο πλήθος αλγορίθμων μηχανικής μάθησης που μπορούν να εφαρμοστούν για τη δημιουργία έργων τέχνης, στο δεύτερο μέρος παρουσιάζουμε αναλυτικότερα κάποιους επιλεγμένους αλγόριθμους που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία ήχου, τη δημιουργία μουσικής, τη δημιουργία μοτίβων και την επεξεργασία εικόνων ή και βίντεο με τη μέθοδο μεταφοράς τεχνοτροπίας.

Ακολούθως, παρουσιάζεται τμηματικά η διαδικασία εφαρμογής επιλεγμένων αλγορίθμων, όπως καθορίζεται από διαθέσιμο κώδικα προγραμματισμού, και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών αυτών εφαρμογών.

Τέλος, γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα, τα οποία εξήχθησαν με βάση τη μελέτη της ιστορικής εξέλιξης, του επιστημονικού υπόβαθρου, των πρακτικών εφαρμογών της τεχνητής νοημοσύνης στη σύγχρονη τέχνη, των πειραματισμών, καθώς και των προβληματισμών που εγείρονται εξαιτίας της ευρείας χρήσης της τεχνητής νοημοσύνης στον σύγχρονο κόσμο.

Πίνακας Περιεχομένων

Συνοπτική περίληψη (Abstract)	1
Περίληψη.....	2
Εισαγωγή	5
Μέρος 1 ^ο	7
Α. Ιστορική αναδρομή	7
Β. AI Artists και ενδεικτικά σύγχρονα έργα που δημιουργήθηκαν με χρήση τεχνητής νοημοσύνης.....	18
Γ. Συνοπτική παρουσίαση δικτύων τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη καλλιτεχνική πράξη	34
i. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks).....	34
ii. Συνελκτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks).....	40
iii. Παραγωγικά Ανταγωνιστικά Δίκτυα (Generative Adversarial Networks).....	45
iv. Επαναλαμβανόμενα Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks)	47
Μέρος 2 ^ο	50
Α. Ανάλυση επιλεγμένων τεχνολογιών για τη δημιουργία οπτικο-ακουστικού υλικού και πειραματικές εφαρμογές	50
i. Επεξεργασία ήχου	50
ii. Magenta.....	53
iii. Compositional Pattern Producing Networks (CPPNs).....	57
iv. Style Transfer	63
Β. Παρουσίαση της διαδικασίας δημιουργίας οπτικοακουστικού έργου	67
i. Δημιουργία μουσικής σύνθεσης	67
ii. Δημιουργία γραφικών	69
iii. Δημιουργία κινούμενων γραφικών	71
iv. Τελική σύνθεση βίντεο	75
Συμπεράσματα	77
Βιβλιογραφία	80

Εισαγωγή

Η τεχνητή νοημοσύνη εντάσσεται στο γνωστικό πεδίο της επιστήμης των υπολογιστών. Παρόλα αυτά, έχει προκύψει μέσα από τη συνεργασία πολλών διαφορετικών επιστημών, όπως η πληροφορική, η νευρολογία, η γνωστική ψυχολογία, η φιλοσοφία, η γλωσσολογία, η μηχανική, ο αυτοματισμός. Στόχος της τεχνητής νοημοσύνης είναι η δημιουργία μηχανών που διαθέτουν γνωστικές ικανότητες παρόμοιες με εκείνες του ανθρώπου, όπως η μάθηση, ο σχεδιασμός, η εξαγωγή συμπερασμάτων, η λήψη αποφάσεων, η κατανόηση κειμένων, η αναγνώριση εικόνων και προσώπων, η επίλυση προβλημάτων, η δημιουργικότητα.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η διερεύνηση των εφαρμογών της τεχνητής νοημοσύνης στην τέχνη, η μελέτη του θεωρητικού υπόβαθρου και ο πειραματισμός με την πρακτική εφαρμογή επιλεγμένων τεχνολογιών.

Η τεχνητή νοημοσύνη έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον σε διάφορα επιστημονικά πεδία, ενώ όλο και περισσότερο εφαρμόζεται σε διάφορες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη καθημερινή ζωή. Από αυτή την τεχνολογική εξέλιξη δεν θα μπορούσε να μείνει ανεπηρέαστος και ο χώρος της τέχνης. Εξάλλου, η δημιουργία τέχνης με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών δεν είναι κάτι νέο. Η χρήση αλγόριθμων για τη δημιουργία διαφόρων μορφών τέχνης είχε ήδη ξεκινήσει από τη δεκαετία του '50, εποχή κατά την οποία άρχισε και η μελέτη για την ανάπτυξη της τεχνητής νοημοσύνης. Κάποιοι από τους πρωτοπόρους στην Ψηφιακή Τέχνη, που εξερεύνησαν τη δυνατότητα των υπολογιστών για τη δημιουργία έργων με εικαστικό ενδιαφέρον ήταν οι Frieder Nake, Georg Nees, Manfred Mohr, Vera Molnár. Επίσης πρωτοποριακοί ήταν την ίδια περίοδο οι πειραματισμοί του Ιάκωβου Ξενάκη στη μουσική και οι αλγοριθμικές ηλεκτροακουστικές συνθέσεις του.

Σήμερα, τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης είναι ενσωματωμένες στα περισσότερα λογισμικά, και ειδικότερα σε εκείνα που χρησιμοποιούνται από τους καλλιτέχνες νέων μέσων. Την τελευταία δεκαετία έχουν παρουσιαστεί εντυπωσιακές δημιουργίες καλλιτεχνών, που χρησιμοποιούν για την ανάπτυξη των έργων τους νευρωνικά δίκτυα. Τα έργα μπορεί να αφορούν ζωγραφική, χορό, εγκαταστάσεις, δημιουργία βίντεο, κινούμενες εικόνες, γραφικά, σύνθεση μουσικής. Στόχος των

καλλιτεχνών είναι η διερεύνηση της επίδρασης της τεχνητής νοημοσύνης στην τέχνη, την κοινωνία και τον πολιτισμό, καθώς και ζητημάτων ηθικής που απορρέουν από τη χρήση της τεχνολογίας, με απώτερο σκοπό την κινητοποίηση για θετική αλλαγή μέσω της τέχνης.

Η μεθοδολογία που ακολουθείται στην εργασία είναι η βιβλιογραφική επισκόπηση και η διαδικτυακή έρευνα. Αρχικά γίνεται βιβλιογραφική επισκόπηση της ιστορίας της τεχνητής νοημοσύνης, στη συνέχεια παρουσιάζονται σύγχρονοι καλλιτέχνες και αντιπροσωπευτικά έργα τους, στα οποία γίνεται χρήση ή αναφορά τεχνητής νοημοσύνης. Κατόπιν, παρουσιάζονται τέσσερις κατηγορίες νευρωνικών δικτύων και γίνεται αναφορά στις εφαρμογές τους στην τέχνη. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικότερα επιλεγμένοι αλγόριθμοι, που αναπτύχθηκαν με βάση τα προαναφερθέντα νευρωνικά δίκτυα. Τέλος, παρουσιάζεται η πρακτική εφαρμογή επιλεγμένων αλγορίθμων μέσω προγραμματιστικών εργαλείων, καθώς και τα αποτελέσματα που προέκυψαν.

Μέρος 1^ο

A. Ιστορική αναδρομή

Η ιστορία της τεχνητής νοημοσύνης, η οποία άρχισε θεωρητικά να αναπτύσσεται από τη δεκαετία του '40, φαίνεται να ανάγεται σε πολύ πρώιμες εποχές της ιστορίας της ανθρωπότητας σαν ένα όνειρο του ανθρώπου να δημιουργήσει ο ίδιος όντα που θα φέρουν χαρακτηριστικά ανθρώπινης νοημοσύνης².

Στην αρχαία ελληνική μυθολογία υπάρχουν πολλές αναφορές για μηχανικά όντα, τα λεγόμενα Αυτόματα (Automata), τα οποία, έχοντας διδαχθεί από τους θεούς, έφεραν εις πέρας εργασίες που για τους ίδιους ήταν δύσκολες ή κουραστικές. Χαρακτηριστική είναι η αναφορά στην Ιλιάδα του Ομήρου στις Χρυσές Κόρες, ένα ζεύγος χρυσών πανέμορφων κορασίδων, που είχε δημιουργήσει ο θεός Ήφαιστος για να τον υπηρετούν και οι οποίες ήταν ζωντανά αγάλματα που διέθεταν νου, δύναμη αλλά και ικανότητα ομιλίας³. Άλλες μηχανικές δημιουργίες με ιδιότητες Αυτόματων στην ελληνική μυθολογία, που αποδίδονται στον Ήφαιστο και έχουν διασωθεί από αναφορές του Ομήρου ή και μεταγενέστερων συγγραφέων, ήταν: οι Καβειρικοί Ίπποι, ο Καυκάσιος Αετός, οι Χρυσές Κηλήδονες, ένα ζευγάρι χρυσών και αργυρών σκύλων που φύλασσαν την είσοδο του παλατιού του βασιλιά των Φαιάκων, οι χάλκινοι ταύροι του βασιλιά της Κολχίδας, οι χρυσοί τρίποδες που εξυπηρετούσαν τους θεούς του Ολύμπου στις εορτές τους⁴.

Μια από τις πιο γνωστές μηχανικές κατασκευές που θεωρούνταν ως χάλκινο γιγαντιαίο ρομπότ, ήταν ο Τάλος. Η κατασκευή του αποδίδονταν είτε στον Ήφαιστο, είτε στον ίδιο τον Δία, είτε στον Δαίδαλο. Ο Τάλος είχε αναλάβει τη φύλαξη του νησιού της Κρήτης, διασχίζοντάς το τρεις φορές την ημέρα, πετώντας βράχους στη θάλασσα προκειμένου να αποτρέψει τους ξένους να αποβιβαστούν και να

² Pamela McCorduck et al., "History of artificial intelligence", (*IJCAI*, 1977), 951-954.

³ Δήμητρα Μήττα, «Αρχαία Ελληνική Μυθολογία, Μειξογενείς θνητές οντότητες -Τέρατα – Αυτόματα, Κόρες Χρυσές (ζωντανά αγάλματα, αυτόματα)», <http://users.sch.gr/ipap/mixogeni/183.htm>, Pamela McCorduck et al., ό.π.

⁴ Adrienne Mayor, *Gods and robots: myths, machines, and ancient dreams of Technology*, (Princeton University Press, 2020). Pamela McCorduck, *Machines who think: A personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence*, (CRC Press, 2004). Aaron Atsma, "Automotons (Automotones)", *Theoi Project*, <https://www.theoi.com/Ther/Automotones.html#Kuon>.

προχωρήσουν στο εσωτερικό του νησιού, αλλά και εμποδίζοντας του ντόπιους να φύγουν χωρίς την άδεια του Μίνωα. Επίσης, εφάρμοζε το νόμο συνθλίβοντας τους παραβάτες στο πυρακτωμένο στήθος του. Η μορφή του Ταλού ήταν βαθιά ριζωμένη στη λαϊκή συνείδηση και απεικονίστηκε με πολλούς τρόπους στην αρχαία ελληνική τέχνη σε νομίσματα, αγγειογραφίες, τοιχογραφίες⁵.



Εικόνα 1. Απεικονίσεις του Τάλου σε χάλκινο νόμισμα και ελικοτό κρατήρα. (Πηγή: greek-language.gr)

Μηχανικές μεταλλικές κατασκευές με αυτόνομη δράση αναφέρονται σε πολλούς μύθους και παραμύθια διαφόρων λαών. Γνωρίζουμε σήμερα ότι υπήρχαν και κατασκευές που διέθεταν αυτοματισμό και μηχανικό προγραμματισμό με τον αρχαιότερο γνωστό να είναι ο Μηχανισμός των Αντικυθήρων. Εκείνος που θεωρείται από τους πρώτους εφευρέτες που κατασκεύασε αυτόνομη πτητική μηχανή στα μέσα του 4^{ου} π.Χ. αι. ήταν ο Αρχύτας από τον Τάραντα. Αργότερα, στην ελληνιστική εποχή ο Ήρων ο Αλεξανδρεύς κατασκεύασε το πρώτο προγραμματιζόμενο αυτοκινούμενο τρίκυκλο και έγραψε το κορυφαίο σύγγραμμα της αρχαίας μηχανικής, το οποίο θεμελιώνει τη θεωρία του αυτοματισμού⁶. Ο Ήρωνας φέρεται ότι ήταν μαθητής του Κτησίβιου του Αλεξανδρέα, ενός άλλου εφευρέτη που ανακάλυψε τις τεχνικές αρνητικής τροφοδότησης, που χρησιμοποιήθηκαν για αιώνες στις μηχανικές κατασκευές. Την ίδια τεχνική είχε χρησιμοποιήσει και ο μαθητής του Φίλων ο

⁵ Μήττα, Δήμητρα. «Μορφές και Θέματα της Αρχαίας Ελληνικής Μυθολογίας». *Ψηφίδες για την ελληνική γλώσσα*. https://www.greek-language.gr/digitalResources/ancient_greek/mythology/lexicon/crete/page_003.html.

⁶ Μαρία Κυδωνάκη, «Η Ιστορία των Ρομπότ. Η εξέλιξή τους.», *Αθηνοδρόμιο*, Ρομποτική, <https://tinyurl.com/yzcsch8>.

Βυζάντιος⁷. Η ελληνιστική παράδοση συνεχίστηκε και στη βυζαντινή εποχή, όπως δείχνει το φορητό ηλιακό ρολόι της πρώιμης βυζαντινής εποχής (δεύτερο μισό του 5^{ου} ή 6^{ου} αι.) που εκτίθεται στο Μουσείο Επιστημών του Λονδίνου⁸. Άλλες γνωστές μηχανικές κατασκευές της βυζαντινής εποχής ήταν το υδραυλικό ρολόι της Γάζας και ο θρόνος του αυτοκράτορα Θεόφιλου, κατασκευή του Λέοντα του Μαθηματικού. Όπως φαίνεται, η βυζαντινή παράδοση επηρέασε και την ισλαμική. Οι Άραβες μετέφρασαν και διέδωσαν στον αραβικό κόσμο τα συγγράμματα του Αρχύτα και του Ήρωνα, ενώ ταυτόχρονα επιδίδονταν και σε κατασκευές αυτόματων. Το πρώτο ανθρωποειδές Αυτόματο του μεσαίωνα ήταν ένας τυμπανιστής, η κατασκευή του οποίου αποδίδεται στον Αλ Γιαζάρι. Ένας Ισπανός μυστικιστής και ιεραπόστολος του μεσαίωνα, ο Ramon Llull, γνωστός για την συγγραφή του έργου *Ars Magna*, το οποίο περιείχε λογική και πολύπλοκες μηχανικές τεχνικές όπου επιχειρούσε να συνδέσει όλους τους τύπους γνώσης, φέρεται ότι μυήθηκε στις μηχανικές γνώσεις από τους Άραβες και αντίστοιχες κατασκευές τους⁹. Τον 15^ο αι. πολλά επιφανή πρόσωπα φέρονται να διέθεταν χάλκινα κεφάλια, θρυλικά Αυτόματα με ποικίλες μηχανικές ή και μαγικές γνώσεις που ήταν ταυτόχρονα πηγή και απόδειξη της σοφίας των κατόχων τους¹⁰. Το παλαιότερο σχέδιο ανθρωποειδούς Αυτόματου ανήκει στο Λεονάρντο Ντα Βίντσι. Άλλος καλλιτέχνης και εφευρέτης της πρώιμης νεότερης περιόδου, που επιδόθηκε στην κατασκευή καινοτόμων και εντυπωσιακών Αυτόματων, ήταν ο Γάλλος Jacques de Vaucanson¹¹.

Από τον 15^ο αι. και εξής υπήρχαν μηχανικά ρολόγια και άλλες μηχανές μέτρησης στις Ευρωπαϊκές πόλεις, ενώ άλλες αυτόματες κατασκευές χρησιμοποιούνταν και για την ψυχαγωγία των πλουσίων. Την ίδια εποχή κατασκευάστηκε ο πρώτος μηχανικός υπολογιστής από τον Blaise Pascal. Αργότερα ο Gottfried Wilhem Leibniz θα ανακαλύψει ένα βελτιωμένο υπολογιστή και θα οραματιστεί έναν καθολικό μηχανισμό συλλογισμού, που θα μπορεί να λαμβάνει αποφάσεις μηχανικά. Ο Leibniz θεωρείται ο πρώτος στη νεότερη ιστορία που θέλησε

⁷ Nils J. Nilsson, *The quest for artificial intelligence*, (Cambridge University Press, 2009).

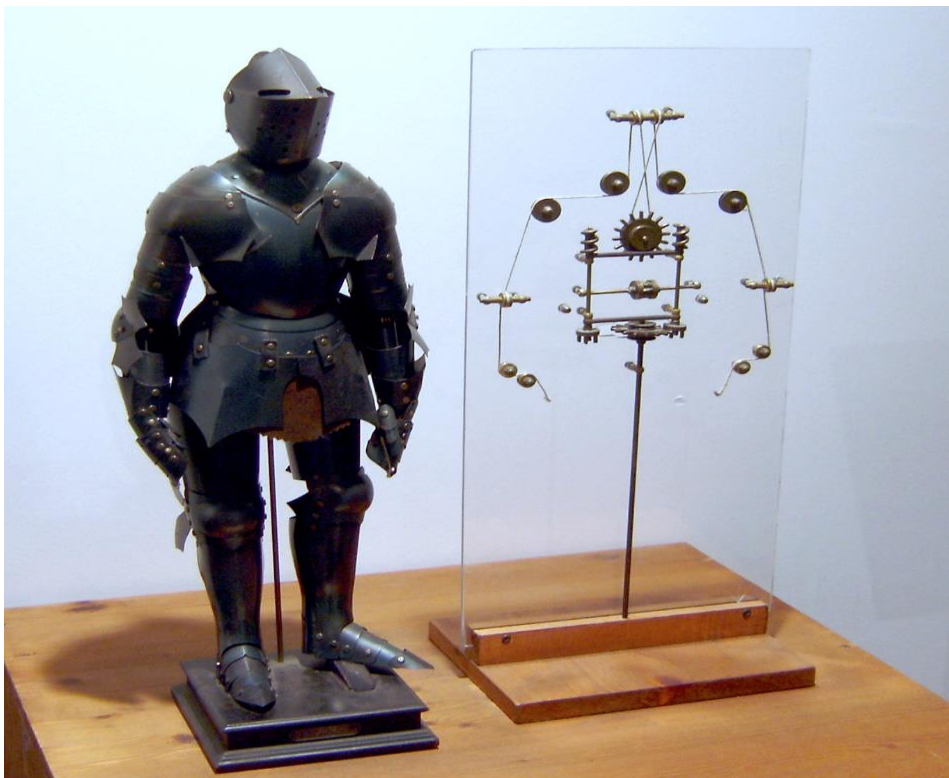
⁸ Judith Veronica Field, and Michael T. Wright, "Gears from the Byzantines: a portable sundial with calendrical gearing", *Annals of Science* 42.2 (1985): 87-138.

⁹ McCorduck, ό.π.

¹⁰ McCorduck, ό.π.

¹¹ Κυδωνάκη, ό.π., Nilsson, ό.π.

να αυτοματοποιήσει τη συλλογιστική, θεωρώντας ότι η συλλογιστική είναι το πιο εξαιρετικό και χρήσιμο ανθρώπινο ιδίωμα και ότι η υπαγωγή της στους κανόνες των μαθηματικών θα μπορούσε να επιτρέψει σε μηχανές να τη χειριστούν, απελευθερώνοντας τους «εξαιρετικούς άνδρες» από τη σκλαβιά των υπολογισμών¹². Μέχρι τον 18^ο αι. οι φιλόσοφοι και οι επιστήμονες προσπαθούσαν να καθορίσουν τους νόμους της σκέψης. Η επιστημονική βάση για τον διαχωρισμό της γνώσης σε κατηγορίες είχε τεθεί ήδη από τον Αριστοτέλη τον 5^ο αι. π.Χ., ο οποίος εισήγαγε τη συλλογιστική λογική, που θεωρείται το πρώτο επίσημο απαγωγικό συλλογιστικό σύστημα. Στο τέλος του 18^{ου} αι. ο Βρετανός Charles Stanhope δημιούργησε συσκευές για την επίλυση απλών προβλημάτων της λογικής και των πιθανοτήτων¹³.



Εικόνα 2. Μοντέλο ρομπότ βασισμένο στα σχέδια του Λεονάρντο Ντα Βίντσι (Πηγή: Wikipedia)

Τον 19^ο αι. κάνουν την εμφάνισή τους σε φιλολογικά κείμενα όντα με τεχνητή νοημοσύνη, όπως ο Φράνκεσταϊν της Mary Shelley. Την ίδια εποχή ξεκινάει να αναπτύσσεται και η επιστήμη της ψυχολογίας από τον Freud¹⁴. Αργότερα, σε μια

¹² Nilsson, ό.π.

¹³ McCorduck, ό.π.

¹⁴ McCorduck, ό.π.

προσπάθεια να γίνει η ψυχολογία περισσότερο επιστημονική, θα αποτελέσει χρήσιμο εργαλείο για τους ερευνητές της τεχνητής νοημοσύνης, ιδιαίτερα στην εφαρμογή της ενισχυτικής μάθησης. Σημαντικό ρόλο έπαιξαν οι απόψεις των συμπεριφοριστών και του Skinner, που πίστευαν ότι η συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα αντίδρασης σε κάποιο ερέθισμα, απορρίπτοντας την ιδέα της ανακάλυψης των εσωτερικών ψυχικών καταστάσεων που αποδίδονταν σε πιστεύω, σκοπούς, επιθυμίες και στόχους. Ιδιαίτερα σημαντικό, τόσο για την επιστήμη των υπολογιστών όσο και για άλλες εφευρέσεις, υπήρξε το βιβλίο του George Boole *An Investigation of the Laws of Thought on Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities*, στο οποίο παρουσίασε με μαθηματικούς τύπους διάφορες λογικές αρχές της ανθρώπινης συλλογιστικής¹⁵.

Ο 19^{ος} αι. είναι γεμάτος με πλήθος ανακαλύψεων, όπως η Διαφορική Μηχανή του Charles Babbage, που θεωρείται ο επινοητής των ψηφιακών υπολογιστών. Στην ίδια εποχή ανάγεται και η μέθοδος της Ada Lovelace για την Αναλυτική Μηχανή του Babbage, που θεωρείται από κάποιους το πρώτο πρόγραμμα υπολογιστή που γράφτηκε. Το σχόλιο της Ada Lovelace για την Αναλυτική Μηχανή, για την οποία έγραψε ότι «...δεν αξιώνεται να δημιουργήσει κάτι, αλλά μπορεί να κάνει οτιδήποτε γνωρίζουμε πως να την προστάξουμε να το εκτελέσει», θεωρείται ως μια πρόωγη ένσταση στην ιδέα της τεχνητής νοημοσύνης. Την ένσταση αυτή θα προσπαθήσει αργότερα να αντικρούσει ο Alan Turing στο άρθρο του "Computing Machinery and Intelligence" το 1950¹⁶. Παρά το γεγονός ότι η υποτιθέμενη αυτή αντίρρηση της Lady Lovelace αναπαράχθηκε και συζητήθηκε πολύ, η ίδια είχε αφήσει ανοιχτή την απάντηση, σχετικά με το αν μια τέτοια μηχανή όπως η Αναλυτική θα μπορούσε να σκεφτεί, έως ότου μια τέτοια μηχανή κατασκευαστεί και δοκιμαστεί¹⁷. Επίσης, η ίδια είχε οραματιστεί τη δυνατότητα των μηχανών να συνθέτουν περίτεχνα και επιστημονικά μουσικά κομμάτια οποιουδήποτε βαθμού πολυπλοκότητας και έκτασης¹⁸.

¹⁵ Nilsson, ό.π., 39, McCorduck, ό.π.

¹⁶ Nilsson, ό.π.

¹⁷ McCorduck, ό.π.

¹⁸ Myounghoon Jeon, et al., "From rituals to magic: Interactive art and HCI of the past, present, and future", *International Journal of Human-Computer Studies* 131 (2019): 108-119.

Ο Alan Turing, ένας ιδιοφυής Άγγλος μαθηματικός, ήταν εκείνος που πρότεινε το 1937 την ιδέα μιας λογικής υπολογιστικής μηχανής, αυτή που σήμερα ονομάζεται «μηχανή Turing». Αυτή η καθολική μηχανή θα μπορούσε να εκτελέσει οποιαδήποτε υπολογιστική λειτουργία, χρησιμοποιώντας μια λογική μονάδα γενικού σκοπού και να αποτελέσει το πρότυπο για οποιαδήποτε άλλη μηχανή. Την ίδια εποχή με τον Turing κι άλλοι επιστήμονες, που εργάζονταν ανεξάρτητα στη Γερμανία, τη Μεγάλη Βρετανία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, μελετούσαν την ιδέα της κατασκευής υπολογιστικών συσκευών που θα εκτελούσαν εντολές δοσμένες από προγράμματα¹⁹. Ο Konrad Zuse, ένας από τους πρώτους που δημιούργησε λειτουργικό υπολογιστή το 1938 στο Βερολίνο, αντιλήφθηκε ότι αυτή η τεχνολογία θα μπορούσε να καταλήξει σε έναν τεχνητό εγκέφαλο²⁰. Αφού είχαν δημιουργηθεί οι πρώτοι υπολογιστές, ο Turing υποστήριξε τη σπουδαιότητα της καθολικής μηχανής, η οποία θα μπορούσε να κάνει οτιδήποτε με βάση τον προγραμματισμό της. Ανάμεσα στα πράγματα που ο Turing πίστευε ότι θα μπορούσαν να γίνουν από τους υπολογιστές ήταν η μίμηση της ανθρώπινης νοημοσύνης, γι' αυτό θεωρείται ως ο «πατέρας» της τεχνητής νοημοσύνης. Όπως αναφέρει ο βιογράφος του, είχε καταλήξει στο συμπέρασμα ότι τα προγράμματα θα μπορούσαν να είναι πολύ πιο περίπλοκα από απλές οδηγίες, ώστε να μπορούν να συμπεριλάβουν ό,τι και ο ανθρώπινος εγκέφαλος, ακόμα και δημιουργικότητα και πρωτοτυπία. Οι μηχανές με μεγάλη πολυπλοκότητα θα είχαν τη δυνατότητα να εξελίσσουν τη συμπεριφορά τους χωρίς να έχουν προγραμματιστεί αναλυτικά. Οι σκέψεις του σχετικά με τη δυνατότητα μηχανοποίησης όλης της ανθρώπινης νοημοσύνης δημοσιεύτηκαν στο άρθρο που προαναφέρθηκε, το οποίο είναι διάσημο μέχρι σήμερα για πολλούς λόγους. Ένας από αυτούς είναι η πρόταση για την καθιέρωση μιας δοκιμασίας, γνωστής ως “the Turing test”, μέσω της οποίας θα μπορούσε να αποδειχθεί η ικανότητα σκέψης μιας μηχανής²¹. Αυτή η δοκιμασία λαμβάνεται υπόψη μέχρι σήμερα στην επιστήμη των υπολογιστών. Ένας άλλος λόγος, για τον οποίο το άρθρο του Turing παραμένει σημαντικό και επίκαιρο, είναι

¹⁹ Nilsson, ό.π.

²⁰ McCorduck, ό.π.

²¹ Για να απαντηθεί το ερώτημα αν μπορούν οι μηχανές να σκέφτονται πρότεινε το παιχνίδι της μίμησης (imitation game). Σύμφωνα με αυτό, αν μια μηχανή θα μπορούσε να ξεγελάσει έναν άνθρωπο ώστε να σκεφτεί ότι ο υπολογιστής είναι άνθρωπος, τότε μπορεί να υποστηριχθεί ότι ο υπολογιστής μπορεί να σκεφτεί. Nilsson, ό.π., 61.

γιατί προσπαθούσε να διαχειριστεί κάποιες από τις υποτιθέμενες αντιρρήσεις, που θα μπορούσαν να τεθούν από τους ανθρώπους αναφορικά με τη δημιουργία έξυπνων υπολογιστών. Μία από αυτές τις αντιρρήσεις υπέθετε ότι οι συνέπειες των σκεπτόμενων μηχανών θα μπορούσε να είναι τρομαχτικές²². Πολλές από αυτές τις αντιρρήσεις συζητούνται μέχρι σήμερα, ενώ αποτελούν πεδίο έρευνας που αφορά ιδιαίτερα την Ηθική της Τεχνητής Νοημοσύνης (AI Ethics).

Στο μεταξύ η λέξη ρομπότ είχε ήδη μπει στο αγγλικό λεξιλόγιο από το 1923, προερχόμενη από το τσέχικο θεατρικό έργο του Karel Capek, *Rossum's Universal Robots*²³, όπου σατιρίζονταν η εξάρτηση της κοινωνίας από τους μηχανικούς εργάτες, οι οποίοι τελικά επαναστατούσαν και εξόντωναν τους δημιουργούς τους. Κάποια χρόνια αργότερα, ένας άλλος συγγραφέας έργων επιστημονικής φαντασίας, ο Isaac Asimov, θα αυξήσει τη δημοτικότητα των έξυπνων-σκεπτόμενων ρομπότ και θα προτείνει τους τρεις κανόνες της ρομποτικής στο έργο του *I, Robot* (1950)²⁴.

Παράλληλα με την επιστήμη των υπολογιστών αναπτύσσονταν και η νευροεπιστήμη. Το 1943 οι Warren McCulloch (νευροφυσιολόγος) και Walter Pitts (θεωρητικός της Λογικής) πρότειναν το πρώτο υπολογιστικό μοντέλο ενός νευρώνα. Ισχυριζόμενοι ότι στην ουσία ο νευρώνας αποτελεί μια «λογική μονάδα», έδειξαν ότι τα απλά μοντέλα που πρότειναν μπορούσαν να εκτελέσουν όλες τις πιθανές υπολογιστικές λειτουργίες²⁵.

Τον όρο τεχνητή νοημοσύνη (artificial intelligence) τον χρησιμοποίησε για πρώτη φορά επίσημα ο καθηγητής του Dartmouth College John McCarthy, το 1956. Τότε ο McCarthy υπέβαλλε πρόταση για χρηματοδότηση στο ίδρυμα Rockefeller να μελετήσουν για ένα καλοκαίρι μαζί με άλλους επιστήμονες την τεχνητή νοημοσύνη, με την υπόθεση ότι κάθε άποψη της μάθησης ή κάθε χαρακτηριστικό της νοημοσύνης μπορεί να περιγραφεί με τόση ακρίβεια, που είναι δυνατό να δημιουργηθεί μια μηχανή για να το προσομοιώσει. Ανάμεσα στους άλλους επιστήμονες ήταν οι Marvin

²² Nilsson, ό.π., 63.

²³ Η λέξη ρομπότ προέρχεται από την πολωνική *robota*, η οποία σημαίνει καταναγκαστική εργασία, αγγαρεία. Nilsson, ό.π., 24.

²⁴ Σύμφωνα με αυτούς, α) το ρομπότ δε θα κάνει κακό σε άνθρωπο, ούτε θα επιτρέπει να βλαφτεί ανθρώπινο όν, β) θα πρέπει να υπακούει στις διαταγές των ανθρώπων, αρκεί να μην έρχονται σε αντίθεση με τον πρώτο νόμο, και γ) οφείλει να προστατεύει την ύπαρξή του, εφόσον αυτό δεν είναι αντίθετο με τον πρώτο και δεύτερο νόμο. McCorduck, ό.π., Nilsson, ό.π., 25.

²⁵ Nilsson, ό.π., 35.

Minsky (μαθηματικός, νευρολόγος), Nathaniel Rochester (διευθυντής ερευνών της IBM), Claude Shannon (μαθηματικός των εργαστηρίων Bell), Allen Newell, Herbert Simon. Σύντομα η έρευνά τους μαθεύτηκε σε ευρύτερους κύκλους, ενώ δημιούργησαν και τα πρώτα λειτουργικά προγράμματα AI. Σε κάποιους στην IBM φάνηκε τόσο τρομαχτική η ιδέα των έξυπνων μηχανών που νόμιζαν ότι θα λειτουργούσε αποτρεπτικά για τους αγοραστές υπολογιστών. Την ίδια εποχή ο πρόεδρος των ΗΠΑ εγκρίνει τη χρηματοδότηση της έρευνας για τα προηγμένα ερευνητικά έργα του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας (ARPA ή DARPA). Μέσα στα επόμενα χρόνια υπάρχουν μεγάλες εξελίξεις τόσο στην ανάπτυξη του προγραμματισμού όσο και της τεχνολογίας. Δημιουργήθηκαν γλώσσες προγραμματισμού και προγράμματα, ο Weizenbaum δημιούργησε το ELIZA, το πρώτο πρόγραμμα AI Natural Language Processing που μιμούνταν το ρόλο ψυχοθεραπευτή, ξεκίνησε το ARPANET, ο προάγγελος του σημερινού ίντερνετ, ως πρόγραμμα του DARPA, δημιουργήθηκε από τον Harold Cohen το AARON, το πρώτο αυτόνομο πρόγραμμα δημιουργίας τέχνης, δημιουργήθηκαν βοηθητικά προγράμματα για ιατρική διάγνωση και θεραπεία²⁶.

Το 1981 άρχισε η εμπορευματοποίηση της AI και η Ιαπωνία ξεκίνησε ένα φιλόδοξο ερευνητικό πρόγραμμα AI. Παρά το γεγονός ότι υπήρχαν πολλά εντυπωσιακά επιτεύγματα, στο τέλος της δεκαετίας του '80 αρχές της δεκαετίας του '90 υπήρξε μια περίοδος που είναι γνωστή ως AI Winter. Εξαιτίας του ότι υπήρχε μειωμένο ενδιαφέρον αλλά και έντονη κριτική για το αντικείμενο, οι ερευνητές δεν ήταν εύκολο να εξασφαλίσουν χρηματοδότηση για να συνεχίσουν το έργο τους. Από το 1958 υπήρξε σχεδόν συνεχής χρηματοδότηση από το DARPA και ειδικότερα για τον τομέα της μηχανικής όρασης (Computer Vision). Υπήρχαν, όμως, και διαστήματα στο μεταξύ που το ενδιαφέρον ήταν μειωμένο ή υπήρχε απογοήτευση για τις δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης, με συνέπεια την ανύπαρκτη χρηματοδότηση και τη διακοπή της έρευνας. Αυτές οι περίοδοι ονομάστηκαν AI Winter²⁷.

Το ενδιαφέρον ανανεώθηκε και πάλι όταν ο υπολογιστής της IBM Deep Blue νίκησε τον παγκόσμιο πρωταθλητή του σκάκι Garry Kasparov. Ειδικότερα, μετά το 2001, όταν ο Berners-Lee άρχισε να εργάζεται στο Semantic Web, μια διεθνή

²⁶ McCorduck, ό.π.

²⁷ McCorduck, ό.π., Nilsson, ό.π.

προσπάθεια ανταλλαγής εμπορικών, επιστημονικών και πολιτιστικών δεδομένων με τη χρήση μεθόδων AI, άρχισε να δημιουργείται μια έκρηξη στη δημιουργία, εκμάθηση και χρήση προγραμμάτων AI. Από το 2003 το DARPA ξεκίνησε τη χρηματοδότηση νέων μεγάλων προγραμμάτων AI²⁸.

Σήμερα θα μπορούσαμε να πούμε ότι σχεδόν όλοι οι άνθρωποι έρχονται σε επαφή ή αλληλεπίδραση με προγράμματα και λειτουργίες που βασίζονται σε AI, είτε με τη χρήση των έξυπνων κινητών τηλεφώνων, είτε με τη χρήση έξυπνων οικιακών συσκευών, είτε απλά μέσω της αλληλεπίδρασής τους με το διαδίκτυο, όπου οι περισσότερες, αν όχι όλες, δημοφιλείς ιστοσελίδες χρησιμοποιούν με διάφορους τρόπους τεχνολογίες που βασίζονται σε AI. Για παράδειγμα ο αλγόριθμος αναζήτησης της Google, οι προτάσεις αγορών με βάση προηγούμενα ενδιαφέροντα, οι προτάσεις θέασης βίντεο, ταινιών ή ακρόασης μουσικής από YouTube, Spotify, Netflix, οι εφαρμογές επιλογής (recruiting) κατάλληλων υποψηφίων για θέσεις εργασίας, η αναγνώριση του προσώπου, της φωνής και άλλων βιομετρικών δεδομένων από τις ηλεκτρονικές συσκευές ή τις ιστοσελίδες κοινωνικής δικτύωσης, τα αυτόματα τηλεφωνικά κέντρα δημόσιων ή ιδιωτικών υπηρεσιών, εφαρμογές ιατρικής διάγνωσης και θεραπείας, καθώς και αναρίθμητες άλλες εφαρμογές βασίζονται σε τεχνολογίες AI. Ανάμεσα σε αυτές τις εφαρμογές, πολλές είναι και εκείνες που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τέχνης, για τη δημιουργία ή βελτιστοποίηση του καλλιτεχνικού αποτελέσματος σε φωτογραφίες, βίντεο, μουσική, ή της εμπειρίας των παικτών στην αλληλεπίδρασή τους με ηλεκτρονικά παιχνίδια.

Όπως είναι φανερό, η χρήση του Παγκόσμιου Ιστού και ειδικότερα η φρενήρης χρήση των κοινωνικών δικτύων από δισεκατομμύρια χρήστες, με την ανταλλαγή εκατομμυρίων αρχείων διαφόρων τύπων ανά δευτερόλεπτο, έχει συμβάλλει στην ανάπτυξη των δυνατοτήτων των μοντέλων τεχνητής νοημοσύνης, αφού υπάρχει πληθώρα δεδομένων, που προσφέρονται δωρεάν και αυτοβούλως, πάνω στα οποία μπορούν να εκπαιδευτούν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Αυτό έχει συμβάλλει στην περαιτέρω εμπορευματοποίηση της AI. Πολλές, μάλιστα, εταιρείες διαφημίζουν τη χρήση AI από το προϊόν τους ως συγκριτικό πλεονέκτημα που το καθιστά πιο αξιόπιστο και ακριβές από άλλα αντίστοιχα. Υπάρχουν, ωστόσο, και

²⁸ McCorduck, ό.π., Nilsson, ό.π.

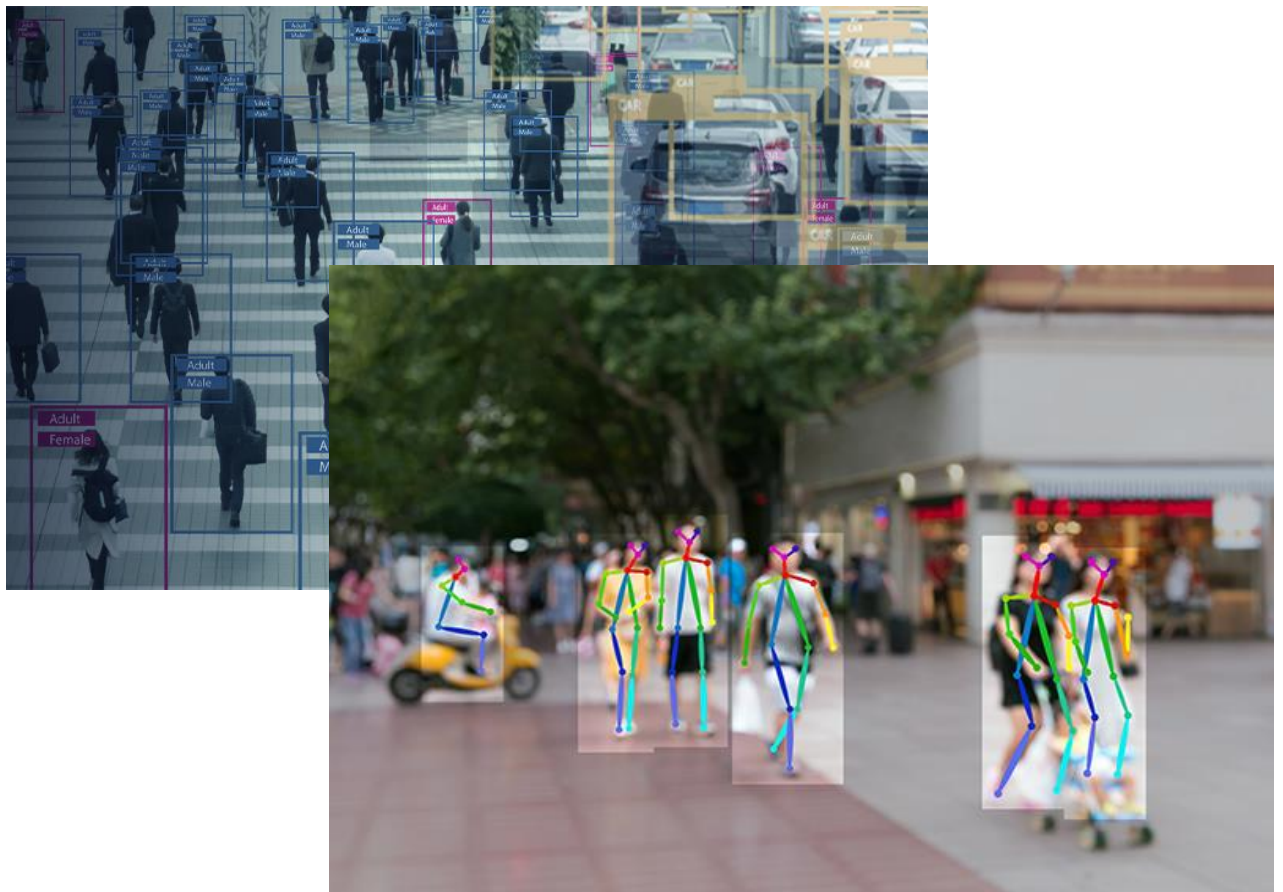
πολλές εφαρμογές που έχουν ενσωματωμένη τεχνολογία AI και παράλληλα συνεχίζουν να εκπαιδεύονται και να βελτιώνονται με τα δεδομένα που εισάγει ο χρήστης, χωρίς ο ίδιος να το γνωρίζει, όπως για παράδειγμα η αυτόματη διόρθωση των κειμένων πληκτρολόγησης στα λειτουργικά συστήματα κινητών συσκευών.

Η τεράστια εξάπλωση της χρήσης AI στη σύγχρονη καθημερινότητα είναι γεγονός που ήδη επηρεάζει τη ζωή των ανθρώπων, ενώ στο μέλλον προβλέπεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο. Για το λόγο αυτό εγείρονται από πολλούς αντιρρήσεις αναφορικά με την ηθική χρήση της τεχνητής νοημοσύνης. Τίθεται κιόλας το ερώτημα αν η χρήση AI είναι κάτι που προκαλεί τη δημοκρατία, δεδομένου ότι ήδη χρησιμοποιείται για τη λήψη αποφάσεων που επηρεάζουν άμεσα τη ζωή και την ευημερία των ανθρώπων, ή και για την καταστρατήγηση των θεμελιωδών ατομικών ελευθεριών και δικαιωμάτων. Ένα σκάνδαλο που προκλήθηκε από τη συνεργασία Facebook - Cambridge Analytica έδειξε πως γίνεται συλλογή δεδομένων χωρίς τη συγκατάθεση των χρηστών και η χρήση AI είχε στόχο την επιρροή των εκλογικών αποτελεσμάτων²⁹.

Πολύ πρόσφατα, η επικεφαλής του ΟΗΕ για τα ανθρώπινα δικαιώματα Michelle Bachelet, δήλωσε ότι απαιτείται επείγουσα δράση, καθώς μπορεί να χρειαστεί χρόνος για την αξιολόγηση και την αντιμετώπιση των κινδύνων, που ενέχει αυτή η τεχνολογία για τα ανθρώπινα δικαιώματα. Τόνισε δε, ότι όσο υψηλότερος είναι ο κίνδυνος για τα ανθρώπινα δικαιώματα, τόσο πιο αυστηρές θα πρέπει να είναι οι νομικές απαιτήσεις για τη χρήση τεχνολογίας AI, ενώ τα κράτη θα πρέπει να θέσουν μορατόριουμ στην πώληση και χρήση συστημάτων AI, έως ότου υπάρξουν επαρκείς διασφαλίσεις. Ένας από τους κυριότερους λόγους, από όπου πηγάζει αυτή η ανησυχία, είναι η άνευ προηγουμένου χρήση τεχνολογιών παρακολούθησης, τόσο από δημόσιους όσο και από ιδιωτικούς παράγοντες παγκοσμίως, και το γεγονός ότι επηρεάζεται το δικαίωμα των ανθρώπων στην ιδιωτική ζωή, το δικαίωμα στην υγεία, την εκπαίδευση, την ελευθερία κινήσεων, την ελευθερία του ειρηνικού συνέρχεσθαι, του συνεταιρίζεσθαι και την ελευθερία της έκφρασης. Επίσης, επεσήμανε τον κίνδυνο που προκύπτει από την έλλειψη επισταμένης έρευνας, τη χρήση δεδομένων

²⁹ Caroline Serbanescu, "Why Does Artificial Intelligence Challenge Democracy? A Critical Analysis of the Nature of the Challenges Posed by AI-Enabled Manipulation", *Retskraft – Copenhagen Journal of Legal Studies*, Vol. 5, Number 1, Spring 2021.

που περιέχουν διακρίσεις, τη χρήση βιομετρικών δεδομένων, καθώς και ότι θα πρέπει να υπάρχει μεγαλύτερη διαφάνεια όσον αφορά στην ανάπτυξη και χρήση ΑΙ. Όπως δήλωσε η ίδια, «Δεν έχουμε την πολυτέλεια να συνεχίσουμε να προσπαθούμε να προφτάσουμε την τεχνητή νοημοσύνη – επιτρέποντας τη χρήση της περιορισμένα ή χωρίς όρια ή επίβλεψη και αντιμετωπίζοντας τις σχεδόν αναπόφευκτες συνέπειες στα ανθρώπινα δικαιώματα εκ των υστέρων. Η δύναμη της τεχνητής νοημοσύνης να εξυπηρετεί τους ανθρώπους είναι αδιαμφισβήτητη, αλλά το ίδιο και η ικανότητα να τροφοδοτεί τις παραβιάσεις των ανθρωπίνων δικαιωμάτων σε τεράστια κλίμακα, χωρίς ουσιαστικά καμία ορατότητα. Χρειάζεται δράση τώρα για να τεθούν προστατευτικά κιγκλιδώματα για τα ανθρώπινα δικαιώματα στη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης, για το καλό όλων μας»³⁰.



Εικόνα 3. Από ιστοσελίδα εταιρείας που εμπορεύεται κάμερες με ενσωματωμένη χρήση ΑΙ ανάλυσης για παρακολούθηση χώρων (Πηγή: i-pro.com)

³⁰ Michelle Bachelet, “Artificial intelligence risks to privacy demand urgent action”, *United Nations Human Rights*, <https://www.ohchr.org/EN/NewsEvents/Pages/DisplayNews.aspx?NewsID=27469&LangID=E>.

B. AI Artists και ενδεικτικά σύγχρονα έργα που δημιουργήθηκαν με χρήση τεχνητής νοημοσύνης

Οι εξελίξεις στα βαθιά νευρωνικά δίκτυα την τελευταία δεκαετία δημιούργησε μια επανάσταση στον προγραμματισμό των υπολογιστών και στην ανάπτυξη αλγορίθμων, αφού φαίνεται ότι οι μηχανές μπορούν να εκπαιδευτούν και να μάθουν από τα δεδομένα. Μπορεί ακόμη να μην είναι σαφές το πως και τι ακριβώς μαθαίνουν, όμως η εφαρμογή των τεχνητών νευρωνικών δικτύων στην καλλιτεχνική δημιουργία και έκφραση είναι εντυπωσιακή και παράλληλα διδακτική.

Οι υπολογιστές χρησιμοποιήθηκαν για αισθητικούς λόγους από την αρχή σχεδόν της δημιουργίας τους. Οι καλλιτέχνες αξιοποίησαν τη δυνατότητά τους να ακολουθούν μέσω αλγορίθμων συγκεκριμένες εντολές, που καθόριζαν μικρολεπτομέρειες και χειρίζονταν μεγάλες ποσότητες δεδομένων. Συνήθως τα εικαστικά αποτελέσματα ήταν αφηρημένες εικόνες-δημιουργίες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ένας υπολογιστής δεν μπορεί να έχει το ίδιο εμπειρικό περιβάλλον ούτε την παρατηρητικότητα που διαθέτει ο άνθρωπος. Οι καλλιτεχνικές εφαρμογές των πρώτων υπολογιστών σχετίζονταν με εκπαιδευτικές εφαρμογές. Αργότερα, με την επανάσταση των προσωπικών υπολογιστών, τα γραφικά ήταν το δυνατότερο σημείο πώλησης και πολλοί έμαθαν προγραμματισμό προσπαθώντας να φτιάξουν όμορφα και διασκεδαστικά γραφικά. Στις μέρες μας, με την πληθώρα των διαθέσιμων δεδομένων από την πραγματική ζωή, οι υπολογιστές έχουν πρόσβαση σε μια τεράστια βιβλιοθήκη αρχείων που σχετίζονται με την ανθρώπινη εμπειρία, στα οποία μπορούν να εκπαιδευτούν προκειμένου να τα χρησιμοποιήσουν για τη δημιουργία καλλιτεχνικής έκφρασης. Από την άλλη, είναι ενδιαφέρουσα η μελέτη του τρόπου με τον οποίο τα νευρωνικά δίκτυα μαθαίνουν και δημιουργούν³¹.

Εξαιτίας του ότι είναι δύσκολο να δοθεί ένας επακριβής ορισμός για το τι είναι τέχνη, αφού τα όρια της τέχνης και το τι μετράει ως τέχνη αμφισβητήθηκε συστηματικά με την ανάπτυξη της μοντέρνας τέχνης κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, είναι ίσως δύσκολο να ορίσουμε και το τι είναι AI τέχνη ή καλλιτέχνης. Επειδή, όμως, τα πειράματα στη χρήση της AI στην τέχνη ξεκίνησαν περίπου ταυτόχρονα με την

³¹ Christoph Best, "Ars gratia retium: Understanding How Artificial Neural Networks Learn To Emulate Art", *Algorithmic and Aesthetic Literacy: Emerging Transdisciplinary Explorations for the Digital Age* (2021): 171 κ.ε..

εποχή που η μοντέρνα τέχνη έμπαινε στη δεύτερη επαναστατική περίοδο, στα τέλη της δεκαετίας του '50, θα μπορούσαμε να υποθέσουμε ότι όλες οι μέθοδοι που αναπτύχθηκαν ως τέχνες των υπολογιστών από τη δεκαετία του '50 (όπως αλγοριθμική τέχνη, γενετική τέχνη, μετά-εννοιολογική τέχνη, systems art, process art, evolutionary art, information art, fractal art, cybernetic art, electronic art, new media art, post-digital art) αποτελούν ισότιμα παραδείγματα με αυτό που σήμερα αποκαλείται τέχνη AI³².

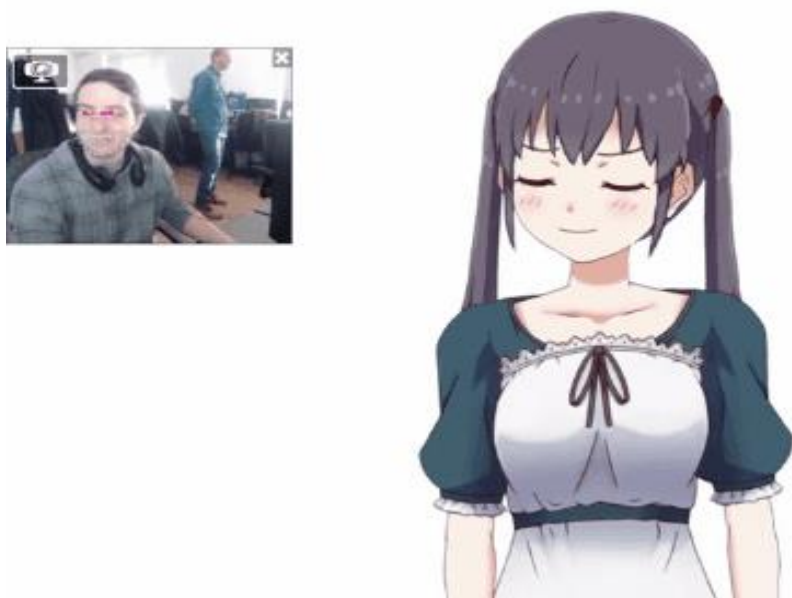
Ένας επιπλέον λόγος που μπορεί να υποστηρίξει την παραπάνω υπόθεση είναι το γεγονός ότι η τεχνητή νοημοσύνη είναι ένα πάρα πολύ ευρύ πεδίο, το οποίο όμως αναπτύχθηκε παράλληλα με την επιστήμη των υπολογιστών. Επίσης, πολλές από τις εφαρμογές της ενσωματώθηκαν σε υπολογιστικά προγράμματα και μάλιστα στην πλειοψηφία εκείνων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ψηφιακής τέχνης. Εξάλλου, εταιρείες όπως η Autodesk και η Adobe, που καθιερώθηκαν στην παγκόσμια αγορά με λογισμικά σχεδίασης και επεξεργασίας δισδιάστατων και τρισδιάστατων γραφικών, χρηματοδότησαν ευρέως την έρευνα AI σε συνεργασία με πανεπιστήμια ή εταιρείες υλισμικών (hardware) υπολογιστών με σκοπό να ενσωματώσουν την τεχνολογία στα προϊόντα τους³³. Φαίνεται, λοιπόν, ότι είναι μάλλον δύσκολο να διακριθεί επακριβώς η χρήση AI σε ένα έργο ψηφιακής τέχνης, αφού ο μέσος χρήστης δεν είναι σε θέση να γνωρίζει την τεχνολογία που υπάρχει πίσω από κάθε λειτουργία των λογισμικών.

Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια και ειδικότερα μετά την έκρηξη του ενδιαφέροντος για την τεχνολογία AI και τις δυνατότητές της, έχει κάνει την εμφάνισή του και ένα αντίστοιχο ρεύμα στην τέχνη. Οι καλλιτέχνες που αποκαλούνται AI artists, δεν χρησιμοποιούν απλώς λογισμικά που βασίζονται σε AI, αλλά χρησιμοποιούν με διάφορους τρόπους νευρωνικά δίκτυα, τα οποία εκπαιδεύουν με κατάλληλα

³² Lev Manovich, "Defining AI arts: Three proposals", *AI and dialog of cultures" exhibition catalog*, (Saint-Petersburg: Hermitage Museum 2019).

³³ Αναφέρουμε για παράδειγμα το εργαλείο Puppetron, που αναπτύχθηκε από την Adobe Research σε συνεργασία με επιστήμονες από το τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών του Τσέχικου Τεχνολογικού Πανεπιστημίου στην Πράγα με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό της Adobe Character Animator. Faculty of Electrical Engineering, "The unique Puppetron graphic tool was programmed by scientists at the Faculty of Electrical Engineering", Czech Technical University in Prague, <https://fel.cvut.cz/en/aktuality/2017/puppetron>. Meredith Alexander Kunz, "Puppetron: Your Face as a Stylized Work of Art", *Adobe Research*, March 26, 2018, <https://research.adobe.com/news/puppetron-your-face-as-a-stylized-work-of-art/>.

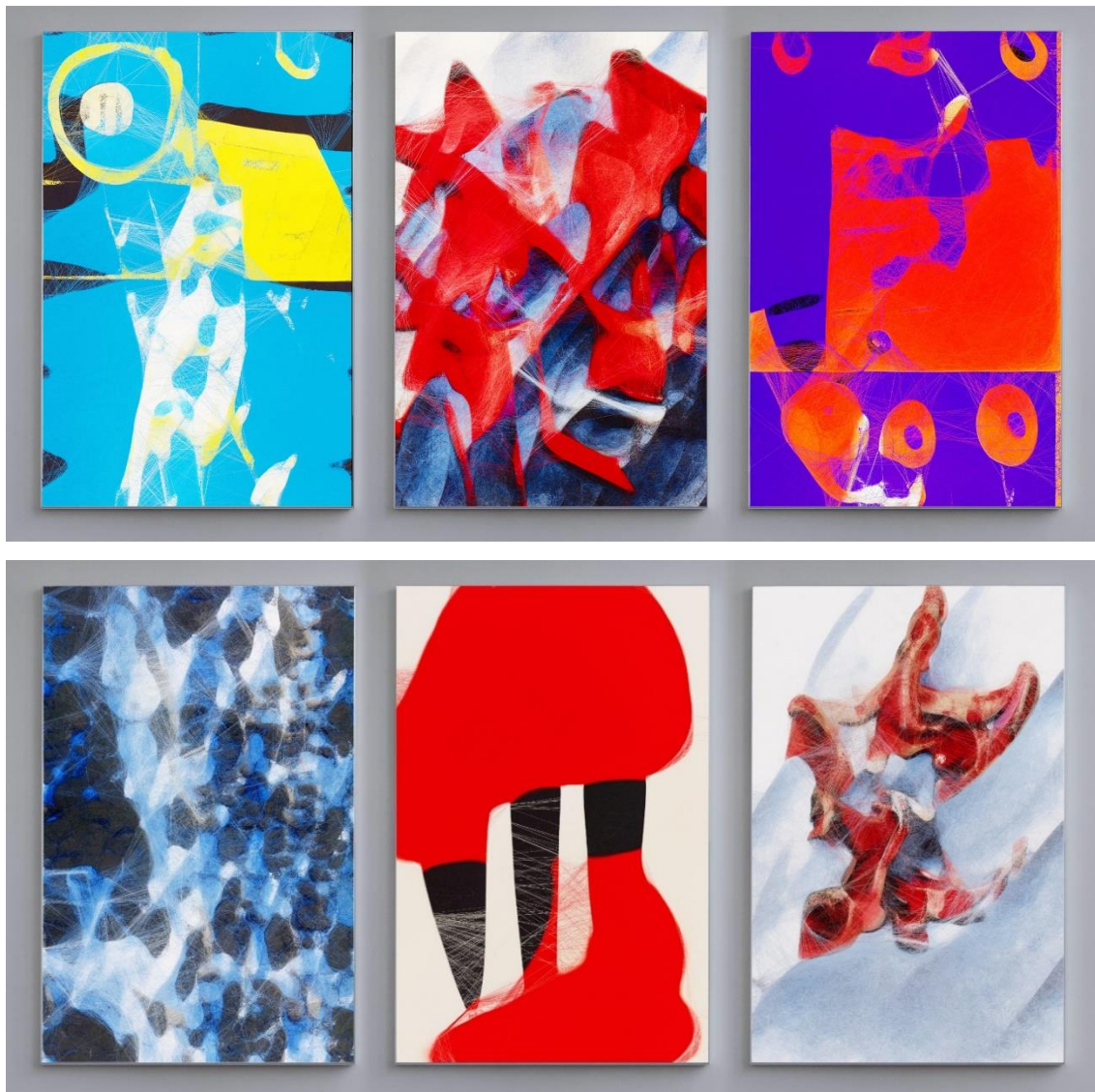
δεδομένα της επιλογής τους, προκειμένου να παράγουν έργα με τα επιδιωκόμενα επιθυμητά αποτελέσματα. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε δύο κατηγορίες, τους καλλιτέχνες που δημιουργούν οποιαδήποτε μορφή ψηφιακής τέχνης και χρησιμοποιούν τεχνολογία AI ως υποστηρικτικό εργαλείο μέσω των λογισμικών, και τους καλλιτέχνες που οι ίδιοι χρησιμοποιούν ή αναπτύσσουν τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, φροντίζοντας παράλληλα για τη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων που τροφοδοτούν το δίκτυο. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας, θα αναφερθούν παραδείγματα καλλιτεχνών και έργων από τη δεύτερη κατηγορία. Επιπλέον, θα παρουσιάσουμε καλλιτέχνες που το έργο τους είναι εμπνευσμένο από την ευρεία χρήση της τεχνητής νοημοσύνης στη σύγχρονη εποχή.



Εικόνα 4. Εμφύχωση χαρακτήρα κινουμένου σχεδίου με χρήση τεχνολογίας AI (Πηγή εικόνας: medium.com)

Ένας από τους πιο γνωστούς καλλιτέχνες στο αντικείμενο της τεχνητής νοημοσύνης είναι ο Refik Anadol, καλλιτέχνης νέων μέσων με καταγωγή από την Τουρκία που ζει και εργάζεται στο Λος Άντζελες. Είναι λέκτορας στο Τμήμα Σχεδίου και Τεχνών Νέων Μέσων του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (UCLA, Department of Design Media Arts). Τα έργα του έχουν αποσπάσει πολλά βραβεία και έχουν παρουσιαστεί σε κάποιους από τους σημαντικότερους χώρους τέχνης διεθνώς. Πρωτοπόρος στο αντικείμενο, ήταν ο πρώτος που χρησιμοποίησε τεχνητή νοημοσύνη σε δημόσιο εμβυθιστικό έργο. Έχει συνεργαστεί με ομάδες από Google, Microsoft, Nvidia, Intel, IBM, Panasonic, JPL/NASA, Siemens, Epson, MIT, Harvard, UCLA,

Stanford και UCSF προκειμένου να ενσωματώσει την τελευταία λέξη της επιστήμης, έρευνας και τεχνολογίας στο έργο του. Σύμφωνα με τον ίδιο, το σύνολο του έργου του εξετάζει τις προκλήσεις και τις δυνατότητες που έχει επιβάλει στην ανθρωπότητα η πανταχού παρούσα επιστήμη της πληροφορικής και τι σημαίνει να είσαι άνθρωπος στην εποχή της τεχνητής νοημοσύνης. Εξερευνά πώς η αντίληψη και η εμπειρία του χρόνου και του χώρου αλλάζουν ριζικά τώρα που οι μηχανές κυριαρχούν στην καθημερινότητά μας. Ο Anadol ενδιαφέρεται για τους τρόπους με τους οποίους η ψηφιακή εποχή και η τεχνητή νοημοσύνη επιτρέπουν μια νέα αισθητική για τη δημιουργία εμπλουτισμένων περιβαλλόντων που προσφέρουν μια δυναμική αντίληψη του χώρου³⁴. Ένα από τα πιο γνωστά έργα του, το οποίο είναι σε εξέλιξη

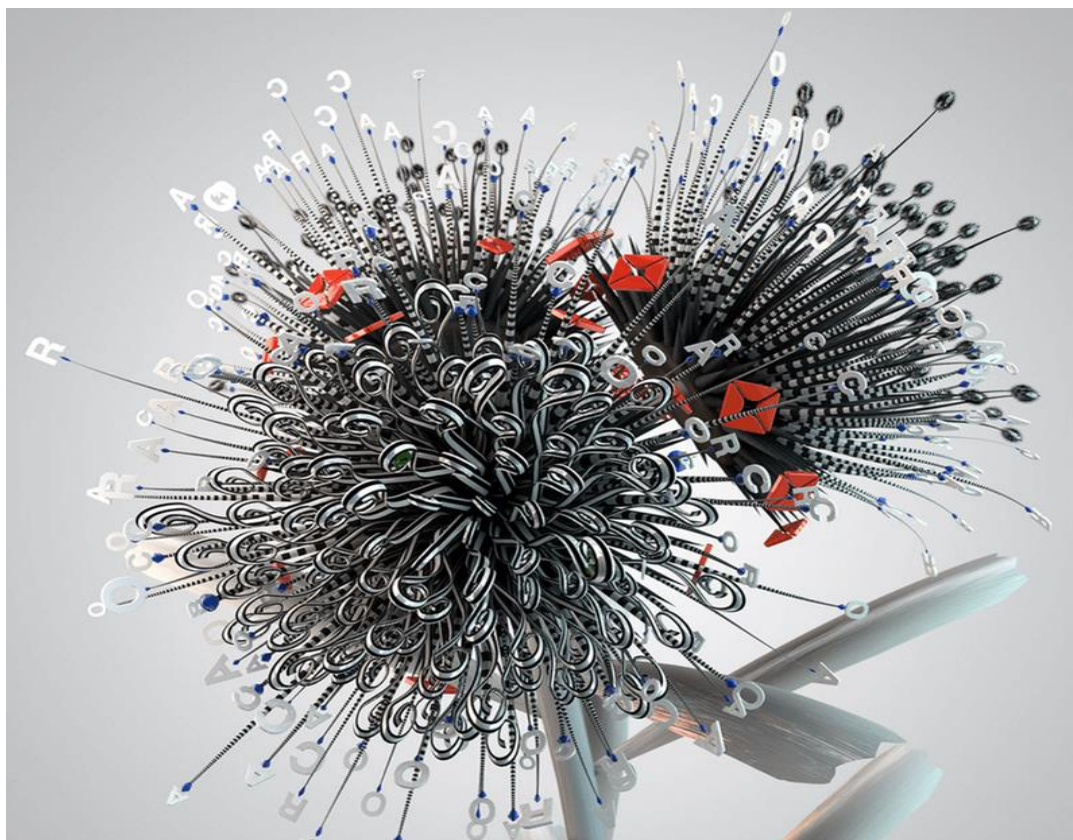


Εικόνα 5 α-β. Τρίπτυχο AI Paintings, από την πρόσφατη έκθεση στο MoMA (Πηγή εικόνων: refikanadol.com).

³⁴ Refik Anadol, <https://refikanadol.com/about>.

από το 2016 και έχει παρουσιαστεί σε πολλές διαφορετικές εκθέσεις, είναι το Machine Hallucinations. Στο έργο χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός νευρωνικών δικτύων, ενώ κάθε φορά γίνεται επεξεργασία μεγάλων βάσεων δεδομένων τις οποίες έχει επιμεληθεί το στούντιο του καλλιτέχνη.

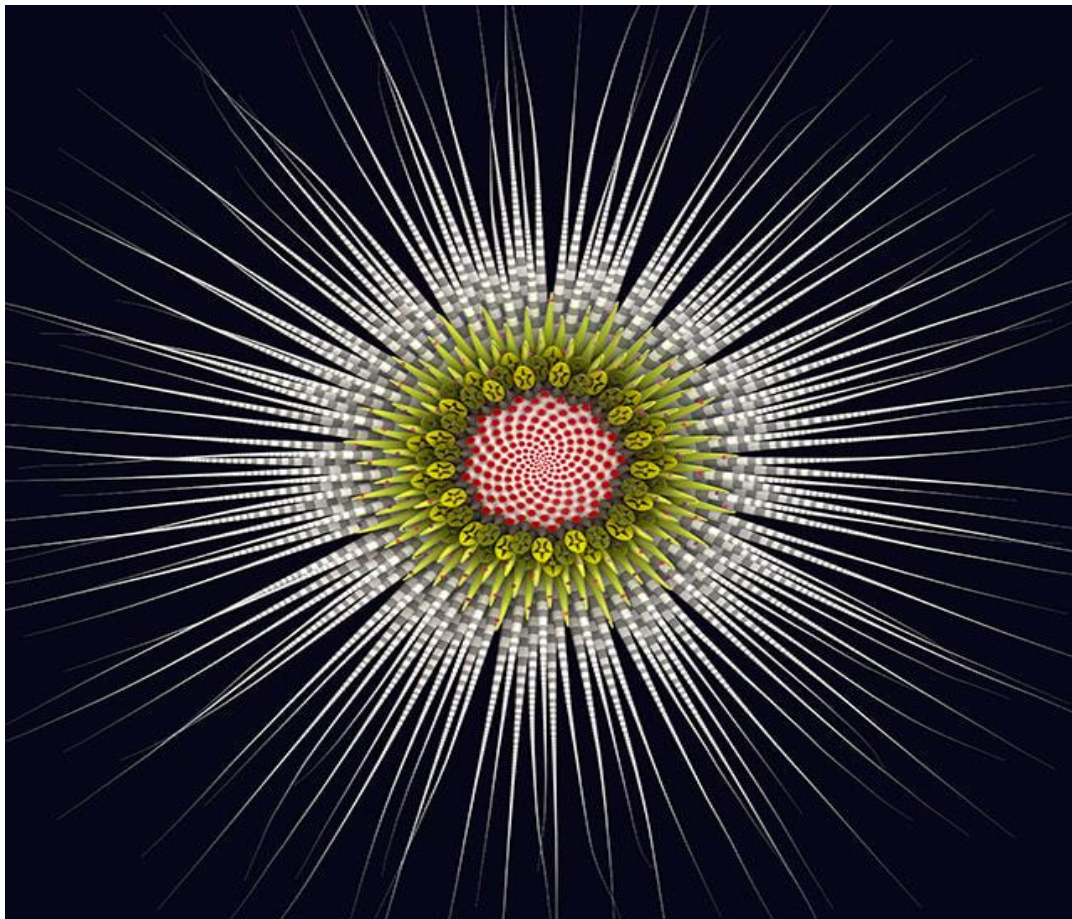
Ο Jon McCormack είναι καλλιτέχνης νέων μέσων και ερευνητής που ζει και εργάζεται στην Αυστραλία. Είναι καθηγητής της Επιστήμης των Υπολογιστών στο Πανεπιστήμιο Monash στη Μελβούρνη και διευθυντής του εργαστηρίου sensiLab. Έργα του έχουν παρουσιαστεί διεθνώς σε κορυφαίους εκθεσιακούς χώρους και μουσεία, όπου μεταξύ άλλων το Μουσείο Μοντέρνας Τέχνης στην Αμερική (MoMA), η Tate Gallery στο Ηνωμένο Βασίλειο, η Prix Ars Electronica στην Αυστρία, η Στέγη Ιδρύματος Ωνάση στην Αθήνα. Ο ίδιος έχει λάβει πολλαπλά βραβεία τόσο για τα έργα του όσο και για την επιστημονική έρευνα στην Επιστήμη των Υπολογιστών. Από τη δεκαετία του '80 έχει χρησιμοποιήσει κώδικα προγραμματισμού ως εκφραστικό μέσο. Η ακαδημαϊκή του έρευνα στοχεύει να ανοίξει νέους ορίζοντες στον τρόπο με τον οποίο η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιηθεί δημιουργικά³⁵. Θεωρεί ότι ο ίδιος



Εικόνα 6. Εικόνα από το έργο "Fifty Sisters" (Πηγή εικόνας: annieivanova.com).

³⁵ Jon, McCormack, <https://jonmccormack.info/about>.

είναι ο καλλιτέχνης, αφού οι δυνατότητες των υπολογιστών είναι ακόμα πολύ πρωτόγονες και δεν διαθέτουν όμοιες δημιουργικές ικανότητες με τον άνθρωπο. Παρόλα αυτά, πιστεύει ότι οι υπολογιστές μπορούν να κάνουν πράγματα που λειτουργούν συμπληρωματικά με την ανθρώπινη νοημοσύνη. Ένα από τα πιο γνωστά έργα του είναι το "Fifty Sisters", μια σειρά στατικών εικόνων που αποτελείται από πενήντα ηλεκτρονικά μεταλλαγμένα φυτά. Δημιουργήθηκαν με βάση τα λογότυπα των επτά μεγαλύτερων εταιρειών πετρελαίου, που είχαν τον έλεγχο της πετρελαιοβιομηχανίας μέχρι την περίοδο της ενεργειακής κρίσης της δεκαετίας του '70. Το έργο αναφέρεται στην εξάρτηση της παγκόσμιας οικονομίας από το πετρέλαιο και την καταστροφή του περιβάλλοντος, που προκαλείται από την εξόρυξη και τη μεταφορά του. Το έργο εκτέθηκε στην Ars Electronica το 2012³⁶ και βραβεύτηκε το 2016 με το Lumen Prize Still Image Award. Η δημιουργία των εικόνων έγινε αλγοριθμικά με κώδικα που χρησιμοποιεί τεχνητή εξέλιξη και γενετική γραμματική³⁷.



Εικόνα 7. Εικόνα από το έργο "Fifty Sisters" (Πηγή εικόνας: annieivanova.com).

³⁶ Studio Ivanova, "FutureLab Residency", <https://www.annieivanova.com/jon-mccormack.html>.

³⁷ AIArtists, "Jon McCormack", <https://aiartists.org/jon-mccormack>.

Ο Ahmed Elgammal είναι καθηγητής στο Τμήμα της Επιστήμης των Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Rutgers. Είναι επίσης ιδρυτής και διευθυντής του εργαστηρίου Τέχνη και Τεχνητή Νοημοσύνη στο ίδιο πανεπιστήμιο. Η έρευνά του αφορά κυρίως τη μηχανική μάθηση, τη μηχανική όραση, την υπολογιστική ιστορία της τέχνης και διερευνά κατά πόσο η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να είναι δημιουργική χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση.³⁸ Παράλληλα, είναι ιδρυτής εταιρείας η οποία δημιουργεί καινοτόμα εργαλεία με τη χρήση τεχνητής νοημοσύνης που διατίθενται τόσο για την αγορά όσο και για τη δημιουργία τέχνης. Είναι ο δημιουργός του AICAN, ενός νευρωνικού δικτύου τύπου CAN (Creative Adversarial Network), το οποίο έχει εκπαιδευτεί σε δεκάδες χιλιάδες έργων από την παγκόσμια ιστορία τέχνης, ώστε να μπορεί να δημιουργεί αυτόνομα ή με μικρή ανθρώπινη παρέμβαση νέα έργα που διαθέτουν κάποια πρωτοτυπία. Ο ίδιος θεωρεί ότι το AICAN είναι η



Εικόνα 8. AICAN & Ahmed Elgammal, *Sculpture of a woman* (Πηγή εικόνας: hgcontemporary.com).

^{38 38} AIArtists, “Dr. Ahmed Elgammal”, <https://aiartists.org/ahmed-elgammal>.

πρώτη μηχανή-καλλιτέχνης που έχει περάσει το Turing test³⁹. Έργα που έχουν παραχθεί από το δίκτυο έχουν παρουσιαστεί σε εκθέσεις και έχουν γίνει εκτενείς αναφορές στον τύπο. Ο ίδιος έχει, επίσης, δημιουργήσει την πλατφόρμα Playform, η οποία διατίθεται για τη δημιουργία έργων τέχνης με τη χρήση AI, χωρίς να είναι απαραίτητη η γνώση κώδικα και των διαφορετικών τεχνολογιών που απαιτούνται για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων.

Η Laureen McCarthy είναι Αναπληρώτρια Καθηγήτρια στο Τμήμα Σχεδίου και Τεχνών Νέων Μέσων του Πανεπιστημίου της Καλιφόρνια (UCLA, Department of Design Media Arts). Είναι η δημιουργός της p5.js, βιβλιοθήκης ανοικτού κώδικα σε γλώσσα JavaScript η οποία απευθύνεται κυρίως σε καλλιτέχνες, σχεδιαστές, εκπαιδευτικούς και δημιουργήθηκε με στόχο να γίνει προσβάσιμη στο ευρύ κοινό η εκμάθηση προγραμματισμού. Είναι, επίσης, μέλος του Διοικητικού Συμβουλίου του οργανισμού Processing Foundation. Το καλλιτεχνικό της έργο εξετάζει τις κοινωνικές σχέσεις που δημιουργούνται στη σύγχρονη κοινωνία, όπου κυριαρχούν τα συστήματα παρακολούθησης, ο αυτοματισμός και οι αλγόριθμοι. Έχει λάβει πολλαπλές υποτροφίες και επιχορηγήσεις από διάφορους οργανισμούς και εταιρείες. Έργα της έχουν εκτεθεί διεθνώς σε εκθέσεις όπως στο κέντρο Barbican, τη Στέγη του Ιδρύματος Ωνάση, IDFA DocLab, το Μουσείο Τεχνών της Σεούλ, στο Φεστιβάλ Τεχνών Νέων Μέσων της Ιαπωνίας. Έχει λάβει τα βραβεία: Golden Nica από την Ars Electronica, Japan Media Arts Social Impact Award και IDFA DocLab Award for Immersive Non-Fiction. Εκτός από λογισμικό, ηλεκτρονικά μέσα και το διαδίκτυο, χρησιμοποιεί βίντεο, φωτογραφία, εγκαταστάσεις και ιδιαίτερα την τέχνη της επιτέλεσης, μέσω της οποίας καλεί το κοινό σε αλληλεπίδραση⁴⁰. Τα βραβευμένα έργα της “Someone” και “Laureen” ασκούν κριτική στον τρόπο με τον οποίο η τεχνολογία εισβάλλει στις πιο προσωπικές καθημερινές στιγμές των ανθρώπων και

³⁹ AICAN, “Meet AICAN”, <https://aican.io/>. Παρόλα αυτά, σύμφωνα με έρευνα που πραγματοποιήθηκε από το πανεπιστήμιο της Νότιας Καλιφόρνια σχετικά με τις στάσεις απέναντι στην τέχνη που έχει δημιουργηθεί από ανθρώπους έναντι σε εκείνη που έχει δημιουργηθεί από AI, φαίνεται ότι το κοινό αποδίδει σαφώς ανώτερη αξιολόγηση στην τέχνη που έχει δημιουργηθεί από ανθρώπους. Για το λόγο αυτό οι ερευνητές θεωρούν ότι δεν ευσταθεί ο ισχυρισμός του Elgamal σχετικά με το Turing test, λόγω έλλειψης επαρκών ερευνητικών στοιχείων και πιθανόν προκαταλήψεων σε δική του έρευνα που προηγήθηκε. Joo-Wha Hong and Nathaniel Ming Curran, “Artificial intelligence, artists, and art: attitudes toward artwork produced by humans vs. artificial intelligence”, *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)* 15.2s (2019): 1-16.

⁴⁰ Laureen Lee McCarthy, <https://lauren-mccarthy.com/>.

καλεί το κοινό να προβληματιστεί για τις παραχωρήσεις που ο καθένας κάνει ώστε να μπορεί να λαμβάνει κάποιες ευκολίες με τη χρήση τεχνολογιών παρακολούθησης που επεξεργάζονται από δίκτυα τεχνητής νοημοσύνης. Στο πρώτο έργο καλεί το κοινό να υποδυθεί την ανθρώπινη εκδοχή του έξυπνου βοηθού της Amazon Alexa, να μπουν στα σπίτια των συμμετεχόντων και να ανταποκριθούν στις ανάγκες τους. Στο δεύτερο έργο, το οποίο διαρκεί αρκετές μέρες, η καλλιτέχνης επιχειρεί να μετατραπεί σε μια ανθρώπινη εκδοχή της Alexa παρέχοντας τις υπηρεσίες της σε συμμετέχοντες, τους οποίους συνεχώς παρακολουθεί με κάμερες, σένσορες και άλλες συσκευές παρακολούθησης. Η ίδια θεωρεί ότι όταν κάποιος επιτρέπει την ύπαρξη τέτοιων συσκευών μέσα στο ίδιο του το σπίτι, το οποίο είναι ο κατεξοχήν χώρος όπου διαμορφώνεται η προσωπικότητά μας, είναι σα να αναθέτει τη διαμόρφωση της ταυτότητάς του σε έναν εικονικό βοηθό, που οι αξίες του έχουν καθοριστεί από μια μικρή ομάδα προγραμματιστών⁴¹.



Εικόνα 9. *Laureen 2017*, Στιγμιότυπο οθόνης (Πηγή: idfa.nl)

Η Joy Buolamwini είναι διδάκτωρ της επιστήμης των υπολογιστών και αυτοχαρακτηρίζεται ποιήτρια του κώδικα. Χρησιμοποιεί την τέχνη και την έρευνα για να αποκαλύψει τις κοινωνικές επιπτώσεις από τη χρήση της τεχνητής νοημοσύνης. Κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών της σπουδών στο MIT προσπάθησε να δημιουργήσει ένα νέο πεδίο έρευνας, με στόχο την αφύπνιση του κόσμου σε θέματα τα οποία παραμένουν επιμελώς κρυμμένα και αφορούν κυρίως τις φυλετικές και

⁴¹ Laureen McCarthy, “Feeling at Home: Between Human and AI”, *Immerse*, <https://immerse.news/feeling-at-home-between-human-and-ai-6047561e7f04>.

ρατσιστικές προκαταλήψεις που είναι ενσωματωμένες στα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης για την αναγνώριση προσώπων που δημιουργούνται από μεγάλες εμπορικές εταιρείες όπως οι IBM, Microsoft και Amazon. Συνέπεια του αγώνα και των προσπαθειών της ήταν οι παραπάνω εταιρείες να υπαναχωρήσουν από την πώληση αντίστοιχων συστημάτων που χρησιμοποιούνται σε κάποιες χώρες από τις δημόσιες αρχές για την επιβολή του νόμου. Στο βραβευμένο ντοκιμαντέρ *Coded Bias*, (2020) σε σκηνοθεσία της Shalini Kantayya, πρωταγωνιστεί η ίδια και αφηγείται τη διαδρομή και τα αποτελέσματα της έρευνάς της. Η Joy Buolamwini ίδρυσε τον οργανισμό Algorithmic Justice League με στόχο την καταπολέμηση των επιβλαβών προκαταλήψεων στην τεχνητή νοημοσύνη⁴². Ο οργανισμός βραβεύτηκε με διάκριση (Award of Distinction) από την Ars Electronica στην κατηγορία «Ηλεκτρονικές Κοινότητες 2020⁴³».



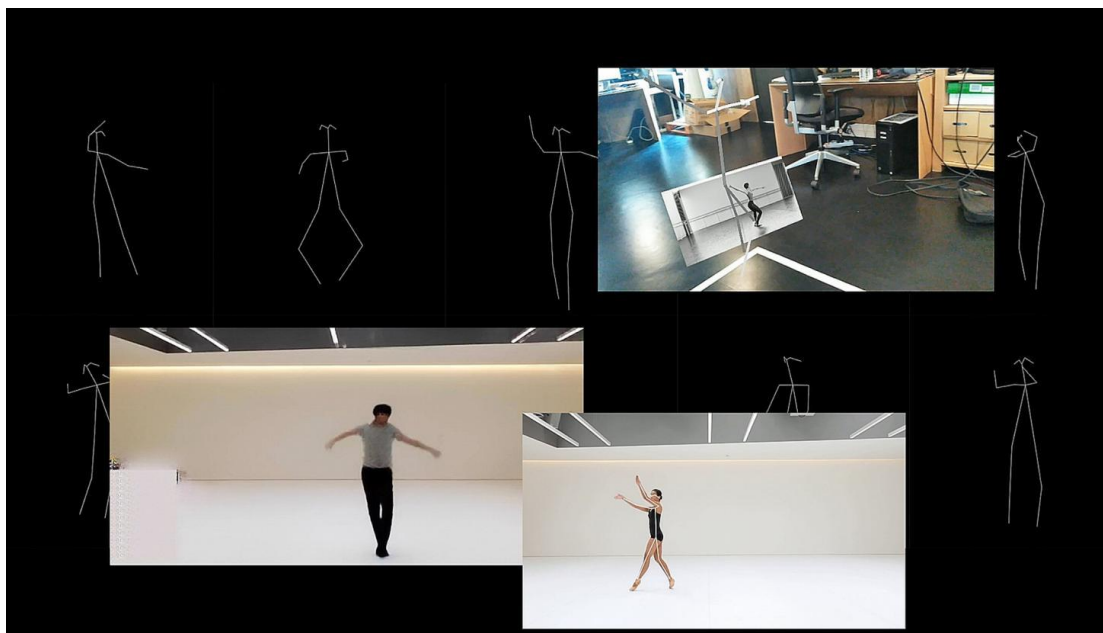
Εικόνα 10. *Coded Bias* (Πηγή: redefinemag.net)

Ο Wayne McGregor είναι πολυβραβευμένος Βρετανός χορογράφος, διεθνώς αναγνωρισμένος για τις καινοτομίες στις παραστάσεις που έχουν επαναπροσδιορίσει την τέχνη του χορού στη μοντέρνα εποχή. Διαπνεόμενος από μια ακόρεστη περιέργεια για την κίνηση και τις δημιουργικές δυνατότητές της, βρίσκεται σε δημιουργικό διάλογο με μια σειρά καλλιτεχνικών μορφών, επιστημονικών πεδίων και

⁴² Joy Buolamwini, Poet of Code, <https://poetofcode.com/?home>.

⁴³ Ars Electronica, "Digital Communities 2020", <https://ars.electronica.art/prix/en/winners/digital-communities/>.

τεχνολογικών παρεμβάσεων. Είναι καθηγητής χορογραφίας στο Trinity Laban Conservatoire of Music and Dance και έχει ανακηρυχθεί επίτιμος διδάκτωρ σε τέσσερα βρετανικά πανεπιστήμια. Το διαρκές ενδιαφέρον για την επιστήμη και την τεχνολογία είναι αναπόσπαστο κομμάτι της δημιουργικής διαδικασίας, των διεπιστημονικών συνεργασιών του και της εξερεύνησης της δημιουργίας χορού και της σωματικής νοημοσύνης. Έχει συνεργαστεί με ένα δίκτυο ερευνητών και επαγγελματιών στα πεδία της γνωσιακής επιστήμης, της κοινωνικής ανθρωπολογίας



Εικόνα 11. Wayne McGregor και Google Arts and Culture Lab (Πηγή: waynemcgregor.com)

και του προγραμματισμού, για τη διερεύνηση της κατανεμημένης δημιουργικής γνώσης και την ανάπτυξη τεχνητά έξυπνου λογισμικού για χορογραφία. Όντας γοητευμένος από τις δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης ξεκίνησε μια πρωτοποριακή συνεργασία με το εργαστήριο Google Arts and Culture, όπου συγκεντρώνονται άτομα από διαφορετικά επιστημονικά πεδία για να πειραματιστούν στη διασταύρωση τέχνης και τεχνολογίας. Μέσα από αυτή τη συνεργασία δημιουργήθηκε στο Παρίσι το έργο Living Archive, ένα εργαλείο χορογραφίας που υποστηρίζεται από μηχανική μάθηση. Το εργαλείο αυτό δημιουργεί πρωτότυπη κίνηση με βάση το 25 ετών αρχείο του Wayne McGregor και αποτελεί ένα ζωντανό διάλογο ανάμεσα στους χορευτές και τη συνολική δουλειά του. Ο ίδιος δηλώνει γοητευμένος από τη δυνατότητα της τεχνολογίας να μαθαίνει και να αναπαράγει το ιδιαίτερο δημιουργικό στυλ κίνησης ενός καλλιτέχνη. Σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει σε μελλοντικές του δουλειές το εργαλείο που αναπτύχθηκε μέσα

από τη συνεργασία του με την Google, με καθένα από τους χορευτές του να αναπαράγει στη σκηνή την ακολουθία κινήσεων που δίνει ο αλγόριθμος⁴⁴.

Ένας άλλος καλλιτέχνης που πειραματίζεται με τη σύνθεση χορού και τεχνητής νοημοσύνης είναι ο Christian Mio Loclair. Όντας ο ίδιος χορευτής και έχοντας σπουδές στην επιστήμη των υπολογιστών, επηρεάζεται έντονα από την τεχνητή νοημοσύνη και τα δεδομένα και χρησιμοποιεί την τεχνολογία για να δημιουργήσει τέχνη. Μέσω αλγόριθμων δημιουργεί εγκαταστάσεις που εξερευνούν την αισθητική και την τριβή της ανθρώπινης ταυτότητας⁴⁵. Το έργο του Blackberry Winter συμπιέζει οργανικές παρατηρήσεις σε κώδικα, ενώ αρθρώνει νέες λογικές έννοιες μέσω της κίνησης ως ένα διαρκές ταξίδι στο συνθετικό χώρο της ανθρώπινης φύσης. Συνδυάζοντας έννοιες ανθρώπινης και τεχνολογικής κίνησης, διερευνά τις δυνατότητες αναγνώρισης της κίνησης σε έναν αφανή χώρο καταστάσεων. Το έργο αναπτύχθηκε με την επεξεργασία, μέσω μηχανικής μάθησης, μιας μεγάλης βάσης δεδομένων από εικόνες ανθρώπινης κίνησης και στάσεων. Για το έργο αναπτύχθηκε ειδικά προσαρμοσμένο νευρωνικό δίκτυο τύπου GAN (Generative Adversarial Network)⁴⁶.



Εικόνα 12. *Blackberry Winter*, Christian Mio Loclair (Πηγή: christianmioloclair.com)

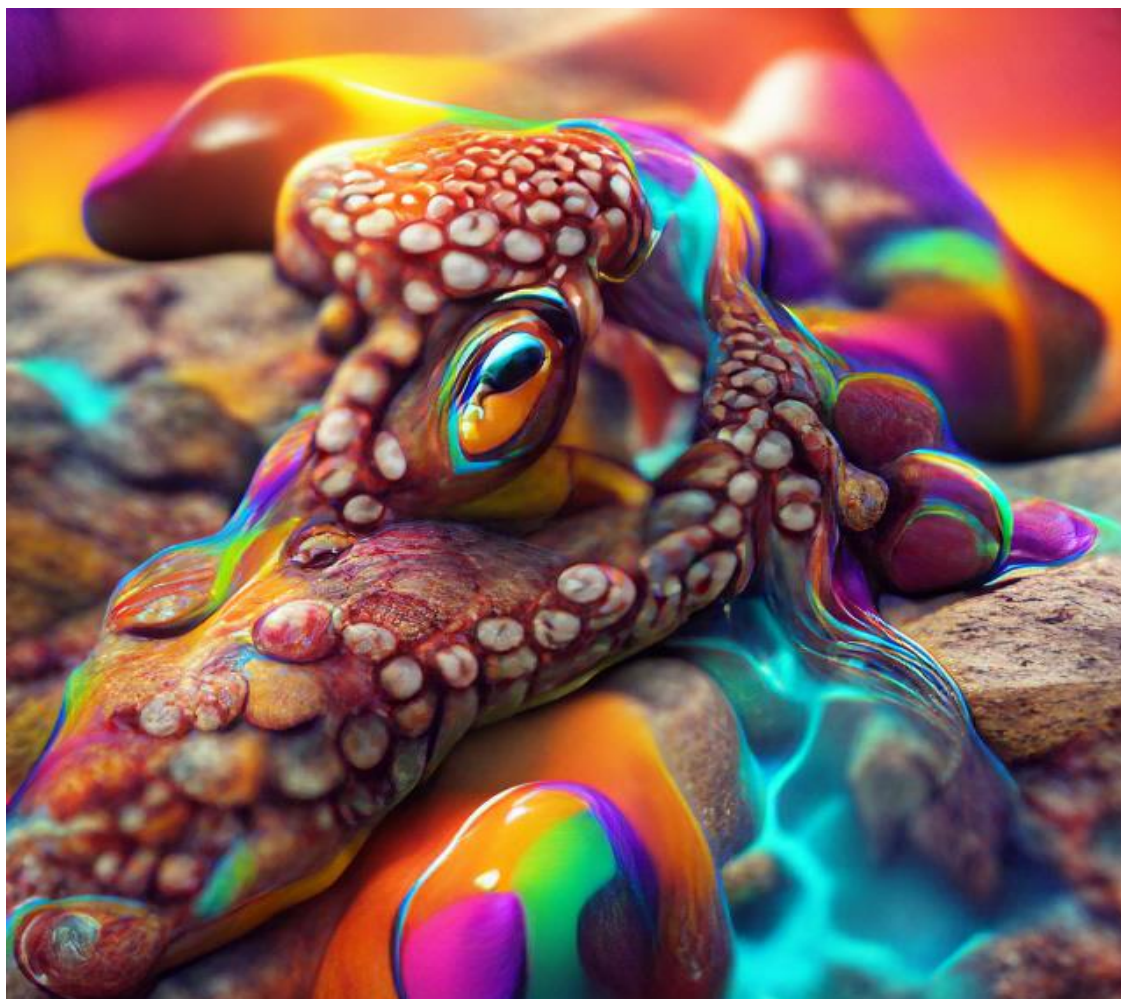
Ο Memo Akten είναι καλλιτέχνης που χρησιμοποιεί τις δυνατότητες της τεχνολογίας για τη δημιουργία ήχων, εικόνων, ταινιών, και μεγάλου εύρους

⁴⁴ Wayne McGregor, <https://waynemcgregor.com/>.

⁴⁵ Goethe, "My material is mostly information: AI artist Christian Mio Loclair in interview", <https://www.goethe.de/prj/k40/en/kun/loc.html>.

⁴⁶ Christian Mio Loclair, <https://christianmioloclair.com>.

διαδραστικών εγκαταστάσεων και παραστάσεων. Αντλώντας έμπνευση από μια μεγάλη γκάμα ενδιαφερόντων και πεδία, όπως η βιολογία, η τεχνητή νοημοσύνη, η υπολογιστική δημιουργικότητα, η αντίληψη, η συνείδηση, η νευροεπιστήμη, η φυσική, η θεολογία, η ηθική, οι παραδόσεις, προσπαθεί να κατανοήσει τη φύση και την ανθρώπινη κατάσταση και να διερευνήσει τη σύγκρουση που υπάρχει ανάμεσα στους διάφορους τομείς τη σύγχρονη εποχή που χαρακτηρίζεται από την οικολογική κατάρρευση, την ηθική κρίση και την υποταγή στην τεχνολογία. Μετά από



Εικόνα 13. Memo Atken, *Distributed Conciousness*, 2021, εικόνα που δημιουργήθηκε με AI (Πηγή: memo.tv)

μια μακρά περίοδο επιτυχημένης καλλιτεχνικής δράσης, πρόσφατα ολοκλήρωσε διδακτορικό στην τεχνητή νοημοσύνη και τη βαθιά μάθηση και είναι Αναπληρωτής Καθηγητής των Υπολογιστικών Τεχνών στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια (University of California, San Diego). Έργα του έχουν βραβευτεί και έχουν εκτεθεί σε πλήθος εκθεσιακών χώρων, του έχουν ανατεθεί παραγγελίες από κορυφαίους οργανισμούς, έχει λάβει πολλές υποτροφίες και επιχορηγήσεις και έχει υπάρξει μέλος επιτροπής

σε σημαντικές διοργανώσεις. Στα έργα του χρησιμοποιεί μια πληθώρα διαφορετικών αλγορίθμων και τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης και διαθέτει ένα εντυπωσιακό πορτφόλιο. Έχει, επίσης, συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη της ανοικτού κώδικα εργαλειοθήκης OpenFrameworks, η οποία έχει σχεδιαστεί για δημιουργικό προγραμματισμό⁴⁷.

Κάποιοι άλλοι βραβευμένοι καλλιτέχνες, που πειραματίζονται, ο καθένας με τον προσωπικό του ιδιαίτερο τρόπο, με τις δημιουργικές δυνατότητες της τεχνητής νοημοσύνης και της μηχανικής μάθησης στην καλλιτεχνική δημιουργία, είναι οι: α) Mario Klingemann, ένας από τους πρωτοπόρους στο κίνημα της τέχνης AI με ένα από τα πρώτα έργα AI που πωλήθηκε σε παραδοσιακή δημοπρασία έργων τέχνης⁴⁸, β)



Εικόνα 14. *Memories of Passerby I*, Mario Klingemann (Πηγή: <http://quasimondo.com/>)

⁴⁷ Memo Atken, <https://www.memo.tv/info/>.

⁴⁸ Mario Klingemann, <http://quasimondo.com/>.

Pindar Van Arman, εφευρέτης και δημιουργός αυτόνομων ρομπότ που έχουν τη δυνατότητα να παράγουν έργα τέχνης και να δημιουργούν πρωτότυπες συνθέσεις και έργα δουλεύοντας με παρόμοιο τρόπο με εκείνο που λειτουργούν οι άνθρωποι⁴⁹,



Εικόνα 15. Pindar Van Arman, έργο δημιουργημένο από ρομποτική κατασκευή του ίδιου που χρησιμοποιεί ένα πλήθος διαφορετικών αλγορίθμων AI (Πηγή: <https://www.cloudpainter.com/>)

γ) Sofia Crespo, καλλιτέχνης με έντονο ενδιαφέρον στη μελέτη της σχέσης ανάμεσα στους βιολογικούς οργανισμούς και την τεχνολογία, διερευνά τη δυνατότητα της τεχνητής νοημοσύνης στην καλλιτεχνική δημιουργία και τις ομοιότητες που υπάρχουν ανάμεσα στη δημιουργία εικόνων από AI και τον τρόπο καλλιτεχνικής έκφρασης των ανθρώπων⁵⁰, δ) Anna Ridler, καλλιτέχνης που εργάζεται ιδιαίτερα με βάσεις δεδομένων που η ίδια έχει συγκεντρώσει, ερευνώντας τις δημιουργικές

⁴⁹ Pindar Van Arman, <https://www.cloudpainter.com/>.

⁵⁰ Sofia Crespo, <https://sofiacrespo.com/>.

δυνατότητες της μηχανικής μάθησης και το πως αυτή σχετίζεται με το σχέδιο και τη ζωγραφική⁵¹.



Εικόνα 16. Sofia Crespo, Neural Zoo (Πηγή: <https://neuralzoo.com/>)



Εικόνα 17. Anna Ridler, Circadian Bloom: ρολόι από εικόνες λουλουδιών που παράγονται σε πραγματικό χρόνο από νευρωνικό δίκτυο τύπου GAN. Εγκατάσταση στο Πεδίο του Άρεως στην Αθήνα από την έκθεση του Ιδρύματος Ωνάση "You and AI" (Πηγή: <http://annaridler.com>)

⁵¹ Anna Ridler, <http://annaridler.com/>.

Γ. Συνοπτική παρουσίαση δικτύων τεχνητής νοημοσύνης που χρησιμοποιούνται στη σύγχρονη καλλιτεχνική πράξη

ι. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Artificial Neural Networks)

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs) είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στη μελέτη του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος. Αποτελούν μια διαχρονική ερευνητική προσέγγιση στο πεδίο της τεχνητής νοημοσύνης (AI), της μηχανικής μάθησης (Machine Learning) και της βαθιάς μάθησης (Deep Learning), ενώ τις τελευταίες δεκαετίες έχουν βρει ευρύτερη αποδοχή σε πολλούς επιστημονικούς τομείς ως εργαλεία μοντελοποίησης για την επίλυση σύνθετων προβλημάτων του πραγματικού κόσμου⁵².

Τα ANNs προσομοιώνουν το βιολογικό νευρικό σύστημα, αλλά χρησιμοποιούν ένα συμπυκνωμένο σύνολο εννοιών από τα βιολογικά νευρωνικά συστήματα. Ειδικότερα, προσομοιώνουν την ηλεκτρική δραστηριότητα του εγκεφάλου και του νευρικού συστήματος. Όντας εμπνευσμένα από τη συμπεριφορά του ανθρώπινου εγκεφάλου, στόχος τους δεν είναι να αντιγράψουν τη λειτουργία του βιολογικού συστήματος, αλλά να χρησιμοποιηθούν κάποιες από τις οργανωτικές αρχές που είναι γνωστό ότι υπάρχουν στον εγκέφαλο, ώστε να δημιουργηθούν έξυπνα συστήματα γενικού σκοπού που θα μπορούν να επιλύουν σύνθετα προβλήματα σε πολλούς επιστημονικούς τομείς. Επίσης, η μοντελοποίηση του βιολογικού νευρικού συστήματος μέσω των ANNs μπορεί να συμβάλλει στην καλύτερη κατανόηση των βιολογικών λειτουργιών. Οι σύγχρονες εξελίξεις της τεχνολογίας στα υλικά των υπολογιστικών συστημάτων έχει συμβάλλει τα μέγιστα στη δυνατότητα εφαρμογής αυτής της μοντελοποίησης. Για τη διεξοδική έρευνα των ANNs είναι απαραίτητος ο συνδυασμός γνώσεων και η συνεργασία διαφορετικών επιστημονικών πεδίων, όπως της νευροφυσιολογίας, της ψυχολογίας και ειδικότερα

⁵² Anil K. Jain et al., "Artificial neural networks: A tutorial", *Computer* 29.3 (1996): 31-44. Imad Basheer and Maha Hajmeer. "Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application", *Journal of microbiological methods* 43.1 (2000): 3-31. Steven Walczak and Narciso Cerpa, "Artificial Neural Networks" in *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition), Academic Press Int, 2003.

της γνωστικής επιστήμης, της φυσικής, της επιστήμης των υπολογιστών, της θεωρίας ελέγχου, της τεχνητής νοημοσύνης, της στατιστικής και των μαθηματικών⁵³.

Εκείνο που κάνει τα ANNs ιδιαίτερα ενδιαφέροντα προέρχεται από τα αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, τα οποία δεν υπήρχαν στα υπολογιστικά συστήματα που βασίζονταν στο αρχιτεκτονικό μοντέλο του von Neumann. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η μη γραμμικότητα της σκέψης, η δυνατότητα μάθησης και η δυνατότητα γενίκευσης, η προσαρμοστικότητα, η ανθεκτικότητα και η αντοχή στο λάθος και την αποτυχία, η δυνατότητα χειρισμού ανακριβών και ασαφών πληροφοριών, ο υψηλός παραλληλισμός⁵⁴. Τεχνητά μοντέλα που διαθέτουν τέτοια χαρακτηριστικά είναι επιθυμητά γιατί η μη γραμμικότητα επιτρέπει καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα, η απουσία ευαισθησίας στο θόρυβο μπορεί να παρέχει ακριβείς προβλέψεις όταν υπάρχουν ασαφή δεδομένα ή λάθη μετρήσεων, ο υψηλός παραλληλισμός προϋποθέτει γρήγορη επεξεργασία και ανθεκτικότητα των υλικών, η μάθηση και η προσαρμοστικότητα επιτρέπουν στο σύστημα να τροποποιεί την εσωτερική του δομή ανταποκρινόμενο στην αλλαγή του περιβάλλοντος, και η γενίκευση δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής του μοντέλου σε άγνωστα δεδομένα. Έτσι, ο κύριος σκοπός της νευρο-υπολογιστικής βασισμένης σε ANNs είναι η ανάπτυξη μαθηματικών αλγορίθμων, που θα δίνει τη δυνατότητα στα νευρωνικά δίκτυα να μαθαίνουν μιμούμενα τη λειτουργία επεξεργασίας πληροφοριών και μάθησης του ανθρώπινου εγκεφάλου⁵⁵.

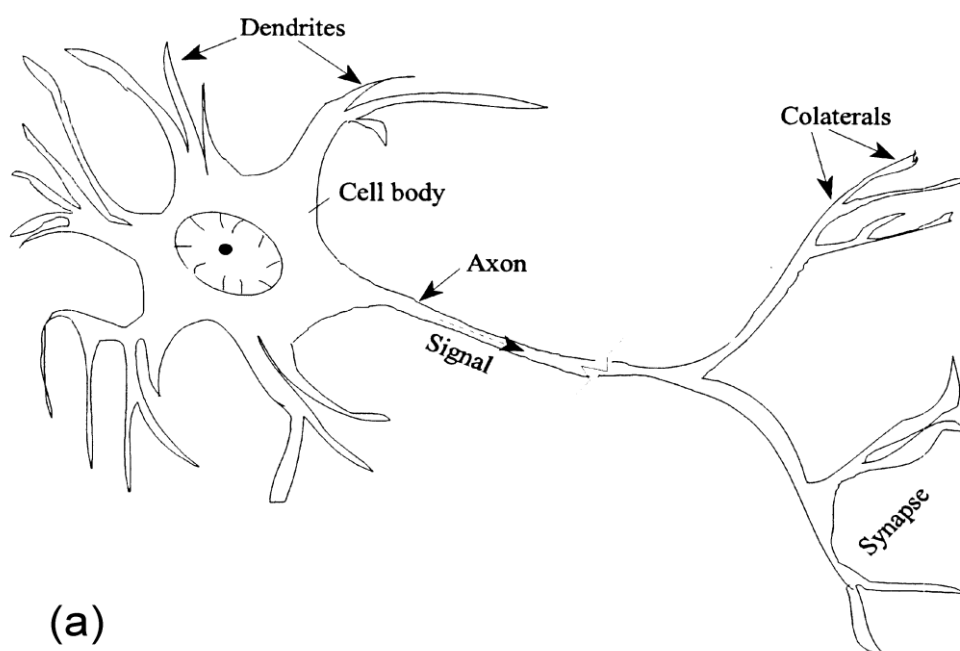
Το ανθρώπινο νευρικό σύστημα αποτελείται από δισεκατομμύρια νευρώνες διαφόρων τύπων και μηκών ανάλογα με τη θέση τους στο σώμα. Τα τρία κυριότερα λειτουργικά χαρακτηριστικά από τα οποία αποτελείται ο βιολογικός νευρώνας είναι το σώμα του κυττάρου, ο νευροάξονας και οι δενδρίτες. Το σώμα του κυττάρου έχει έναν πυρήνα, που περιέχει πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά κληρονομικότητας, και το πλάσμα που διατηρεί τις μοριακές ικανότητες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των απαραίτητων υλικών για τους νευρώνες. Οι δενδρίτες λαμβάνουν σήματα από άλλους νευρώνες και τα μεταβιβάζουν στο σώμα του κυττάρου. Ο νευροάξονας, ο οποίος διασπάται σε παράπλευρους, λαμβάνει τα σήματα από το

⁵³ Jain, ό.π., Basheer, ό.π.

⁵⁴ Jain, ό.π., Basheer, ό.π.

⁵⁵ Basheer, ό.π.

σώμα του κυττάρου και τα μεταβιβάζει μέσω των συνάψεων στους δενδρίτες των γειτονικών νευρώνων. Ένας κρουστικός παλμός με τη μορφή ηλεκτρικού σήματος διασχίζει τους δενδρίτες και το σώμα του κυττάρου κατευθυνόμενο προς την προσυναπτική μεμβράνη των συνάψεων. Φτάνοντας στη μεμβράνη, ένας χημικός νευροδιαβιβαστής απελευθερώνεται από τις κύστες σε ποσότητες ανάλογες με αυτή του εισερχόμενου σήματος. Ο νευροδιαβιβαστής διαχέεται μέσα στο συναπτικό κενό προς τη συναπτική μεμβράνη και τελικά στους δενδρίτες των γειτονικών νευρώνων αναγκάζοντάς τους να παράγουν ένα νέο ηλεκτρικό σήμα. Το παραγόμενο σήμα περνάει με παρόμοιο τρόπο μέσα από τον επόμενο νευρώνα. Το ποσό του σήματος που περνάει μέσα από το νευρώνα που το λαμβάνει, εξαρτάται από την ένταση του σήματος που εκπέμπεται από τους νευρώνες που το στέλνουν, τη συναπτική δύναμη και το όριο του νευρώνα λήπτη. Επειδή ο κάθε νευρώνας διαθέτει ένα μεγάλο αριθμό δενδρίτων και συνάψεων, μπορεί να λάβει και να μεταφέρει πολλά σήματα ταυτόχρονα. Αυτά τα σήματα μπορεί είτε να βοηθούν είτε να περιορίζουν τη λειτουργία του νευρώνα. Αυτός ο απλοποιημένος μηχανισμός μεταφοράς του ηλεκτρικού σήματος στον εγκέφαλο, είναι που αποτέλεσε το βασικό βήμα της ανάπτυξης της πρώιμης νευροεπιστήμης, αλλά και που αποτελεί τη θεμελιώδη βάση της λειτουργίας των ANNs⁵⁶.



Εικόνα 18. Σχηματική αναπαράσταση του βιολογικού νευρώνα (Πηγή: Basheer, ό.π.)

⁵⁶ Basheer, ό.π.

Η αναλογία ανάμεσα στους τεχνητούς και τους βιολογικούς νευρώνες είναι η εξής: οι συνδέσεις ανάμεσα στους κόμβους αναπαριστούν το νευροάξονα και τους δενδρίτες, τα βάρη των συνδέσεων αναπαριστούν τις συνάψεις, και το όριο (threshold) προσεγγίζει τη δραστηριότητα στο σώμα του κυττάρου. Τόσο το βιολογικό όσο και το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μαθαίνουν σταδιακά προσαρμόζοντας τα μεγέθη των βαρών ή τη δύναμη των συνάψεων⁵⁷.

Με βάση το παραπάνω μοντέλο λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου, τα ANNs αποτελούνται από χιλιάδες ή ακόμα και εκατομμύρια απλούς κόμβους επεξεργασίας που είναι πυκνά διασυνδεδεμένοι. Ένας κόμβος μπορεί να είναι διασυνδεδεμένος με πολλούς άλλους που βρίσκονται είτε στο επίπεδο κάτω από αυτόν, από όπου λαμβάνει τα δεδομένα, είτε πάνω από αυτόν, όπου στέλνει τα δεδομένα. Σε καθεμία από τις λαμβανόμενες συνδέσεις ο κόμβος αναθέτει έναν αριθμό που αποτελεί το βάρος (weight). Όταν το δίκτυο είναι ενεργό ο κόμβος λαμβάνει ένα διαφορετικό δεδομένο σε καθεμία από τις συνδέσεις του και το πολλαπλασιάζει με το αντίστοιχο βάρος. Στη συνέχεια προσθέτει τα γινόμενα καταλήγοντας σε έναν αριθμό. Αν αυτός ο αριθμός είναι μικρότερος από την οριακή τιμή, ο κόμβος δεν μεταβιβάζει δεδομένα στο επόμενο επίπεδο. Αν ο αριθμός ξεπερνάει την οριακή τιμή, ο κόμβος ενεργοποιείται και στέλνει το σύνολο των σταθμισμένων δεδομένων εισόδου σε όλες τις εξερχόμενες συνδέσεις. Όταν το ANN εκπαιδεύεται, όλα τα βάρη και οι οριακές τιμές του αρχικά τίθενται ως τυχαίες τιμές. Τα δεδομένα εκπαίδευσης τροφοδοτούν το κατώτερο επίπεδο (input layer) και στη συνέχεια περνούν στα επόμενα επίπεδα, αφού πολλαπλασιαστούν και προστεθούν μεταξύ τους με πολύπλοκους τρόπους, μέχρι τελικά να φτάσουν ριζικά μεταμορφωμένα στο επίπεδο εξόδου. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, τα βάρη και οι οριακές τιμές συνεχώς προσαρμόζονται, έως ότου τα δεδομένα εκπαίδευσης με τις ίδιες ετικέτες να παράγουν παρόμοια αποτελέσματα⁵⁸.

Θα μπορούσαμε να παρομοιάσουμε τα ANNs με σταθμισμένους κατευθυνόμενους γράφους, όπου οι τεχνητοί νευρώνες είναι οι κόμβοι και οι κατευθυνόμενες ακμές με τα βάρη είναι οι συνδέσεις ανάμεσα στις εξόδους και τις εισόδους του νευρώνα. Ανάλογα με την αρχιτεκτονική σύνδεσης των νευρώνων, τα

⁵⁷ Jain, ό.π., Basheer, ό.π.

⁵⁸ Jain, ό.π., Basheer, ό.π., Walczak, ό.π.

ANNs μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: α) πρόσθιας τροφοδότησης, όπου οι γράφοι δεν έχουν επαναλήψεις, και β) επαναλαμβανόμενα ή ανατροφοδοτικά (recurrent or feedback) δίκτυα, όπου υπάρχουν επαναλήψεις εξαιτίας των ανατροφοδοτικών συνδέσεων⁵⁹.

Τα περισσότερα σύγχρονα ANNs είναι οργανωμένα σε επίπεδα κόμβων πρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward), που σημαίνει ότι τα δεδομένα μεταβιβάζονται μεταξύ τους σε μια μόνο κατεύθυνση⁶⁰.

Οι διαφορετικοί τρόποι συνδέσεων δημιουργούν δίκτυα με διαφορετική συμπεριφορά. Σε γενικές γραμμές τα δίκτυα πρόσθιας τροφοδότησης είναι στατικά, δηλαδή για κάθε είσοδο παράγουν μόνο ένα σύνολο τιμών εξόδου παρά μια ακολουθία τιμών. Επίσης, δεν διαθέτουν μνήμη, δηλαδή η απόκρισή τους στα δεδομένα εισόδου είναι ανεξάρτητη από την προηγούμενη κατάσταση του δικτύου. Αντίθετα, τα επαναλαμβανόμενα δίκτυα είναι δυναμικά συστήματα. Κάθε φορά που δίνεται ένα νέο δεδομένο εισόδου, η έξοδος του νευρώνα υπολογίζεται. Εξαιτίας της ανατροφοδότησης, οι είσοδοι σε κάθε νευρώνα τροποποιούνται και έτσι το δίκτυο οδηγείται σε μια νέα κατάσταση⁶¹.

Οι διαφορετικές αρχιτεκτονικές δομές ANNs απαιτούν και διαφορετικούς αλγόριθμους μάθησης. Η ικανότητα μάθησης είναι ένα στοιχειώδες χαρακτηριστικό της νοημοσύνης. Η διαδικασία μάθησης των ANNs μπορεί να ιδωθεί ως το πρόβλημα ανανέωσης της αρχιτεκτονικής του δικτύου ώστε να εκτελούν αποτελεσματικά μια συγκεκριμένη εργασία. Το δίκτυο συνήθως πρέπει να μαθαίνει τα βάρη των συνδέσεων από τα διαθέσιμα μοτίβα εκπαίδευσης. Η ικανότητα των ANNs να μαθαίνουν αυτόματα τους κανόνες που υπάρχουν στα παρεχόμενα αντιπροσωπευτικά παραδείγματα, αντί να ακολουθούν κανόνες που τους έχουν οριστεί από ειδικούς, είναι ένα από τα εντυπωσιακά τους πλεονεκτήματα⁶². Ο αλγόριθμος μάθησης αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία εφαρμόζονται κανόνες μάθησης για να ρυθμίσουν τα βάρη των συνδέσεων. Οι αλγόριθμοι μάθησης μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες: την επιβλεπόμενη μάθηση

⁵⁹ Jain, ό.π.

⁶⁰ Basheer, ό.π.

⁶¹ Jain, ό.π.

⁶² Jain, ό.π.

(Supervised learning), τη μη-επιβλεπόμενη μάθηση (Unsupervised learning) και την υβριδική μάθηση. Στην επιβλεπόμενη μάθηση, στο δίκτυο παρέχεται μια σωστή απάντηση (έξοδος) για κάθε μοτίβο εισόδου. Τα βάρη είναι καθορισμένα ώστε να επιτρέψουν στο δίκτυο να παράγει απαντήσεις όσο το δυνατό πλησιέστερα σε εκείνες που είναι γνωστές ως σωστές απαντήσεις. Η ενισχυτική μάθηση (Reinforcement learning) είναι μια παραλλαγή της επιβλεπόμενης μάθησης, όπου παρέχεται στο δίκτυο μόνο μια κριτική για την ορθότητα των εξόδων του δικτύου και όχι οι σωστές απαντήσεις. Αντίθετα, στη μη-επιβλεπόμενη μάθηση δεν απαιτείται η σύνδεση μιας σωστής απάντησης με τα μοτίβα των δεδομένων εισόδου στο σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Το δίκτυο διερευνά τις υποκείμενες δομές στα δεδομένα ή τους συσχετισμούς στα μοτίβα των δεδομένων και οργανώνει τα μοτίβα με βάση αυτούς τους συσχετισμούς. Η υβριδική μάθηση συνδυάζει την επιβλεπόμενη με τη μη-επιβλεπόμενη μάθηση. Κάποια μέρη των βαρών συνήθως ορίζονται μέσω της επιβλεπόμενης μάθησης, ενώ τα υπόλοιπα μέσω της μη-επιβλεπόμενης⁶³. Μια άλλη ευρύτερη κατηγορία των αλγορίθμων μάθησης μπορεί να οριστεί ανάλογα με το είδος των δεδομένων εισόδου: δυαδικές τιμές ή συνεχόμενες τιμές⁶⁴.

Μέχρι σήμερα έχει αναπτυχθεί ένας τεράστιος αριθμός μοντέλων ANNs με διαφορετικούς αλγόριθμους και παραλλαγές και έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για την επίλυση προβλημάτων σε πολλούς διαφορετικούς επιστημονικούς τομείς, μεταξύ των οποίων και στις τέχνες. Η βαθιά μάθηση αποτελεί την τελευταία λέξη της τεχνολογίας στα ANNs και στην ουσία αναφέρεται στην αρχιτεκτονική του δικτύου, το οποίο συνήθως αποτελείται από πολλαπλά επίπεδα. Για τον επιτυχή σχεδιασμό ANNs χρειάζεται να ληφθεί υπόψη ένα πλήθος θεμάτων μεταξύ των οποίων το μοντέλο του δικτύου, το μέγεθος του δικτύου, η συνάρτηση ενεργοποίησης, οι παράμετροι μάθησης, ο αριθμός και η ποιότητα των δειγμάτων εκπαίδευσης⁶⁵. Στον τομέα της τέχνης τα ANNs χρησιμοποιούνται σε πλήθος εφαρμογών ψηφιακού σχεδιασμού, εμπορικές ή ελεύθερου λογισμικού. Επίσης, χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία και παραγωγή ήχου και μουσικής, στην ανάπτυξη παιχνιδιών, καθώς και στη δημιουργία και επεξεργασία 2D και 3D γραφικών αλλά και καλλιτεχνικών έργων.

⁶³ Jain, ό.π.

⁶⁴ Walczak, ό.π., Basheer, ό.π.

⁶⁵ Jain, ό.π.

ii. Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks)

Τα Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (CNNs) είναι ένα εξειδικευμένο είδος νευρωνικών δικτύων για επεξεργασία δεδομένων με δεδομένη πλεγματική τοπολογία. Τα CNNs έχουν εξαιρετικές επιδόσεις σε πρακτικές εφαρμογές. Το όνομα Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα υποδεικνύει ότι το δίκτυο εκτελεί μια μαθηματική διεργασία που ονομάζεται συνέλιξη. Η συνέλιξη είναι ένα εξειδικευμένο είδος γραμμικής μεθόδου. Τα Συνελικτικά Δίκτυα είναι απλά νευρωνικά δίκτυα, τα οποία χρησιμοποιούν συνέλιξη αντί για γενικό πολλαπλασιασμό πινάκων σε τουλάχιστο ένα από τα επίπεδά τους (layers). Συνήθως, η μέθοδος που χρησιμοποιείται στα CNNs δεν αντιστοιχεί ακριβώς στον ορισμό της συνέλιξης, όπως χρησιμοποιείται σε άλλα επιστημονικά πεδία όπως η μηχανική ή τα καθαρά μαθηματικά. Στα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως διάφορες παραλλαγές της συνέλιξης, ενώ μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλά είδη δεδομένων με διαφορετικό αριθμό διαστάσεων. Για παράδειγμα, δεδομένα σε χρονοσειρά, που μπορούν να εννοηθούν ως ένα μονοδιάστατο πλέγμα με δείγματα ανά τακτά χρονικά διαστήματα, ή και δεδομένα εικόνων, που μπορούν να εννοηθούν ως ένα δισδιάστατο πλέγμα εικονοκυττάρων (pixels)⁶⁶.

Τα Συνελικτικά Δίκτυα ξεχωρίζουν ως ένα παράδειγμα εφαρμογής των αρχών της νευροεπιστήμης που επηρεάζει τη βαθιά μάθηση (Deep Learning), ενώ έχουν παίξει σημαντικό ρόλο στην ιστορία και την εξέλιξή της. Τα CNNs αποτελούν ίσως τη μεγαλύτερη ιστορία επιτυχίας της βιολογικά εμπνευσμένης τεχνητής νοημοσύνης. Αν και έχουν επηρεαστεί από πολλά άλλα επιστημονικά πεδία, κάποιες από τις βασικές αρχές των νευρωνικών δικτύων ορίστηκαν από τη νευροεπιστήμη. Η ιστορία τους ξεκινάει με πειράματα της νευροεπιστήμης πολύ πριν αναπτυχθούν τα σχετικά υπολογιστικά μοντέλα. Οι νευροφυσιολόγοι David Hubel και Torsten Wiesel, οι οποίοι τιμήθηκαν με βραβείο Νόμπελ, καθόρισαν πολλά από τα βασικά γεγονότα σχετικά με το πως λειτουργεί το οπτικό σύστημα των θηλαστικών και βοήθησε στο να χαρακτηριστούν πολλά στοιχεία της εγκεφαλικής λειτουργίας. Τα ευρήματα που είχαν τη μεγαλύτερη επίδραση στα σύγχρονα μοντέλα βαθιάς μάθησης βασίστηκαν στην καταγραφή της δραστηριότητας των νευρώνων στις γάτες. Παρατήρησαν πως

⁶⁶ Ian Goodfellow et al., *Deep Learning*, (MIT Press, 2016), 330-372.

οι νευρώνες στον εγκέφαλο της γάτας ανταποκρίνονται σε εικόνες που προβάλλονται σε οθόνη σε συγκεκριμένες τοποθεσίες μπροστά στη γάτα. Η σημαντικότερη ανακάλυψή τους ήταν ότι οι νευρώνες του πρώιμου οπτικού συστήματος ανταποκρίνονται πιο έντονα σε πολύ συγκεκριμένα μοτίβα φωτός, ενώ μετά δυσκολία ανταποκρίνονται σε όλα τα υπόλοιπα μοτίβα⁶⁷.

Η περιοχή του εγκεφάλου που ονομάζεται πρωτογενής οπτικός φλοιός, είναι η πρώτη που ξεκινά να εκτελεί σημαντικά προχωρημένη επεξεργασία του οπτικού ερεθίσματος. Θα μπορούσαμε να το παρομοιάσουμε με το φως, που φτάνοντας στα μάτια διεγείρει τον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Οι νευρώνες του αμφιβληστροειδή χιτώνα εκτελούν κάποια απλή επεξεργασία της εικόνας, αλλά δεν αλλάζουν σημαντικά τον τρόπο που παριστάνεται. Η εικόνα στη συνέχεια περνάει από το οπτικό νεύρο και την περιοχή του εγκεφάλου που ονομάζεται έξω πλευρικός γονατώδης πυρήνας. Ο κύριος ρόλος αυτών των δύο ανατομικών περιοχών είναι απλά να μεταφέρουν το σήμα από το μάτι στον πρωτογενή οπτικό φλοιό⁶⁸.

Ένα επίπεδο του CNN είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να συλλάβει τρεις ιδιότητες του πρωτογενούς οπτικού φλοιού: α) ο οπτικός φλοιός είναι ταξινομημένος χωρικά και έχει δισδιάστατη δομή αντικατοπτρίζοντας τη δομή της εικόνας στον αμφιβληστροειδή χιτώνα. Τα CNNs συλλαμβάνουν αυτή την ιδιότητα έχοντας ορισμένα από τα χαρακτηριστικά τους σε δισδιάστατους χάρτες, β) ο οπτικός φλοιός περιέχει πολλά απλά κύτταρα. Οι ανιχνευτικές μονάδες των CNNs είναι σχεδιασμένες έτσι ώστε να μιμούνται τις ιδιότητες των απλών κυττάρων, γ) ο οπτικός φλοιός περιλαμβάνει επίσης πολλά πολύπλοκα κύτταρα, που ανταποκρίνονται σε παρόμοια χαρακτηριστικά με εκείνα που εντοπίστηκαν στα απλά κύτταρα, όμως είναι αμετάβλητα στις μικρές αλλαγές θέσης των χαρακτηριστικών και σε κάποιες αλλαγές του φωτός. Αυτή η αμεταβλητότητα έχει εμπνεύσει κάποιες από τις στρατηγικές συγκέντρωσης (pooling) ανάμεσα στα κανάλια των CNNs. Αυτή η στρατηγική της ανίχνευσης, ακολουθούμενη από συγκέντρωση, εφαρμόζεται επανειλημμένα καθώς προχωράμε βαθύτερα στον εγκέφαλο, ώσπου τελικά υπάρχουν κύτταρα που ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες έννοιες και είναι αμετάβλητα σε πολλές μεταμορφώσεις του ερεθίσματος. Αυτά τα κύτταρα βρίσκονται στην περιοχή του

⁶⁷ Goodfellow, 2016, ό.π.

⁶⁸ Goodfellow, 2016, ό.π.

εγκεφάλου που ονομάζεται έσω κροταφικός λοβός. Οι νευρώνες του έσω κροταφικού λοβού είναι πιο γενικοί από τα σύγχρονα CNNs, τα οποία δε θα μπορούσαν αυτόματα να γενικεύσουν αναγνωρίζοντας ένα άτομο ή αντικείμενο μόνο διαβάζοντας το όνομά του. Η πλησιέστερη αναλογία των χαρακτηριστικών του τελευταίου επιπέδου του CNN είναι με την περιοχή του εγκεφάλου που ονομάζεται κάτω κροταφικός φλοιός⁶⁹.

Όλα αυτά δείχνουν σε γενικές γραμμές πως λειτουργούν τα CNNs και σε ποιο βαθμό ο σχεδιασμός τους έχει εμπνευστεί από τη μελέτη του οπτικού συστήματος των θηλαστικών. Φαίνεται, όμως, ότι υπάρχουν και αρκετές διαφορές, κάποιες από τις οποίες γνωστές στην υπολογιστική νευροεπιστήμη, ενώ άλλες όχι αφού υπάρχουν ακόμη ανοιχτά ερωτήματα όσον αφορά στη λειτουργία του οπτικού συστήματος⁷⁰.

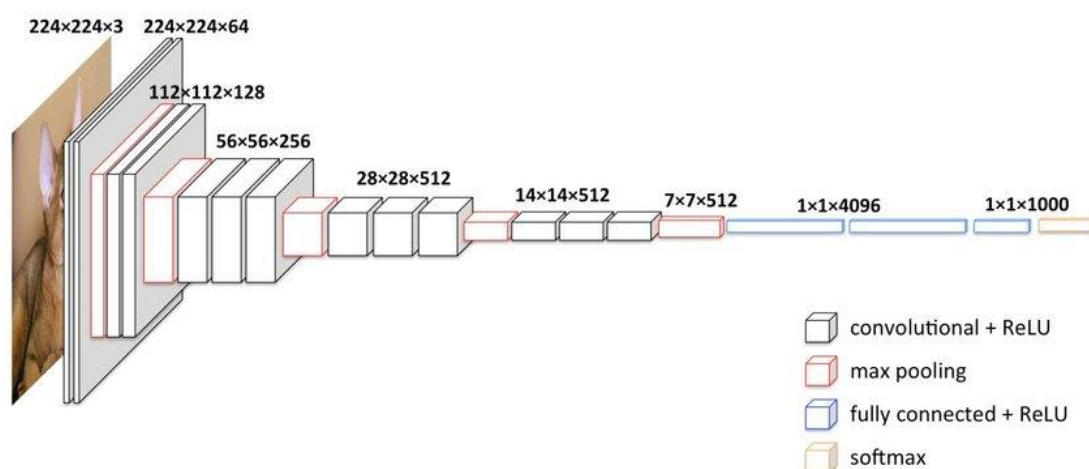
Συνοψίζοντας, το CNN είναι ένας αλγόριθμος βαθιάς μάθησης που λαμβάνοντας μια εικόνα εισόδου μπορεί να αποδώσει σημασία (μαθησιακά βάρη και πόλωση) σε διάφορες πτυχές-αντικείμενα της εικόνας και να τα διαφοροποιήσει. Η προεργασία που απαιτείται από ένα CNN είναι πολύ λιγότερη σε σύγκριση με άλλους αλγόριθμους ταξινόμησης. Ενώ στις παλαιότερες μεθόδους τα φίλτρα κατασκευάζονταν με το χέρι και κατόπιν αρκετής εκπαίδευσης, τα CNNs έχουν τη δυνατότητα να μαθαίνουν αυτά τα φίλτρα. Η αρχιτεκτονική των CNNs είναι παρόμοια με αυτή της συνδεσιμότητας των νευρώνων στον ανθρώπινο εγκέφαλο και είναι εμπνευσμένη από την οργάνωση του οπτικού φλοιού. Τα CNNs έχουν τη δυνατότητα να συλλαμβάνουν τις χωρικές και χρονικές εξαρτήσεις σε μια εικόνα μέσα από την εφαρμογή ανάλογων φίλτρων. Η αρχιτεκτονική τους επιτυγχάνει καλύτερη εφαρμογή σε ένα σύνολο δεδομένων με εικόνες, εξαιτίας της μείωσης των αναγκαίων παραμέτρων και την επαναχρησιμοποίηση μαθησιακών βαρών. Έτσι, μπορούν να εκπαιδευτούν ώστε να κατανοήσουν καλύτερα την πολυπλοκότητα των εικόνων. Ο ρόλος των CNNs είναι να περιορίσουν τις εικόνες σε μια μορφή που είναι ευκολότερη για επεξεργασία, χωρίς όμως να χάνονται τα χαρακτηριστικά που είναι κρίσιμα για μια καλή πρόβλεψη. Αυτό είναι σημαντικό για το σχεδιασμό μιας αρχιτεκτονικής, η οποία δεν είναι μόνο καλή στο να μαθαίνει χαρακτηριστικά αλλά μπορεί να διευρυνθεί σε τεράστιες συλλογές δεδομένων. Ο στόχος της συνελικτικής

⁶⁹ Goodfellow, 2016, ό.π.

⁷⁰ Goodfellow, 2016, ό.π.

μεθόδου είναι να αποσπάσει χαρακτηριστικά υψηλού επιπέδου από μια εικόνα, όπως τα όρια. Τα CNNs δεν περιορίζονται μόνο σε ένα επίπεδο συνέλιξης. Συνήθως, το πρώτο επίπεδο συνέλιξης είναι υπεύθυνο για την αποτύπωση των χαρακτηριστικών χαμηλού επιπέδου, όπως τα όρια, το χρώμα, τον προσανατολισμό των διαβαθμίσεων κλπ. Με την προσθήκη επιπλέον επικαλύψεων, η αρχιτεκτονική προσαρμόζεται στα χαρακτηριστικά υψηλού επιπέδου, δίνοντάς μας ένα δίκτυο το οποίο έχει πλήρη κατανόηση των εικόνων στο σύνολο δεδομένων, παρόμοια με αυτή που έχουν οι άνθρωποι⁷¹.

Μετά τα στρώματα συνέλιξης, υπάρχει το pooling layer (max pooling ή average pooling) που είναι υπεύθυνο για τη μείωση του χωρικού μεγέθους των συνελιγμένων χαρακτηριστικών. Αυτό συμβαίνει προκειμένου να μειωθεί η υπολογιστική δύναμη που απαιτείται για την επεξεργασία των δεδομένων μέσα από τη μείωση των διαστάσεων. Επιπλέον, είναι χρήσιμο για την εξαγωγή των κυρίαρχων χαρακτηριστικών, τα οποία είναι αμετάβλητα στην περιστροφή και τη θέση, γι' αυτό διατηρείται η διαδικασία της αποτελεσματικής εκπαίδευσης του μοντέλου⁷².



Εικόνα 19. Παράδειγμα αρχιτεκτονικής συνελκτικού δικτύου⁷³

Τα CNNs έπαιξαν σημαντικό ρόλο στην ιστορία της βαθιάς μάθησης. Ήταν τα πρώτα μοντέλα που εκπαιδεύτηκαν με οπισθοδιάδοση, καθώς και τα πρώτα με καλές επιδόσεις πολύ πριν τα βαθιά μοντέλα θεωρηθούν βιώσιμα. Ήταν, επίσης, τα πρώτα

⁷¹ Goodfellow, 2016, ό.π.

⁷² Goodfellow, 2016, ό.π.

⁷³ Πηγή: Bibo Shi et al., "Learning better deep features for the prediction of occult invasive disease in ductal carcinoma in situ through transfer learning", *Medical Imaging 2018: Computer-Aided Diagnosis*. Vol. 10575, International Society for Optics and Photonics, 2018.

μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν σε εμπορικές εφαρμογές για να λύσουν σοβαρά προβλήματα, ενώ συνεχίζουν μέχρι σήμερα να παραμένουν στο προσκήνιο της βαθιάς μάθησης. Για παράδειγμα τη δεκαετία του '90 η AT&T ανέπτυξε ένα CNN που μπορούσε να διαβάζει επιταγές, ενώ αργότερα αναπτύχθηκαν από τη Microsoft εφαρμογές αναγνώρισης γραφικών χαρακτήρων που βασίζονταν σε CNNs⁷⁴.

Η ανάπτυξη και εξαιρετική επιτυχία των CNNs έδωσαν τρομερή ώθηση στον τομέα της επιστήμης των υπολογιστών που ονομάζεται Computer Vision. Η γνώση που προέκυψε έχει βρει εφαρμογή σε μια πληθώρα εφαρμογών, όπως η αναγνώριση εικόνων και βίντεο, η ανάλυση εικόνων και η ταξινόμηση, η επαναδημιουργία καλλιτεχνικών και εκφραστικών μέσων. Πολλές από αυτές τις εφαρμογές έχουν ενσωματωθεί στα εμπορικά λογισμικά που χρησιμοποιούνται για καλλιτεχνική δημιουργία.

⁷⁴ Goodfellow, 2016, ό.π.

iii. Παραγωγικά Ανταγωνιστικά Δίκτυα (Generative Adversarial Networks)

Τα Παραγωγικά Ανταγωνιστικά Δίκτυα (Generative Adversarial Networks – GANs) αποτελούν μια εντυπωσιακή πρόσφατη καινοτομία στη μηχανική μάθηση. Δημιουργήθηκαν και παρουσιάστηκαν από τον Ian Goodfellow και συνεργάτες του από το πανεπιστήμιο του Μόντρεαλ το 2014⁷⁵. Είναι παραγωγικά μοντέλα, δηλαδή δημιουργούν νέα παραδείγματα δεδομένων που μοιάζουν με τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευσή τους. Μπορούν, για παράδειγμα, να δημιουργήσουν εικόνες που μοιάζουν με πρόσωπα ανθρώπων, παρά το γεγονός ότι τα πρόσωπα αυτά δεν ανήκουν σε πραγματικά άτομα.



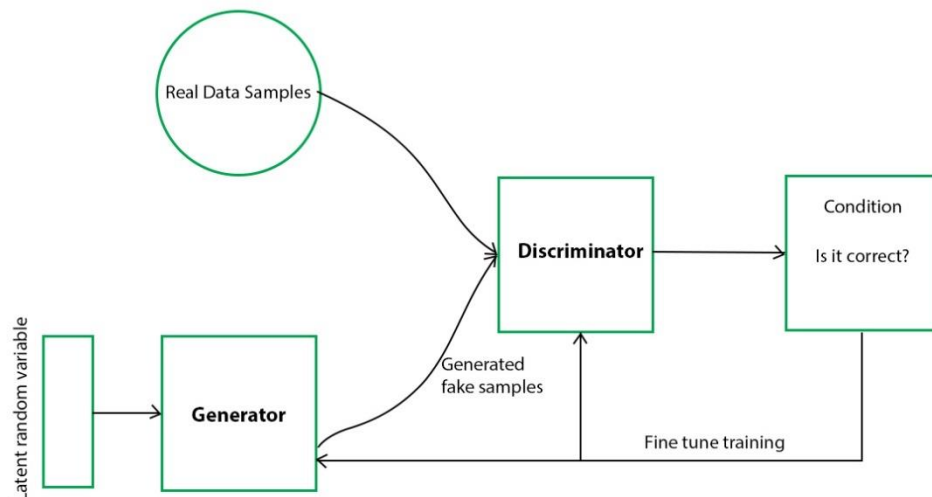
Εικόνα 20. Φωτορεαλιστικές εικόνες προσώπων που δημιουργήθηκαν από ερευνητές της Nvidia⁷⁶

Τα GANs αποτελούν άλλη μια προσέγγιση παραγωγικού μοντέλου που βασίζεται σε διαφοροποιήσιμα δίκτυα γεννητριών. Βασίζονται σε ένα σενάριο της θεωρίας παιγνίων, στο οποίο το δίκτυο γεννήτρια πρέπει να συναγωνίζεται με ένα αντίπαλο. Το δίκτυο γεννήτρια (generator) παράγει απευθείας δείγματα. Το αντίπαλό του (discriminator network) προσπαθεί να διακρίνει ανάμεσα στα δείγματα που παράγονται από τα δεδομένα εκπαίδευσης και τα δείγματα που είναι της γεννήτριας. Το αντίπαλο δίκτυο βγάζει μια τιμή, που δείχνει την πιθανότητα που υπάρχει ένα δεδομένο δείγμα να είναι πραγματικό δείγμα εκπαίδευσης ή ένα ψεύτικο δείγμα που δημιουργήθηκε από το μοντέλο. Ο πιο απλός τρόπος να διαμορφωθεί η μάθηση στα GANs είναι ως ένα παιχνίδι μηδενικού αθροίσματος, στο οποίο μια συνάρτηση καθορίζει την απόδοση του generator και του discriminator. Κατά τη διάρκεια της μάθησης, ο κάθε παίχτης προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την απόδοσή του έτσι ώστε

⁷⁵ Ian J. Goodfellow et al., "Generative adversarial networks", *arXiv preprint arXiv:1406.2661* (2014).

⁷⁶ Tero Karras et al., "Progressive growing of GANs for improved quality, stability, and variation", *arXiv preprint arXiv:1710.10196* (2017).

να υπάρξει σύγκλιση. Αυτό οδηγεί τον discriminator στο να προσπαθεί να μάθει σωστά να ταξινομεί τα δείγματα ως αληθινά ή ψεύτικα. Ταυτόχρονα, ο generator προσπαθεί να ξεγελάσει τον discriminator κάνοντάς τον να πιστέψει ότι τα δείγματά του είναι αληθινά. Στη σύγκλιση, τα δείγματα του generator δεν ξεχωρίζουν από τα αληθινά δεδομένα και ο discriminator δίνει σε όλα 50% πιθανότητα. Τότε ο discriminator μπορεί να απορριφθεί⁷⁷.



Εικόνα 21. Η δομή των GANs (Πηγή: <https://www.geeksforgeeks.org>)

Λόγω των εντυπωσιακών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα GANs, από τότε που πρωτοεμφανίστηκαν μέχρι σήμερα έχει δημοσιευθεί ένα πολύ μεγάλο πλήθος αλγορίθμων με διαφορετικές παραλλαγές και δυνατότητες, ενώ χρησιμοποιείται ιδιαίτερα σε καλλιτεχνικές εφαρμογές. Μεταξύ άλλων έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή εικαστικών έργων, σε παραγωγή χαρακτήρων για τηλεοπτικές σειρές ή χαρακτήρες κινουμένων σχεδίων, παραγωγή ρεαλιστικών φωτογραφιών, επεξεργασία εικόνων, αναβάθμιση ανάλυσης εικόνων, παραγωγή τρισδιάστατων αντικειμένων, επεξεργασία χαρακτηριστικών προσώπου (face aging), μετατροπή φωτογραφιών σε emojis, επιχρωματισμός φωτογραφιών, video prediction.

⁷⁷ Goodfellow, 2014, ό.π.

iv. Επαναλαμβανόμενα Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks)

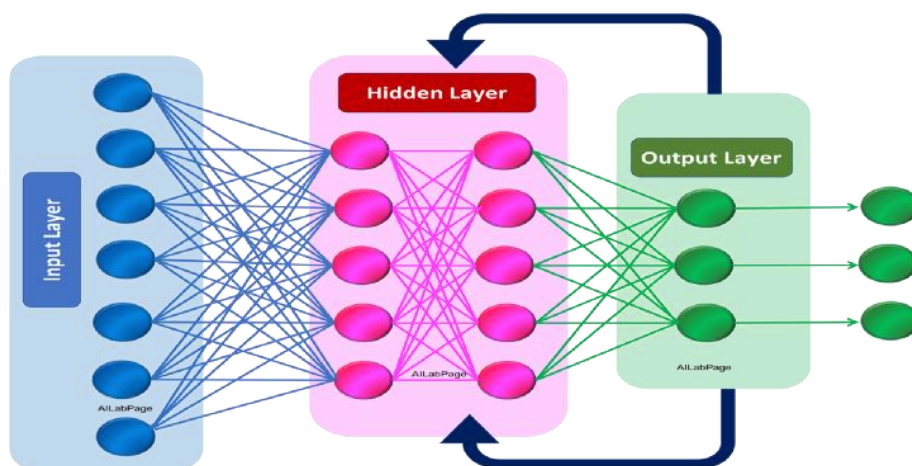
Τα Επαναλαμβανόμενα Νευρωνικά Δίκτυα (RNNs) είναι μια οικογένεια νευρωνικών δικτύων για την επεξεργασία σειριακών δεδομένων (sequential data). Ενώ τα συνελκτικά δίκτυα (CNNs) είναι νευρωνικά δίκτυα που εξειδικεύονται στην επεξεργασία ενός πλέγματος τιμών, όπως για παράδειγμα μια εικόνα, τα RNNs εξειδικεύονται στην επεξεργασία μιας ακολουθίας τιμών. Όπως τα CNNs μπορούν να κλιμακωθούν για εικόνες μεγάλων διαστάσεων, τα RNNs μπορούν να κλιμακωθούν σε πολύ μεγαλύτερες ακολουθίες, κάτι το οποίο δε θα ήταν πρακτικό για δίκτυα που δεν διαθέτουν εξειδίκευση σε ακολουθίες τιμών⁷⁸.

Η μετάβαση από τα πολυεπίπεδα στα επαναλαμβανόμενα δίκτυα είναι δυνατή χάρη στην αξιοποίηση μιας από τις πρώιμες ιδέες της δεκαετίας του '80 για τη μηχανική μάθηση και τα στατιστικά μοντέλα, που είναι ο διαμοιρασμός των παραμέτρων ανάμεσα στα διάφορα μέρη ενός μοντέλου. Αυτός ο διαμοιρασμός δίνει τη δυνατότητα στο μοντέλο να επεκταθεί και να εφαρμοστεί σε διαφορετικά μήκη ακολουθιών κάνοντας γενικεύσεις κατά μήκος τους. Σε διαφορετική περίπτωση, δε θα ήταν δυνατή η γενίκευση σε μήκη ακολουθιών, τα οποία δε θα είχαν χρησιμοποιηθεί κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, αλλά ούτε και να διαμοιραστεί η στατιστική ισχύς ανάμεσα σε διαφορετικά μήκη ακολουθιών και ανάμεσα σε διαφορετικές θέσεις στο χρόνο. Ο διαμοιρασμός είναι ιδιαίτερα σημαντικός όταν μια συγκεκριμένη πληροφορία εμφανίζεται σε πολλές θέσεις μέσα σε μια ακολουθία. Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι έχουμε τις προτάσεις «Πήγα στην Κέρκυρα το 2015» και «Το 2015 πήγα στην Κέρκυρα». Αν ζητήσουμε από ένα μοντέλο μηχανικής μάθησης να διαβάσει τις δύο προτάσεις και να εξάγει το έτος κατά το οποίο ο αφηγητής πήγε στην Κέρκυρα, θα θέλαμε να αναγνωρίσει το έτος 2015 ως τη ζητούμενη πληροφορία, ανεξάρτητα από τη θέση στην οποία εμφανίζεται μέσα στην πρόταση. Αν υποθέσουμε ότι εκπαιδεύαμε ένα πλήρως συνδεδεμένο δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης που επεξεργάζεται προτάσεις συγκεκριμένου μήκους, θα είχε διαφορετικές παραμέτρους για κάθε χαρακτηριστικό εισόδου, οπότε θα έπρεπε να μάθει όλους τους γλωσσικούς κανόνες ξεχωριστά για κάθε θέση της λέξης μέσα

⁷⁸ Goodfellow, 2016, 373-420.

στην πρόταση. Αντίθετα, ένα επαναλαμβανόμενο δίκτυο μοιράζεται τα ίδια μαθησιακά βάρη σε πολλές χρονικές στιγμές⁷⁹.

Τα RNNs διαμοιράζονται τις παραμέτρους με τον εξής τρόπο: κάθε μέρος της εξόδου είναι μια συνάρτηση των προηγούμενων μερών της εξόδου. Κάθε μέρος της εξόδου παράγεται χρησιμοποιώντας τον ίδιο κανόνα επικαιροποίησης που είχε εφαρμοστεί και στις προηγούμενες εξόδους. Αυτή η επαναλαμβανόμενη διαμόρφωση καταλήγει στον διαμοιρασμό των παραμέτρων μέσα από έναν πολύ βαθύ υπολογιστικό γράφο. Συνήθως τα RNNs λειτουργούν σε μικρά υποσύνολα ακολουθιών που περιέχουν διανύσματα, όπου το χρονικό βήμα κυμαίνεται, ενώ υπάρχει διαφορετική ακολουθία μήκους για κάθε μέρος του υποσυνόλου. Ο δείκτης του χρονικού βήματος δεν αναφέρεται κυριολεκτικά στο πραγματικό πέρασμα του χρόνου, μερικές φορές αναφέρεται μόνο στη θέση μέσα στην ακολουθία. Τα RNNs μπορούν επίσης να εφαρμοστούν σε δύο διαστάσεις κατά μήκος χωρικών δεδομένων, όπως οι εικόνες. Όταν εφαρμόζονται σε δεδομένα που περιέχουν χρόνο, το δίκτυο μπορεί να έχει συνδέσεις που πηγαίνουν πίσω στο χρόνο, δεδομένου ότι ολόκληρη η ακολουθία παρατηρείται πριν να δοθεί στο δίκτυο⁸⁰.



Εικόνα 22. Η αρχιτεκτονική των RNNs (Πηγή: <https://medium.com/>)

Τα RNNs μπορούν να δομηθούν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους. Όπως σχεδόν κάθε συνάρτηση μπορεί να θεωρηθεί ως νευρωνικό δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης (feed-forward), στην ουσία κάθε συνάρτηση που περιλαμβάνει επανάληψη μπορεί να θεωρηθεί ως επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο⁸¹.

⁷⁹ Goodfellow, 2016, ό.π.

⁸⁰ Goodfellow, 2016, ό.π.

⁸¹ Goodfellow, 2016, ό.π.

Τα RNNs ονομάζονται επαναλαμβανόμενα επειδή εκτελούν την ίδια εργασία για κάθε στοιχείο μιας ακολουθίας, ενώ η έξοδος εξαρτάται από τους προηγούμενους υπολογισμούς. Τα RNNs έχουν ένα είδος μνήμης που συλλαμβάνει πληροφορίες για οτιδήποτε έχει υπολογιστεί μέχρι κάποια συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Θεωρητικά, μπορούν να χρησιμοποιήσουν πληροφορίες από αυθαίρετα μεγάλες ακολουθίες, αλλά στην πράξη περιορίζονται στο να μπορούν να γνωρίζουν μόνο λίγα από τα προηγούμενα βήματα. Η δομή που κυριαρχεί στον υπολογισμό που γίνεται στα RNNs είναι η εξής: α) η είσοδος σε κάθε δεδομένη στιγμή, β) η κρυφή κατάσταση (hidden state) σε κάθε δεδομένη στιγμή που λειτουργεί ως «μνήμη» του δικτύου και υπολογίζεται με βάση την προηγούμενη κρυφή κατάσταση και την είσοδο του τρέχοντος βήματος, γ) η έξοδος σε κάθε χρονική στιγμή⁸².

Τα πιο αποτελεσματικά RNNs μοντέλα που χρησιμοποιούνται σήμερα σε πρακτικές εφαρμογές της βαθιάς μάθησης ονομάζονται gated RNNs. Σε αυτά περιλαμβάνονται τα δίκτυα Long Short-Term Memory (LSTMs) και τα δίκτυα που βασίζονται σε Gated Recurrent Units (GRUs). Τα δίκτυα αυτά προτάθηκαν για πρώτη φορά το 1997 από τους Sepp Hochreiter και Jurgen Schmidhuber και έχουν εφαρμογή ιδιαίτερα στον τομέα της νευρωνικής γλωσσικής επεξεργασίας (Neural Language Processing – NLP). Τα LSTMs σχεδιάστηκαν με τρόπο ώστε να καταπολεμούν το πρόβλημα των διαβαθμίσεων που εξαφανίζονται (vanishing gradients), ένα πρόβλημα που εμποδίζει τα απλά RNNs να μάθουν μακροπρόθεσμες εξαρτήσεις (long-term dependencies) και να “θυμούνται” παλαιότερες πληροφορίες⁸³.

Οι κυριότερες εφαρμογές των RNNs είναι στην επεξεργασία γλώσσας και παραγωγή κειμένων, αναγνώριση ομιλίας, μηχανική μετάφραση, δημιουργία λεζάντων για εικόνες, σύνοψη κειμένων, ανάλυση τηλεφωνικών κέντρων, αναγνώριση συναισθηματικού τόνου σε κείμενα, προσθήκη ετικετών σε βίντεο. Όσον αφορά ειδικότερα στην καλλιτεχνική δημιουργία χρησιμοποιούνται στη μουσική σύνθεση, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν χρησιμοποιηθεί για συγγραφή σεναρίων ή ως βοηθητικό εργαλείο για την επιλογή παραγωγής ταινιών.

⁸² Denny Britz, “Recurrent Neural Networks Tutorial, Part 1 – Introduction to RNNs”, *WILDML*, Sept 17, 2015

⁸³ Goodfellow, 2016, ό.π.

Μέρος 2°

Α. Ανάλυση επιλεγμένων τεχνολογιών για τη δημιουργία οπτικο-ακουστικού υλικού και πειραματικές εφαρμογές

ι. Επεξεργασία ήχου

Την τελευταία δεκαετία έχει πραγματοποιηθεί επισταμένη έρευνα στη δημιουργία συστημάτων που να μπορούν να διαχωρίζουν τις ηχητικές πηγές. Τέτοιου είδους συστήματα θα μπορούν να δέχονται ως είσοδο ένα ηχητικό σήμα, που αποτελεί μίξη, και να το αποσυνθέτουν στα ξεχωριστά μέρη που το αποτελούν.

Ο διαχωρισμός της ηχητικής πηγής έχει διαφορετικές αποκλίσεις και εξαρτάται από το σήμα στο οποίο δουλεύει το σύστημα. Τα συστήματα διαχωρισμού μουσικής παίρνουν ως είσοδο ένα τραγούδι και έχουν ως έξοδο ένα κομμάτι για καθένα από τα όργανα. Τα συστήματα ενίσχυσης της ομιλίας παίρνουν ως είσοδο θορυβώδη ομιλία και διαχωρίζουν το περιεχόμενο της ομιλίας από τον θόρυβο.

Αυτή η τεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε πολλούς διαφορετικούς τομείς που εκτείνονται από την ψυχαγωγία έως **το** βοηθήματα ακοής. Ένα παράδειγμα εφαρμογής, από εμπορικές εταιρείες όπως η Sony, είναι η επεξεργασία του ήχου σε παλιές κλασσικές ταινίες, όπου όλο το υλικό (διάλογοι, μουσική και ηχητικά εφέ) ήταν μιξαρισμένο σε ένα μονοφωνικό ή στερεοφωνικό αρχείο. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία, η οποία βασίζεται σε δίκτυα τεχνητής νοημοσύνης, μπορεί να πραγματοποιηθεί διαχωρισμός και αφού ληφθούν τα ξεχωριστά μέρη να μιξαριστούν σε πολυκάναλα ηχοσυστήματα.

Ένα από τα εργαλεία διαχωρισμού μουσικών πηγών είναι το Spleeter. Το Spleeter δημιουργήθηκε από την ερευνητική ομάδα της Γαλλικής εταιρείας Deezer και δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Journal of Open Source Software* τον Ιούνιο του 2020⁸⁴. Αποτελεί πλέον ανοιχτό λογισμικό, χρησιμοποιεί προεκπαιδευμένα μοντέλα και αναπτύχθηκε με τη βιβλιοθήκη Tensorflow.

⁸⁴ Romain Hennequin et al., "Spleeter: a fast and efficient music source separation tool with pre-trained models", *Journal of Open Source Software* 5.50 (2020): 2154.

Όπως αναφέρουν οι δημιουργοί του, σχεδιάστηκε με στόχο την ευκολία χρήσης, την απόδοση στο διαχωρισμό και την ταχύτητα. Με μια μόνο γραμμή εντολής μπορεί να διαχωρίσει ένα μουσικό ηχητικό αρχείο σε 2 (φωνητικά και ακομπανιαμέντο), 4 (φωνητικά, τύμπανα, μπάσο και άλλο) ή 5 στελέχη (φωνητικά, τύμπανα, μπάσο, πιάνο και άλλο) και είναι το πρώτο μοντέλο που προσφέρει τον επιπλέον διαχωρισμό για πιάνο⁸⁵. Επίσης, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εκπαίδευση μοντέλων διαχωρισμού ηχητικών πηγών ή για τη βελτίωση προεκπαιδευμένων με Tensorflow, αρκεί να υπάρχει κάποια συλλογή δεδομένων με απομονωμένες πηγές. Η επίδοση των προεκπαιδευμένων μοντέλων είναι πολύ κοντά στη δημοσιευμένη υπερσύγχρονη τεχνολογία και αποτελεί ένα από τα μοντέλα με την καλύτερη επίδοση στο διαχωρισμό τεσσάρων στελεχών, με σημείο αναφοράς τη συλλογή δεδομένων MUSDB18⁸⁶. Είναι επίσης πολύ γρήγορο, αφού μπορεί να διαχωρίσει ένα μιξαρισμένο ηχητικό αρχείο σε τέσσερα στελέχη 100 φορές πιο γρήγορα από ότι σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας μόνο μία μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU) και το προεκπαιδευμένο μοντέλο των τεσσάρων στελεχών⁸⁷.

Το Spleeter εκπαιδεύτηκε από τους δημιουργούς του σε ιδιωτική συλλογή δεδομένων και σε καμιά περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε η συλλογή MUSDB18. Παρόλα αυτά συναγωνίζεται σε επιδόσεις αντίστοιχα εργαλεία, τα οποία έχουν εκπαιδευτεί πάνω στη συλλογή MUSDB18 και έχει δημοσιευτεί μια συγκριτική επισκόπηση των επιδόσεων. Η συλλογή δεδομένων, πάνω στην οποία εκπαιδεύτηκε, δεν δημοσιεύτηκε για λόγους πνευματικής ιδιοκτησίας. Αντί αυτού, δημοσιεύτηκαν και δόθηκαν ως ανοιχτό λογισμικό τα προεκπαιδευμένα μοντέλα, ώστε να βοηθηθεί η ερευνητική κοινότητα Ανάκτησης Μουσικής Πληροφορίας (MIR) να το αξιοποιήσει σε διάφορες εργασίες MIR, όπως η ανάλυση φωνητικών, απομαγνητοφώνηση μουσικής, αναγνώριση τραγουδιστή, καθώς και σε οποιουδήποτε τύπου ταξινόμηση

⁸⁵ Hennequin, ό.π.

⁸⁶ Η συλλογή δεδομένων MUSDB18 αποτελείται από 150 μουσικά κομμάτια πλήρους διάρκειας από διαφορετικά μουσικά είδη μαζί με τα απομονωμένα στελέχη των τυμπάνων, μπάσου, φωνητικών κλπ. Μέχρι σήμερα είναι η μεγαλύτερη δημόσια διαθέσιμη συλλογή που χρησιμοποιείται για διαχωρισμό μουσικής. Η MUSDB18 αποτελεί σημείο αναφοράς (benchmark) για εργασίες διαχωρισμού μουσικής και είναι διαθέσιμη για ακαδημαϊκούς-ερευνητικούς σκοπούς. Zafar Rafii et al., *MUSDB18 - a corpus for music separation*, 2017, ff10.5281/zenodo.1117371.

⁸⁷ Hennequin, ό.π.

πολλαπλών ετικετών όπως: μουσικό είδος, διάθεση, εξαγωγή φωνητικών, αναγνώριση εξωφύλλου⁸⁸.

Τα προεκπαιδευμένα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται στο Spleeter, είναι U-net. Το U-net είναι αρχιτεκτονικής Συνελκτικού Νευρωνικού Δικτύου (CNN) με κωδικοποιητή/αποκωδικοποιητή και έχει εξαιρετικές επιδόσεις στη γρήγορη και ακριβή κατάτμηση εικόνων. Χρησιμοποιήθηκαν 12 επίπεδα U-net (6 για κωδικοποίηση και 6 για αποκωδικοποίηση) και ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Adam. Η απώλεια κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης είναι L1-norm ανάμεσα στην καλυμμένη είσοδο του φασματογραφήματος και την πηγή-στόχο του φασματογραφήματος⁸⁹.

Καθώς όλη η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί σε GPU και το μοντέλο βασίζεται σε αρχιτεκτονική CNN, το μοντέλο είναι πολύ γρήγορο. Για παράδειγμα, μπορεί να ξεχωρίσει σε τέσσερα στελέχη όλη την ομάδα ελέγχου της συλλογής δεδομένων MUSDB18 (διάρκειας τρεισήμισι περίπου ωρών) μέσα σε λιγότερο από 2 λεπτά χρησιμοποιώντας μια μόνο μονάδα επεξεργασίας γραφικών (GPU) και διπλή κεντρική μονάδα επεξεργασίας (CPU). Το Spleeter μπορεί να επεξεργαστεί 100 δευτερόλεπτα ήχου σε λιγότερο από ένα δευτερόλεπτο, κάτι το οποίο το καθιστά πολύ χρήσιμο για την αποτελεσματική επεξεργασία μεγάλων βάσεων δεδομένων⁹⁰.

Τα προεκπαιδευμένα μοντέλα του Spleeter έχουν ήδη ενσωματωθεί και χρησιμοποιούνται σε κάποιες εμπορικές εφαρμογές ήχου, όπως το RX8 της iZotope, την Acoustica της Acon Digital, στο VirtualDJ, στις εφαρμογές NeuralMix και dJAYPRO της Algoriddim⁹¹.

⁸⁸ Hennequin, ό.π.

⁸⁹ Hennequin, ό.π.

⁹⁰ Hennequin, ό.π.

⁹¹ Deezer, "Spleeter", *GitHub*, <https://github.com/deezer/spleeter>.

ii. Magenta

Magenta ονομάζεται το ερευνητικό έργο ελεύθερου λογισμικού, το οποίο δημιουργήθηκε από την Google με στόχο τη διερεύνηση του ρόλου της μηχανικής μάθησης ως εργαλείου στην δημιουργική διαδικασία. Εκτός από τους ερευνητές και τους μηχανικούς της ομάδας Google Brain, στο έργο έχουν συνεισφέρει σημαντικά και πολλά άλλα άτομα. Μέσα στα πλαίσια του Magenta, αναπτύσσονται νέοι αλγόριθμοι, βαθιάς και ενισχυτικής μάθησης, για τη δημιουργία τραγουδιών, εικόνων, σκίτσων και άλλων υλικών. Επιχειρείται, επίσης, μια εξερεύνηση στη δημιουργία έξυπνων εργαλείων και διεπαφών, που θα επιτρέπουν σε καλλιτέχνες και μουσικούς να επεκτείνουν τις μεθόδους τους χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα. Τα εργαλεία και τα μοντέλα δημιουργούνται με βάση τη βιβλιοθήκη TensorFlow και κυκλοφορούν ως ελεύθερο λογισμικό δημοσιευμένα σε αποθετήριο του GitHub⁹².

Στο Magenta περιλαμβάνονται διάφορα έργα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για τη δημιουργία μουσικής είτε τέχνης. Στην παρούσα εργασία θα αναφερθούμε αναλυτικότερα στο νευρωνικό δίκτυο NSynth (Neural Synthesizer), το οποίο αναπτύχθηκε το 2017 από μια ομάδα ερευνητών της Google⁹³. Το NSynth αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση στη μουσική σύνθεση και σχεδιάστηκε έτσι ώστε να αποτελέσει βοηθητικό εργαλείο στη δημιουργική διαδικασία και να δώσει νέες διαστάσεις στην ανθρώπινη έκφραση. Αυτό που το κάνει να διαφέρει από τα παραδοσιακά συνθεσάιζερς, που χρησιμοποιούν ταλαντωτές και wavetables, είναι ότι το NSynth χρησιμοποιεί βαθιά νευρωνικά δίκτυα για να παράγει ήχους μεμονωμένων δειγμάτων. Το γεγονός ότι το NSynth εκπαιδεύεται απευθείας από δεδομένα δίνει στους καλλιτέχνες έναν διαισθητικό έλεγχο πάνω στη χροιά και τη δυναμική, καθώς και τη δυνατότητα να διερευνήσουν νέους ήχους που θα ήταν δύσκολο ή και απίθανο να παράγουν με ένα κοινό συνθεσάιζερ. Οι ακουστικές ποιότητες των οργάνων που παράγονται εξαρτώνται από το μοντέλο και τα διαθέσιμα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του δικτύου⁹⁴. Με το NSynth παρέχονται βελτιώσεις τόσο στα δεδομένα εκπαίδευσης

⁹² Magenta, "Make Music and Art Using Machine Learning", <https://magenta.tensorflow.org/>.

⁹³ Jesse Engel et al., "Neural Audio Synthesis of Musical Notes with WaveNet Autoencoders", *International Conference on Machine Learning*, PMLR, 2017.

⁹⁴ Magenta, "NSynth: Neural Audio Synthesis", Apr 6, 2017, <https://magenta.tensorflow.org/nsynth>.

όσο και στο μοντέλο που χρησιμοποιείται. Πιο συγκεκριμένα, δημιουργήθηκε το σύνολο δεδομένων NSynth, το οποίο είναι μια μεγάλη συλλογή από μουσικές νότες με σχόλια, που έχουν δειγματοληπτηθεί από μεμονωμένα όργανα σε ένα μεγάλο εύρος τόνων και ταχυτήτων. Με περιεχόμενο περίπου 300 χιλιάδες νότες (η καθεμία με μοναδική οξύτητα, χροιά και περιβάλλουσα) από περίπου 1000 όργανα (από εμπορικές βιβλιοθήκες δειγμάτων), αποτελεί μια τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από άλλα αντίστοιχα δημόσια διαθέσιμα σύνολα δεδομένων. Το κίνητρο για τη δημιουργία αυτού του συνόλου δεδομένων ήταν το γεγονός ότι δίνει τη δυνατότητα παραγοντοποίησης της μουσικής σε νότες και άλλες μουσικές ποιότητες⁹⁵. Παρά το γεγονός ότι δεν είναι τέλεια, αυτή η παραγοντοποίηση βασίζεται, σύμφωνα με τους συγγραφείς, στον τρόπο με τον οποίο λειτουργούν τα μουσικά όργανα και είναι εκπληκτικά αποτελεσματική. Στην πραγματικότητα, μεγάλο μέρος της σύγχρονης μουσικής παραγωγής χρησιμοποιεί αυτή την παραγοντοποίηση χρησιμοποιώντας MIDI για την ακολουθία τόνων και λογισμικά συνθεσάιζερς για το ηχόχρωμα. Κάτι τέτοιο φυσικά λειτουργεί καλύτερα για κάποια όργανα από ότι σε άλλα, όπου η εξάρτηση της χροιάς από τόνο σε τόνο είναι περισσότερο εμφανής. Πηγή έμπνευσης για τη δημιουργία αυτής της συλλογής ήταν οι συλλογές δεδομένων που υπάρχουν για την αναγνώριση εικόνων και ο καθοριστικός ρόλος που έχουν παίζει για την πρόσφατη πρόοδο στη βαθιά μάθηση. Κατά παρόμοιο τρόπο με αυτόν, όπου πολλές συλλογές δεδομένων εστιάζουν σε ένα μόνο αντικείμενο για κάθε παράδειγμα, η συλλογή NSynth εστιάζει σε απλούς τόνους. Έτσι, αυτή η συλλογή θα μπορούσε να αποτελέσει σημείο αναφοράς για άλλες συλλογές υψηλότερης ποιότητας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για παραγωγή ή μεταγραφή μουσικής⁹⁶.

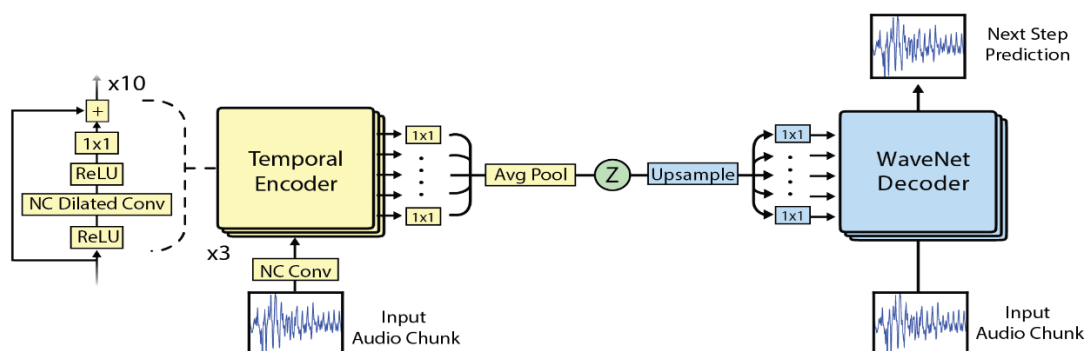
Το βελτιστοποιημένο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του δικτύου NSynth είναι ένα καινοτόμο μοντέλο αυτόματης κωδικοποίησης στο στυλ του WaveNet, το οποίο μαθαίνει τους κώδικες που ουσιαστικά αντιπροσωπεύουν τον χώρο των ήχων μουσικών οργάνων. Το WaveNet είναι ένα εκφραστικό μοντέλο για τοπικές ακολουθίες, όπως ο λόγος και η μουσική. Είναι ένα βαθύ αυτοπαλινδρομικό (autoregressive) δίκτυο διεσταλμένων συνελίξεων, που μοντελοποιεί τον ήχο ανά ένα δείγμα τη φορά, παρόμοια όπως ένα μη γραμμικό φίλτρο άπειρης κρουστικής

⁹⁵ Engel, ό.π. και Magenta, “NSynth”, ό.π.

⁹⁶ Magenta, “NSynth”, ό.π.

απόκρισης (IIR). Από τη στιγμή που το πλαίσιο αυτού του φίλτρου είναι περιορισμένο σε αρκετές χιλιάδες δείγματα, η μακροπρόθεσμη διάρθρωση απαιτεί ένα εξωτερικό σήμα-οδηγό. Προηγούμενη έρευνα του WaveNet έδειξε αυτά τα αποτελέσματα στην περίπτωση μετατροπής κειμένου σε ομιλία χρησιμοποιώντας τη μαθημένη γλωσσική ενσωμάτωση για να δημιουργήσει εντυπωσιακά αποτελέσματα⁹⁷.

Στην περίπτωση του NSynth, απομακρύνθηκε η ανάγκη μάθησης σε εξωτερικά χαρακτηριστικά με τη χρήση του αυτόματου κωδικοποιητή στο στυλ του WaveNet, που μαθαίνει τις δικές του προσωρινές ενσωματώσεις. Ο προσωρινός κωδικοποιητής μοιάζει πολύ με το WaveNet και έχει την ίδια δομή διεύρυνσης. Όμως, οι συνελίξεις του δεν είναι αιτιώδεις, γι' αυτό βλέπει ολόκληρο το πλαίσιο του μέρους της εισόδου⁹⁸. Μετά από τριάντα επίπεδα (layers) υπολογισμού, υπάρχει ένα τελικό που υπολογίζει τη μέση συγκέντρωση (average pooling) για να δημιουργήσει μια προσωρινή ενσωμάτωση 16 διαστάσεων για κάθε 512 δείγματα. Επομένως, οι ενσωματώσεις μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπυκνώνουν τα αρχικά δεδομένα 32 φορές⁹⁹.



Εικόνα 23. WaveNet-style autoencoder

Στη συνέχεια, εκπαιδεύεται ο απλός αποκωδικοποιητής WaveNet με αυτή την ενσωμάτωση, αφού γίνει αναδειγματοληψία στον αρχικό χρόνο εφαρμόζοντας συνέλιξη 1x1 και τελικά προσθέτοντας το αποτέλεσμα ως πόλωση σε καθένα από τα 30 επίπεδα του αποκωδικοποιητή. Το αξιοσημείωτο είναι πως αυτή η εκπαίδευση δεν είναι εξωτερική, αφού μαθαίνεται από το μοντέλο. Από τη στιγμή που οι ενσωματώσεις πολώνουν το αυτοπαλινδρονικό σύστημα, αυτό φαίνεται σαν μια

⁹⁷ Aaron van den Oord et al., "Wavenet: A generative model for raw audio", *arXiv preprint arXiv:1609.03499* (2016).

⁹⁸ Magenta, "NSynth", ό.π., και Engel, ό.π.

⁹⁹ Magenta, "NSynth", ό.π., και Engel, ό.π.

συνάρτηση-οδηγός για έναν μη γραμμικό ταλαντωτή. Αυτή η ερμηνεία επιβεβαιώνεται από το γεγονός ότι τα περιγράμματα μεγέθους των ενσωματώσεων μιμούνται εκείνα του ίδιου του ήχου¹⁰⁰.

Το αποτέλεσμα που παράγονται με τη χρήση αυτής της τεχνολογίας είναι μοναδικοί μουσικοί ήχοι, οι οποίοι συνδυάζουν τις σημαντικές διαστάσεις των αρχικών ήχων. Επιπλέον, οι μαθημένες ενσωματώσεις συλλαμβάνουν μόνο το τοπικό πλαίσιο, όπως ένα φασματογράφημα, κάτι το οποίο τους δίνει τελικά τη δυνατότητα να κάνουν γενικεύσεις. Παρά το γεγονός ότι το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε σύντομους απλούς τόνους, μπορεί να επανασυνθέσει επιτυχώς τόσο μια σειρά τόνων όσο και τόνους που διήρκεσαν περισσότερο από τρία δευτερόλεπτα. Επίσης, παρά το ότι ο αυτόματος κωδικοποιητής WaveNet προσθέτει περισσότερες αρμονικές στην αρχική χροιά, ακολουθεί τη βασική συχνότητα δύο οκτάβες πάνω και κάτω. Το γεγονός ότι δεν έχει δει ποτέ μια μετάβαση μεταξύ δύο τόνων είναι ξεκάθαρο, αφού η καλύτερη προσέγγισή του είναι ένα απαλό γκλισάντο ανάμεσά τους¹⁰¹.

Η εκπαίδευση όλων των μοντέλων έγινε με τον αλγόριθμο στοχαστικής απότομης καθόδου (Stochastic Gradient Descent) και τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης Adam. Το ποσοστό μάθησης ήταν σταθερό για τα μοντέλα αναφοράς, ενώ για το WaveNet ήταν ρυθμισμένο να ξεκινάει από ένα σημείο και να μειώνεται σταδιακά ανά ορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Επίσης, διαφορετικός ήταν ο αριθμός επαναλήψεων και το μέγεθος δειγμάτων εκπαίδευσης ανά επανάληψη για τα μοντέλα αναφοράς και το WaveNet¹⁰². Για καθεμία από τις νότες στα δεδομένα προστέθηκαν σχολιασμοί για τρεις επιπλέον πληροφορίες που βασίστηκαν σε έναν συνδυασμό ανθρώπινης εκτίμησης και ευρετικών αλγορίθμων: η μέθοδος παραγωγής ήχου (ακουστική, ηλεκτρονική ή συνθετική), η ευρύτερη οικογένεια στην οποία ανήκει το όργανο παραγωγής του τόνου, και οι ηχητικές ποιότητες του τόνου¹⁰³.

¹⁰⁰ Magenta, “NSynth”, ό.π., και Engel, ό.π.

¹⁰¹ Magenta, “NSynth”, ό.π., και Engel, ό.π.

¹⁰² Engel, ό.π.

¹⁰³ Engel, ό.π.

iii. Compositional Pattern Producing Networks (CPPNs)

Τα Δίκτυα Παραγωγής Συνθετικών Μοτίβων (CPPNs) παρουσιάστηκαν για πρώτη φορά το 2007 στο περιοδικό *Genetic Programming and Evolvable Machines*. Τα CPPNs προτείνουν μια καινοτόμο αφαιρετική μέθοδο της φυσικής ανάπτυξης. Δεδομένου ότι το φυσικό DNA μπορεί να κωδικοποιήσει την πολυπλοκότητα σε μια τεράστια κλίμακα, οι επιστήμονες, προσπαθώντας να πετύχουν μια παρόμοια αντιπροσωπευτική αποτελεσματικότητα με τους υπολογιστές, εφαρμόζουν την αναπτυξιακή κωδικοποίηση. Δημιουργούν, δηλαδή, κωδικοποιήσεις που αντιστοιχίζουν τον γενότυπο στον φαινότυπο μέσα από μια διαδικασία ανάπτυξης από ένα μικρό αρχικό σημείο σε μια ώριμη μορφή. Μια μεγάλη πρόκληση σε αυτή την προσπάθεια είναι να βρουν το σωστό επίπεδο αφαίρεσης της βιολογικής ανάπτυξης, ώστε να συλλάβουν τις απαραίτητες ιδιότητες χωρίς να προσθέτουν στοιχεία ανεπαρκή και μη απαραίτητα. Σε αντίθεση με τις μέχρι τότε αποδεκτές μεθόδους αφαίρεσης, τα CPPNs αντιστοιχίζουν τον φαινότυπο χωρίς τοπική διάδραση. Αυτό σημαίνει ότι καθένα από τα δομικά στοιχεία του φαινότυπου καθορίζεται ανεξάρτητα από οποιοδήποτε άλλο στοιχείο. Τα αποτελέσματα που παράγονται με τα CPPNs, μέσα από διαδραστική ανάπτυξη δισδιάστατων εικόνων, δείχνουν ότι μια τέτοια κωδικοποίηση μπορεί, παρόλα αυτά, να παράγει δομικά μοτίβα που συχνά αποδίδονται σε περισσότερο τυπικές μεθόδους αφαίρεσης. Αυτό δείχνει ότι η τοπική διάδραση ίσως να μην είναι απαραίτητη στις επιθυμητές ιδιότητες της φυσικής κωδικοποίησης με τον τρόπο που συνήθως θεωρείται¹⁰⁴.

Στο κέντρο του ενδιαφέροντος της τεχνητής νοημοσύνης βρίσκεται η αναπαράσταση, ενώ ιδιαίτερη έμπνευση αντλείται από τη βιολογία και ειδικότερα από τον τρόπο κωδικοποίησης του DNA. Γι' αυτό το λόγο, θεωρείται βέβαιο ότι η ανακάλυψη συστημάτων τόσο πολύπλοκων όσο ο άνθρωπος είναι δυνατή μόνο μέσα από μια εξαιρετικά αποτελεσματική κωδικοποίηση, όπως αυτή που υπάρχει στη φύση. Το κλειδί της φυσικής κωδικοποίησης είναι η ανάπτυξη, κατά την οποία το DNA αντιστοιχίζεται στον ώριμο φαινότυπο μέσα από μία διαδικασία ανάπτυξης, όπου ο φαινότυπος δημιουργείται σταδιακά. Η ανάπτυξη διευκολύνει την

¹⁰⁴ Kenneth O. Stanley, "Compositional pattern producing networks: A novel abstraction of development", *Genetic programming and evolvable machines* 8.2 (2007): 131-162.

επαναχρησιμοποίηση των γονιδίων, αφού το ίδιο γονίδιο μπορεί να ενεργοποιηθεί σε οποιαδήποτε τοποθεσία και σε οποιονδήποτε χρόνο κατά τη διαδικασία ανάπτυξης. Έτσι, ένας μικρός αριθμός γονιδίων μπορεί να κωδικοποιήσει έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό δομικών χαρακτηριστικών. Αυτή η παρατήρηση έχει εμπνεύσει ένα πεδίο έρευνας στην τεχνητή νοημοσύνη, με στόχο να βρεθεί η σωστή αφαίρεση της ανάπτυξης, ώστε ένας υπολογιστής που εκτελεί αναπτυξιακό αλγόριθμο να μπορεί να ανακαλύψει την πολυπλοκότητα σε φυσική κλίμακα. Ενώ υπάρχουν διάφοροι μέθοδοι αφαίρεσης που κυμαίνονται σε διαφορετικά επίπεδα, καμία από αυτές δεν έχει ανακαλύψει το μέγεθος της πολυπλοκότητας που υπάρχει στη φύση. Έτσι, το ενδιαφέρον παραμένει στη διερεύνηση των χαρακτηριστικών της αφαίρεσης που βελτιστοποιούν την αποτελεσματική κωδικοποίηση¹⁰⁵.

Η καινοτομία των CPPNs έγκειται στο ότι παρακάμπτουν την ισχυρή παράδοση της τοπικής διάδρασης και της προσωρινής εκδίπλωσης στην έρευνα της αναπτυξιακής κωδικοποίησης, ενώ με τον τρόπο κωδικοποίησης που προτείνεται φαίνεται πως είναι δυνατό να περιγραφούν απευθείας οι δομικές σχέσεις που προκύπτουν από τη διαδικασία ανάπτυξης, χωρίς όμως να προσομοιώνεται η ίδια η διαδικασία. Αντίθετα, η περιγραφή είναι κωδικοποιημένη μέσα από μια σύνθεση συναρτήσεων, καθεμία από τις οποίες βασίζεται σε παρατηρούμενα διαβαθμισμένα μοτίβα σε φυσικά έμβρυα¹⁰⁶.

Τα CPPNs είναι δομικά παρόμοια με τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs), γι' αυτό επωφελούνται από τις προϋπάρχουσες αποτελεσματικές μεθόδους για εξελισσόμενα νευρωνικά δίκτυα. Για την ακρίβεια, χρησιμοποιείται με ελάχιστη διαφοροποίηση η μέθοδος της Νευροεξέλιξης Επαυξητικών Τοπολογιών (Neuroevolution of Augmenting Topologies - NEAT). Με αυτό τον τρόπο είναι δυνατό να αναπτυχθούν πολύπλοκοι φαινότυποι μοτίβων, που είναι σύνθετα και εκλεπτυσμένα μετά από γενιές, ενώ είναι ολοκληρωμένα με συμμετρίες και ομαλότητα¹⁰⁷.

Ο στόχος παρουσίασης των CPPNs ήταν να καθιερωθούν ως μια έγκυρη μέθοδος της φυσικής αναπτυξιακής κωδικοποίησης. Προκειμένου να αποδειχθεί

¹⁰⁵ Stanley, ό.π.

¹⁰⁶ Stanley, ό.π.

¹⁰⁷ Stanley, ό.π.

αυτός ο ισχυρισμός χρησιμοποιήθηκε μια καινοτόμος πειραματική προσέγγιση, ώστε να αναλυθούν τα χαρακτηριστικά της γονιδιακής κωδικοποίησης. Μέσω διαδραστικών εφαρμογών αναπτυξιακού υπολογισμού, ο χρήστης επέλεγε τους γονείς της νέας γενιάς και αυτοί χρησιμοποιούνταν ώστε να παραχθούν παραδείγματα διαφόρων δομικών μοτίβων και συνθέσεων της φύσης. Σε όλα αυτά τα μοτίβα παρατηρούνται τα χαρακτηριστικά των μοτίβων της ανάπτυξης που υπάρχουν και στους φυσικούς οργανισμούς: επανάληψη, επανάληψη με διαφοροποίηση, συμμετρία, ατελής συμμετρία, ανεπτυγμένη ομαλότητα, διατήρηση της ομαλότητας. Θεωρήθηκε ότι έτσι επικυρώνεται ο ισχυρισμός πως τα CPPNs αποτελούν μια έγκυρη αφαίρεση της φυσικής αναπτυξιακής κωδικοποίησης και ότι μπορούν να αναπτύσσουν ολοένα και περισσότερο πολύπλοκα μοτίβα. Από την άλλη, εικάζεται πως μια τέτοια παραδοχή μπορεί να δώσει νέες διαστάσεις και κατευθύνσεις στο πεδίο έρευνας της αναπτυξιακής κωδικοποίησης¹⁰⁸.

Η προσέγγιση των CPPNs παρακινείται από τα χαρακτηριστικά των μοτίβων που παράγονται από τη φυσική εξέλιξη. Η κεντρική τους ιδέα είναι πως η τοπική διάδραση και η σταδιακή εκδίπλωση είναι προϋποθέσεις μόνο στην κωδικοποίηση του φυσικού σύμπαντος. Όταν οι φυσικοί περιορισμοί αίρονται, τότε μπορούν να παραλειφθούν. Στα CPPNs ο φαινότυπος εννοείται ως κατανομή σημείων σε έναν πολυδιάστατο Καρτεσιανό χώρο και περιγράφεται ως μια συνάρτηση n διαστάσεων, όπου n είναι ο αριθμός των διαστάσεων στον φυσικό κόσμο. Για κάθε συντεταγμένη, η παρουσία ή η απουσία ενός σημείου ή το επίπεδο παράστασής του είναι η έξοδος της συνάρτησης που περιγράφει τον φαινότυπο¹⁰⁹.

Μια σημαντική λειτουργία στα πρώτα στάδια της ανάπτυξης στη φυσική εμβρυογένεση είναι ο καθορισμός ενός πλαισίου συντεταγμένων, δηλαδή ένα σύνολο εικονικών αξόνων συντεταγμένων, πάνω στους οποίους θα βασιστούν τα μελλοντικά στάδια ανάπτυξης. Με παρόμοιο τρόπο νοούνται οι άξονες x , y σε ένα απλό σύστημα συντεταγμένων που θεωρούνται ως το σημείο εκκίνησης για τη γενετική λειτουργία των CPPNs. Αφού καθοριστούν οι αρχικοί άξονες, στη συνέχεια μπορούν να τοποθετηθούν κατάλληλα νέα πλαίσια συντεταγμένων για τα υπόλοιπα μέρη του σώματος. Με αυτό τον τρόπο οι βαθμίδες που ορίζουν τα προηγούμενα

¹⁰⁸ Stanley, ό.π.

¹⁰⁹ Stanley, ό.π.

πλαίσια συντεταγμένων αποτελούν εισόδους σε μελλοντικές τοποθετήσεις που παράγουν περισσότερα τοπικά πλαίσια συντεταγμένων. Με αυτό τον τρόπο, μέσα από τη σύνθεση συναρτήσεων αναπαρίστανται τα πλαίσια συντεταγμένων της φυσικής ανάπτυξης, δείχνοντας ότι τα νέα πλαίσια συντεταγμένων αναδύονται από τα ήδη προϋπάρχοντα. Ένας τρόπος να αναπαρασταθεί η σύνθεση πολλών συναρτήσεων είναι ένα συνδεδεμένο γράφημα. Οι αρχικοί άξονες συντεταγμένων παρέχονται σαν είσοδοι στο γράφημα. Το επόμενο επίπεδο κόμβων μπορεί να θεωρηθεί ως περιγραφή των πρώτων σταδίων ανάπτυξης, όπως η καθιέρωση της αμφοτερόπλευρης συμμετρίας. Τα υψηλότερα επίπεδα κόμβων καθιερώνουν αυξανόμενα εκλεπτυσμένα πλαίσια συντεταγμένων. Έτσι, οι τελικοί έξοδοι έχουν βάση όλα τα δεδομένα των προηγούμενων μετασχηματισμών που λαμβάνουν χώρα προηγουμένως. Με αυτό τον τρόπο ολόκληρο το γράφημα είναι σαν ένα διάγραμμα των σταδίων που πραγματοποιούνται κατά την αναπτυξιακή χρονολογία. Η παροχή των αρχικών αξόνων συντεταγμένων σαν είσοδο στο γράφημα είναι αυτό που επιτρέπει τον περιορισμό της τοπικής διάδρασης¹¹⁰.

Κατά έναν πολύ ενδιαφέροντα τρόπο, το γράφημα αυτών των συνθέσεων μοιάζει πολύ με ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με τυχαία τοπολογία. Η μόνη διαφορά ανάμεσά τους είναι ότι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούν συνήθως σιγμοειδή συνάρτηση (και μερικές φορές συνάρτηση Gaussian) ως συνάρτηση ενεργοποίησης για κάθε κόμβο, ενώ το γράφημα σύνθεσης συναρτήσεων μπορεί να χρησιμοποιεί οποιαδήποτε από μια ποικιλία συναρτήσεων. Έτσι, τα CPPNs αναφέρονται σε δομές γραφημάτων που περιγράφουν συνθέσεις συναρτήσεων με σκοπό να παράγουν κανονικά μοτίβα. Οι συντεταγμένες κάθε σημείου στον Καρτεσιανό χώρο είναι είσοδοι στο CPPN και η έξοδός τους ορίζει τι θα έπρεπε να υπάρχει σε εκείνο το σημείο στον χώρο. Τα CPPNs μπορούν να εξελιχθούν με ένα τρόπο που διατηρεί την αναλογία με την ανάπτυξη: τα κύρια χαρακτηριστικά του σώματος ορίζονται πρώτα και έπειτα εκλεπτύνονται σε μελλοντικές γενιές, όπως συμβαίνει και στη φυσική εξέλιξη¹¹¹.

Για την εξέλιξη των CPPNs θα πρέπει να διατηρηθούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της εξέλιξης στη φύση. Ένα από αυτά είναι η σταδιακή

¹¹⁰ Stanley, ό.π.

¹¹¹ Stanley, ό.π.

πολυπλοκότητα του γονιδιώματος, αφού υποτίθεται ότι υπήρχε αρχικά ένα μικρότερο γονιδίωμα και προστέθηκαν νέα γονίδια κατά τη διάρκεια της εξέλιξης. Πρόσθεση νέου γονιδίου στο CPPN σημαίνει την πρόσθεση μιας νέας σύνδεσης ή συνάρτησης κόμβου στο δίκτυο. Μία τέτοια πρόσθεση είναι ανάλογη στην πρόσθεση νέου γονιδίου σε ένα Γενετικό Ρυθμιστικό Δίκτυο (GRN). Έτσι, τα CPPNs μπορούν να καθιερώσουν θεμελιώδεις κανονικότητες στα αρχικά στάδια της εξέλιξης και έπειτα να αναπτυχθούν με βάση αυτές στις επόμενες γενιές. Η μέθοδος Νευροεξέλιξης Επαυξημένων Τοπολογιών (NEAT) σχεδιάστηκε λαμβάνοντας υπόψη αυτή τη διαδικασία, εξελίσσοντας σταδιακά σύνθετα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANNs). Παρά το γεγονός ότι η μέθοδος NEAT αρχικά σχεδιάστηκε για την εξέλιξη των ANNs, χρειάζεται μόνο αμελητέες τροποποιήσεις για την εξέλιξη των CPPNs, αφού είναι τόσο όμοια. Το CPPN-NEAT είναι μια επέκταση της NEAT που επιτρέπει την εξέλιξη των CPPNs. Ενώ τα δίκτυα NEAT περιλαμβάνουν μόνο κρυφούς κόμβους με σιγμοειδείς συναρτήσεις, οι κόμβοι γονιδίων στο CPPN-NEAT περιλαμβάνουν ένα πεδίο για τον καθορισμό της συνάρτησης ενεργοποίησης. Όταν δημιουργείται ένας νέος κόμβος, του ανατίθεται μια τυχαία συνάρτηση ενεργοποίησης από ένα κανονικό σύνολο. Επιπλέον, η συνάρτηση απόστασης συμβατότητας, που χρησιμοποιείται για να καθορίσει αν δύο δίκτυα ανήκουν στο ίδιο είδος, περιλαμβάνει ένα επιπλέον όρισμα που μετράει πόσες συναρτήσεις ενεργοποίησης διαφέρουν ανάμεσά τους¹¹².

Ένα χαρακτηριστικό που διαφοροποιεί τα CPPNs είναι το ότι μπορούν να παράγουν τον ίδιο φαινότυπο σε οποιαδήποτε ανάλυση, αφού η αύξηση της ανάλυσης απαιτεί μόνο την αύξηση του βαθμού ανάλυσης των συντεταγμένων. Στην πραγματικότητα το CPPN είναι μια μαθηματική δομή απεριόριστης ανάλυσης. Αφού η ανάλυση του φαινότυπου δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητα των CPPNs, μπορεί να ενεργοποιηθεί η ελάχιστη απαιτούμενη ανάλυση για λόγους περιορισμού της υπολογιστικής πολυπλοκότητας. Επιπλέον, επειδή το CPPN ενεργοποιείται ανεξάρτητα για κάθε συντεταγμένη στον φαινότυπο, ο πλήρης υπολογισμός κάθε συντεταγμένης είναι επουσιώδες να παραλληλιστεί¹¹³.

Όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να διερευνηθούν τα μοτίβα που παράγουν τα CPPNs και ο τρόπος που η εξέλιξη διαφοροποιεί αυτά τα μοτίβα, υπήρξε

¹¹² Stanley, ό.π.

¹¹³ Stanley, ό.π.

μια διαδραστική εξελικτική προσέγγιση. Έτσι, επιτράπηκε στους χρήστες να επιλέξουν ποια μοτίβα θα ήταν οι γονείς της επόμενης γενιάς, αφού τους παρουσιάστηκαν στην οθόνη όλα τα υπάρχοντα μοτίβα. Αυτή η προσέγγιση μοιάζει με τα προγράμματα γενετικής τέχνης, τα οποία παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για να παράγουν αφηρημένες εικόνες που είναι ευχάριστες αισθητικά και θα ήταν μάλλον απίθανο να δημιουργηθούν από άνθρωπο. Τα προγράμματα γενετικής τέχνης ακολουθούν την ιδέα του *Τυφλού Ωρολογοποιού* του Ντόκινς, όπου απλά γενετικά κωδικοποιημένα μοτίβα εξελίσσονται μέσα από μια διαδραστική διεπαφή¹¹⁴.

Σύμφωνα με τον συγγραφέα, η χρήση της διαδραστικής εξέλιξης αποτελεί μια καινοτόμο προσέγγιση. Η διαδραστική γενετική τέχνη συνήθως θεωρείται ως μέσο ψυχαγωγίας ή καλλιτεχνικό εργαλείο, όμως είναι ένα πλούσιο και αναξιοποίητο ερευνητικό εργαλείο για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών των διαφόρων κωδικοποιήσεων και των έμφυτων δυνατοτήτων. Κάποια από τα στοιχεία των CPPNs υπήρχαν σε προηγούμενα ανομοιογενή συστήματα γενετικής τέχνης, κυρίως ως μέσο παραμόρφωσης. Τα CPPNs δεν αξιώνουν έναν εντελώς καινοτόμο μαθηματικό φορμαλισμό, αφού η σύνθεση συναρτήσεων είναι μια γενική διαδικασία που περιλαμβάνεται σε πολλούς τομείς της επιστήμης. Ο κύριος στόχος τους είναι να δώσουν έμφαση στη σχέση τους με την ανάπτυξη, ενώ η γενετική τέχνη χρησιμοποιείται μόνο ως όχημα για να δημιουργηθεί αυτή η σύνδεση. Ο στόχος τους δεν είναι απλά να δημιουργήσουν εικόνες, όμως, τα μοτίβα που παράγουν χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη ως παραδείγματα. Τα αποτελέσματά τους μπορούν να ερμηνευθούν για οποιοδήποτε σκοπό και σε οποιοδήποτε τομέα. Τα μοτίβα αποτελούν το θεμέλιο σχεδόν όλων των φυσικών και τεχνητών δομών, έτσι ένας γενικός μηχανισμός παραγωγής μοτίβων θα μπορούσε δυνητικά να αναπαριστά οποιοδήποτε από αυτά¹¹⁵.

¹¹⁴ Stanley, ό.π.

¹¹⁵ Stanley, ό.π.

iv. Style Transfer

Το 2015 αναπτύχθηκε ένας αλγόριθμος για τη μεταφορά της καλλιτεχνικής τεχνοτροπίας μεταξύ εικόνων από τους Leon Gatys, Alexander Ecker και Matthias Bethge, ερευνητές στο πεδίο της Νευροεπιστήμης στο Πανεπιστήμιο της Τυβίγγης, στο Max Planck Institute και στο Κολλέγιο Ιατρικής Baylor του Χιούστον¹¹⁶. Όπως αναφέρουν οι ίδιοι, μέχρι τότε δεν υπήρχε η αλγοριθμική βάση ή κάποιο τεχνητό σύστημα που να μπορεί να δημιουργήσει μοναδικές οπτικές εμπειρίες μέσα από την πολύπλοκη διάδραση μεταξύ του περιεχομένου μιας εικόνας και της τεχνοτροπίας της, μιας ικανότητας που διαθέτουν οι καλλιτέχνες.

Γι' αυτό, δημιούργησαν ένα τεχνητό σύστημα, το οποίο βασίζεται στα Συνελικτικά Νευρωνικά Δίκτυα (Convolutional Neural Networks - CNNs) που είναι εμπνευσμένα από την βιολογική όραση και έχουν επιδείξει οπτική αντίληψη σχεδόν παρόμοια με την ανθρώπινη στην αναγνώριση προσώπων και αντικειμένων. Το σύστημα αυτό χρησιμοποιεί νευρικές αναπαραστάσεις για να ξεχωρίσει και να επανασυνθέσει το περιεχόμενο και την τεχνοτροπία τυχαίων εικόνων. Έτσι, δίνεται από τον αλγόριθμο η δυνατότητα δημιουργίας καλλιτεχνικών εικόνων. Επιπλέον, μέσα από τη βελτίωση της επίδοσης των τεχνητών νευρωνικών δικτύων και της ομοιότητάς τους με τη βιολογική όραση, παρέχεται η δυνατότητα της αλγοριθμικής κατανόησης του τρόπου με τον οποίο οι άνθρωποι δημιουργούν και αντιλαμβάνονται τον καλλιτεχνικό συμβολισμό¹¹⁷.

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχθηκαν τα CNNs είναι επειδή είναι τα πιο ικανά νευρωνικά δίκτυα στην επεξεργασία εικόνας. Τα CNNs αποτελούνται από επίπεδα μικρών υπολογιστικών μονάδων που επεξεργάζονται ιεραρχικά τις οπτικές πληροφορίες. Κάθε επίπεδο μονάδων μπορεί να κατανοηθεί ως μια συλλογή φίλτρων, το καθένα από τα οποία εξάγει ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό από την εικόνα που έχει ως είσοδο. Η έξοδος κάθε επιπέδου αποτελείται από τους επονομαζόμενους "χάρτες χαρακτηριστικών", δηλαδή διαφορετικά φιλτραρισμένες εκδοχές της εικόνας εισόδου. Όταν τα CNNs εκπαιδεύονται στην αναγνώριση

¹¹⁶ Leon A. Gatys, Alexander S. Ecker, and Matthias Bethge, "A neural algorithm of artistic style", *arXiv preprint arXiv:1508.06576* (2015).

¹¹⁷ Gatys, ό.π.

αντικειμένων, αναπτύσσουν κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας μια αναπαράσταση της εικόνας, η οποία είναι αυξανόμενα πιο σαφής. Έτσι, στην ιεραρχία επεξεργασίας του δικτύου η εικόνα εισόδου μετατρέπεται σε αναπαραστάσεις που σταδιακά ενδιαφέρονται περισσότερο για το πραγματικό περιεχόμενο της εικόνας σε σχέση με την αρχική λεπτομερή αναπαράσταση των τιμών των εικονοκυττάρων (pixel values). Οι πληροφορίες που περιέχονται σε κάθε επίπεδο μπορούν να οπτικοποιηθούν ανακατασκευάζοντας την εικόνα μόνο από τους χάρτες χαρακτηριστικών που περιέχονται σε κάθε επίπεδο. Τα επίπεδα που βρίσκονται υψηλότερα στην ιεραρχία του δικτύου μπορούν να συλλάβουν περιεχόμενο υψηλού επιπέδου, όσον αφορά στα αντικείμενα και τη διάταξή τους, όμως δεν συλλαμβάνουν τις ακριβείς τιμές των εικονοκυττάρων. Αυτό γίνεται από τα κατώτερα επίπεδα τα οποία απλά αναπαράγουν τις ακριβείς τιμές των εικονοκυττάρων. Γι' αυτό το λόγο ο συγκεκριμένος αλγόριθμος αναφέρεται στα υψηλότερα επίπεδα του δικτύου για την αναπαράσταση του περιεχομένου μιας εικόνας¹¹⁸.

Προκειμένου να γίνει η αναπαράσταση της τεχνοτροπίας μιας εικόνας εισόδου, χρησιμοποιείται ένας χώρος χαρακτηριστικών που αρχικά είχε σχεδιαστεί ώστε να συλλαμβάνει τις πληροφορίες υφής. Αυτός ο χώρος έχει δημιουργηθεί πάνω από τις αποκρίσεις των φίλτρων σε κάθε επίπεδο του δικτύου και αποτελείται από το συσχετισμό ανάμεσα στις διαφορετικές αποκρίσεις των φίλτρων πάνω στη χωρική έκταση που έχουν οι χάρτες χαρακτηριστικών. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται μια στατική, πολλαπλής κλίμακας αναπαράσταση της εικόνας εισόδου, η οποία συλλαμβάνει τις πληροφορίες υφής αλλά όχι τη γενική της διάταξη και αυτό αποτελεί την αναπαράσταση της τεχνοτροπίας¹¹⁹.

Η συνεισφορά του αλγόριθμου είναι ότι η αναπαράσταση του περιεχομένου και της τεχνοτροπίας γίνεται ξεχωριστά. Έτσι, οι δύο αναπαραστάσεις χειρίζονται ανεξάρτητα ώστε να παραχθούν νέες εικόνες. Για να επιτευχθεί αυτό χρησιμοποιούνται δύο εικόνες εισόδου από τις οποίες αναμειγνύεται το περιεχόμενο και η τεχνοτροπία. Το αποτέλεσμα είναι μια εικόνα η οποία ταιριάζει ταυτόχρονα τόσο με την αναπαράσταση του περιεχομένου της πρώτης εικόνας, όσο και με την αναπαράσταση της τεχνοτροπίας στη δεύτερη εικόνα. Δηλαδή, από την πρώτη εικόνα

¹¹⁸ Gatys, ό.π.

¹¹⁹ Gatys, ό.π.

διατηρείται η γενική διάταξη, ενώ τα χρώματα και οι μικρότερες δομές που συνθέτουν το γενικό σκηνικό προέρχονται από την τεχνοτροπία της δεύτερης εικόνας¹²⁰.

Επειδή, όμως, κατά τη σύνθεση των δύο εικόνων δεν είναι δυνατό να παραχθεί μια εικόνα που να ταιριάζει απόλυτα και στις δύο προϋποθέσεις ταυτόχρονα, μπορούμε να ρυθμίσουμε την έμφαση που θα δοθεί περισσότερο είτε στο περιεχόμενο είτε στην τεχνοτροπία μέσω της συνάρτησης απώλειας που εφαρμόζεται ξεχωριστά σε καθεμία από τις εικόνες εισόδου, ώστε να επιτευχθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα¹²¹.

Το πρόβλημα αυτό ανήκει σε ένα πεδίο της μηχανικής όρασης (Computer Vision) που ονομάζεται μη φωτορεαλιστική απεικόνιση και σχετίζεται με μεθόδους που χρησιμοποιούν τη μεταφορά υφής προκειμένου να επιτευχθεί η μεταφορά καλλιτεχνικής τεχνοτροπίας. Οι προηγούμενες προσεγγίσεις, σε αντίθεση με τα CNNs, βασίζονταν σε μη παραμετρικές τεχνικές ώστε να χειριστούν την αναπαράσταση των εικονοκυττάρων μιας εικόνας. Τα χαρακτηριστικά που εξάγονται από τα CNNs κατά την εκπαίδευσή τους στην αναγνώριση αντικειμένων έχουν χρησιμοποιηθεί στην κατηγοριοποίηση έργων τέχνης ανάλογα με την περίοδο στην οποία δημιουργήθηκαν. Με τη χρήση του συγκεκριμένου αλγόριθμου θα μπορούσε να επιτευχθεί ακόμη καλύτερη επίδοση στην ταξινόμηση της τεχνοτροπίας, ενώ από την άλλη αποτελεί και ένα συναρπαστικό εργαλείο για τη μελέτη της αντίληψης και της νευρικής αναπαράστασης της τέχνης, της τεχνοτροπίας και της εμφάνισης μιας εικόνας ανεξαρτήτως περιεχομένου¹²².

Οι συγγραφείς σημειώνουν πως είναι εντυπωσιακό το γεγονός ότι ένας αλγόριθμος, που αρχικά είχε εκπαιδευτεί ώστε να εκτελεί βασικές λειτουργίες της βιολογικής όρασης, μαθαίνει να ξεχωρίζει το περιεχόμενο από την τεχνοτροπία μιας εικόνας. Μια εξήγηση θα μπορούσε να είναι το ότι, κατά την εκπαίδευση στην αναγνώριση αντικειμένων, το δίκτυο πρέπει να παραμείνει σταθερό σε όλες τις μεταβολές της εικόνας που διατηρούν την ταυτότητα του αντικειμένου. Οι αναπαραστάσεις που παραγοντοποιούν τις μεταβολές στο περιεχόμενο μιας εικόνας

¹²⁰ Gatys, ό.π.

¹²¹ Gatys, ό.π.

¹²² Gatys, ό.π.

και τις μεταβολές στην εμφάνιση είναι πολύ χρήσιμες για αυτή τη λειτουργία. Ως εκ τούτου, η ικανότητα των ανθρώπων να ξεχωρίζουν το περιεχόμενο από την τεχνοτροπία και επομένως η ικανότητα να δημιουργούν και να απολαμβάνουν την τέχνη θα μπορούσε να οφείλεται πρωταρχικά στην εκπληκτική ικανότητα του οπτικού μας συστήματος¹²³.

Για την εφαρμογή του αλγορίθμου χρησιμοποιήθηκε το VGG-Network, ένα CNN δίκτυο το οποίο είναι δημόσια διαθέσιμο και με εξαιρετική επίδοση στην αναγνώριση αντικειμένων. Από το δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν κάποια convolutional και pooling layers. Προκειμένου να οπτικοποιηθούν οι πληροφορίες που υπάρχουν στα διάφορα επίπεδα της ιεραρχίας του δικτύου, πραγματοποιήθηκε κάθοδος βασισμένη στην κλίση (gradient descent) πάνω σε εικόνα λευκού θορύβου, ώστε να βρεθεί μια άλλη εικόνα, η οποία να ταιριάζει στις αποκρίσεις χαρακτηριστικών της αρχικής εικόνας. Με παρόμοιο τρόπο, για τη δημιουργία της υφής που ταιριάζει στην εικόνα εισόδου για την απεικόνιση της τεχνοτροπίας, χρησιμοποιήθηκε κάθοδος βασισμένη στην κλίση (gradient descent) πάνω σε εικόνα λευκού θορύβου. Για να δημιουργηθούν εικόνες στις οποίες αναμειγνύεται το περιεχόμενο μιας εικόνας με την τεχνοτροπία μιας άλλης, ελαχιστοποιήθηκε η απόσταση της εικόνας λευκού θορύβου από την απεικόνιση του περιεχομένου σε ένα επίπεδο του δικτύου και της απεικόνισης της τεχνοτροπίας σε έναν αριθμό επιπέδων του νευρωνικού δικτύου¹²⁴.

Ο αλγόριθμος αυτός βελτιστοποιήθηκε σε μεταγενέστερες μελέτες τόσο των ίδιων όσο και άλλων ερευνητών, ενώ δημιουργήθηκαν και αντίστοιχοι αλγόριθμοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μεταφορά τεχνοτροπίας από εικόνα σε βίντεο, αλλά και από ένα μουσικό δείγμα σε ένα άλλο. Στο πιο πρόσφατο συνέδριο Adobe MAX τον Οκτώβριο του 2021, ερευνητές έδειξαν πειράματα στα οποία εργάζονται και που ίσως ενσωματώσουν σε εφαρμογές της εταιρείας. Μεταξύ άλλων έδειξαν και αντίστοιχο με τη μεταφορά στυλ από εικόνα σε βίντεο με χρήση τεχνητής νοημοσύνης. Ένα μεγάλο ποσοστό από τα Adobe Sneaks που παρουσιάζονται στο συνέδριο αργότερα ενσωματώνονται σε εφαρμογές, οπότε μπορεί να υπάρχει σύντομα η δυνατότητα style transfer μέσα από εφαρμογές Adobe.

¹²³ Gatys, ό.π.

¹²⁴ Gatys, ό.π.

B. Παρουσίαση της διαδικασίας δημιουργίας οπτικοακουστικού έργου

i. Δημιουργία μουσικής σύνθεσης

Για τη δημιουργία μουσικής σύνθεσης για τα παραδοτέα της παρούσας εργασίας, επιλέξαμε το μοντέλο Music Transformer, που αποτελεί μέρος του ερευνητικού έργου Magenta και παρουσιάστηκε το 2018 από ερευνητές του οργανισμού Google Brain¹²⁵. Ο λόγος επιλογής του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η δυνατότητά του να δημιουργεί συνεκτικές μουσικές συνθέσεις πιάνο μεγαλύτερης διάρκειας. Το μοντέλο είναι αυτοπαλινδρομικό (autoregressive) και βασίζεται σε Transformers, σειριακά μοντέλα που βασίζονται στο μηχανισμό self-attention, ενώ παρουσιάζει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση τόσο με το αυθεντικό μοντέλο όσο και με αντίστοιχα LSTMs. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή της μουσικής σύνθεσης είναι δημοσιευμένος από τους ερευνητές σε διαδραστικό Colab Notebook¹²⁶. Σε αντίθεση με το αυθεντικό μοντέλο Music Transformer, το οποίο χρησιμοποιεί self-attention που βασίζεται στη σχετική θέση, ο συγκεκριμένος κώδικας βασίζεται σε απόλυτη θέση. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται είναι η Python στο πλαίσιο της ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκης μηχανικής μάθησης TensorFlow.

Η διαδικασία δημιουργίας δύο δειγμάτων μουσικής σύνθεσης που ακολουθείται, με βάση το μέρος του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε είναι η εξής: α) πρώτα γίνεται η εγκατάσταση του περιβάλλοντος εργασίας με την εγκατάσταση-εισαγωγή των απαραίτητων βιβλιοθηκών, β) στη συνέχεια ορίζονται μεταβλητές για soundfont και ρυθμό δειγματοληψίας, καθώς και βοηθητικές συναρτήσεις για την εισαγωγή αρχείων και την κωδικοποίησή τους, γ) εισάγεται το προεκπαιδευμένο μοντέλο και ρυθμίζονται οι σχετικές παράμετροι, δ) με βάση τα προηγούμενα παράγεται από το μηδέν ένα δείγμα μουσικής σύνθεσης, ε) για τη δημιουργία δεύτερου δείγματος επιλέξαμε ως ακολουθία εκκίνησης το ρυθμό του έργου του

¹²⁵ Cheng-Zhi Anna Huang, et al, "Music transformer: Generating music with long-term structure (2018)", *arXiv preprint arXiv:1809.04281* (2018).

¹²⁶ Ian Simon et al, "Generating Piano Music with Transformer", *Magenta*, Sep 16, 2019, <https://magenta.tensorflow.org/piano-transformer>.

Claude Debussy *Clair de Lune*, και ε) τέλος δημιουργείται νέο δείγμα με βάση την ακολουθία εκκίνησης που επιλέχθηκε¹²⁷.



unconditional.mid

Ηχητικό αρχείο 1. Η πρώτη μουσική σύνθεση που δημιουργήθηκε από το μηδέν.



continuation.mid

Ηχητικό αρχείο 2. Η δεύτερη μουσική σύνθεση που δημιουργήθηκε βάσει ακολουθίας εκκίνησης.

¹²⁷ Σύνδεσμος φακέλου συνοδευτικών αρχείων στο Google Drive:
https://drive.google.com/drive/folders/1L4jyGHqfGTYRiy8TGQ_JbN8JJW-5yVSk?usp=sharing.

ii. Δημιουργία γραφικών

Για τη δημιουργία γραφικών επιλέξαμε τα Δίκτυα Παραγωγής Συνθετικών Μοτίβων (CPPNs), η δομή και σύνθεση των οποίων παρουσιάστηκε αναλυτικότερα παραπάνω.

Ο κώδικας, που χρησιμοποιήθηκε για την παρούσα εργασία, είναι δημοσιευμένος σε αποθετήριο του GitHub. Αποτελεί μέρος προγενέστερης προσωπικής έρευνας, η οποία αποτέλεσε και θέμα ομαδικής εργασίας που τιμήθηκε με Honorable Mention σε διαγωνισμό κατά τη διάρκεια υποτροφίας που χορηγήθηκε από τις εταιρείες Intel και Udacity για το αντικείμενο Intel® Edge AI for IoT Developers¹²⁸.

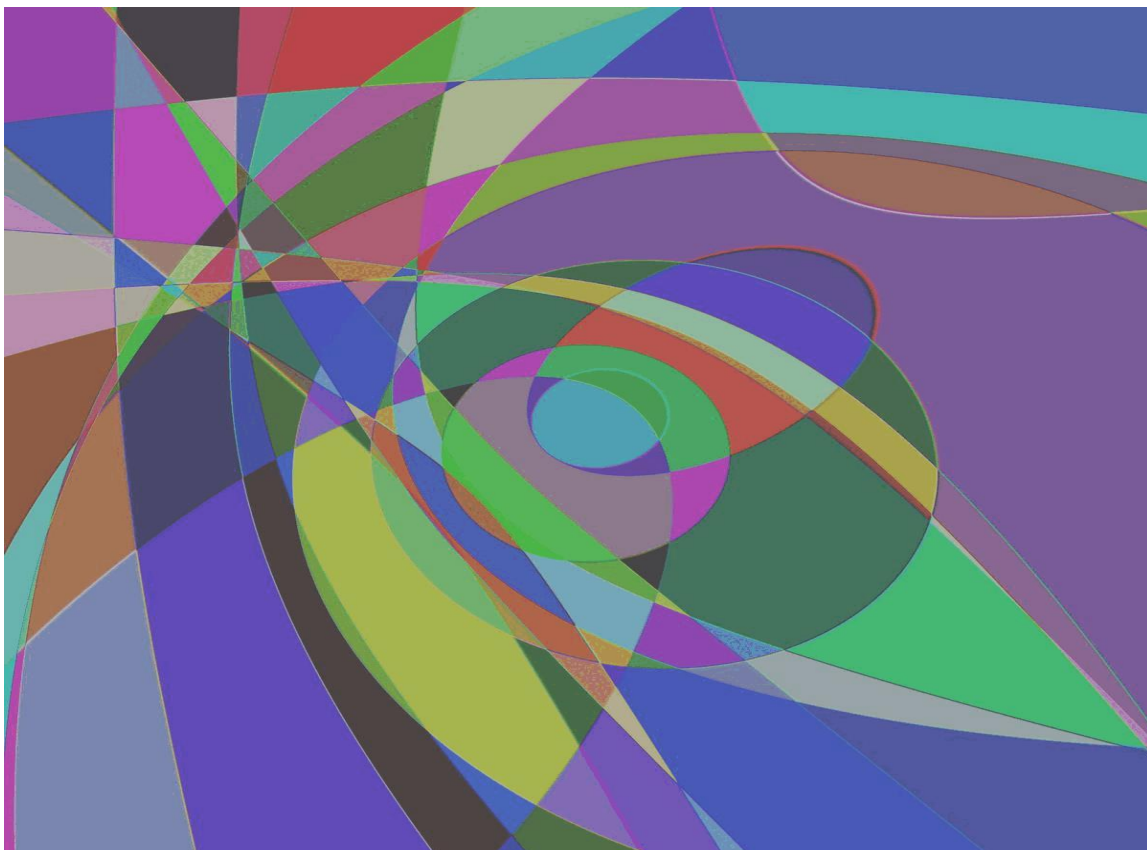
Για το σκοπό της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε ένα μέρος μόνο από το αποθετήριο του κώδικα. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα πέντε αρχικά τμήματα (κελιά) από το Python Notebook “*Generate Arts.ipynb*”¹²⁹. Για την εφαρμογή των CPPNs χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python μέσα στο πλαίσιο της ανοιχτού κώδικα βιβλιοθήκης μηχανικής μάθησης PyTorch.

Η διαδικασία παραγωγής συνθετικών μοτίβων που ακολουθείται, σύμφωνα με τον κώδικα, είναι η εξής: α) αρχικά εισάγονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες, β) στη συνέχεια δημιουργείται το νευρωνικό δίκτυο με επιλεγμένες παραμέτρους και επιλέγονται οι συναρτήσεις ενεργοποίησης (activation functions), γ) ορίζονται οι μεταβλητές για τη δημιουργία εικόνων, δ) δημιουργείται το διάνυσμα εισόδου για το νευρωνικό δίκτυο και ορίζονται βοηθητικές συναρτήσεις, και ε) τέλος, ενεργοποιείται ο βρόχος δημιουργίας των εικόνων στον προκαθορισμένο αριθμό, αποθηκεύονται οι εικόνες σε φάκελο και ταυτόχρονα σχεδιάζεται η γραφική απεικόνιση της κάθε εικόνας.

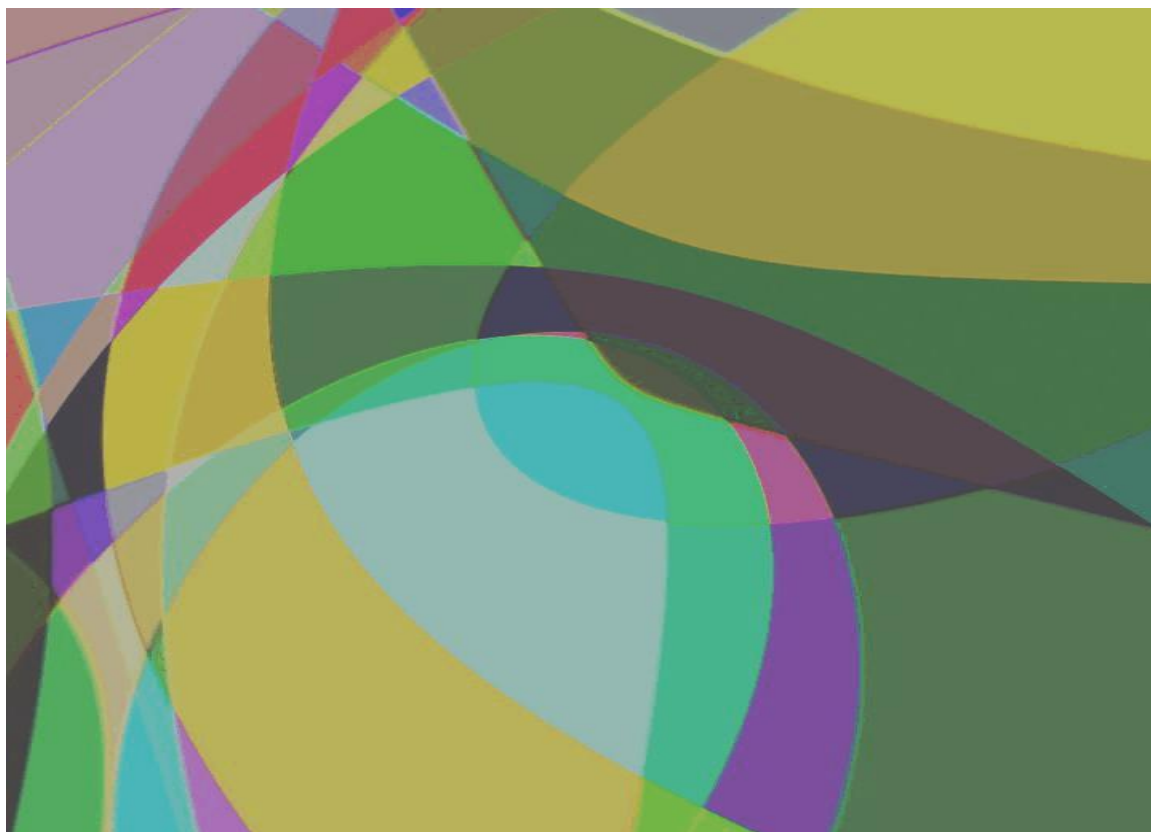
Με τις εικόνες που παράχθηκαν, κατά την εκτέλεση του νευρωνικού δικτύου με διαφορετικές παραμέτρους, συνθέσαμε κινούμενα γραφικά σε μορφή GIF. Με την εναλλαγή των εικόνων γίνεται ευκολότερα αντιληπτή η διαφοροποίηση των μοτίβων κατά τη διάρκεια παραγωγής των εικόνων.

¹²⁸ Evi Giannakou, “artsificial”, *GitHub*, <https://github.com/evigian/artsificial>, όπου και σχετικές αναφορές σε πηγές και συντελεστές.

¹²⁹ Giannakou, ό.π.



Εικόνα 24. GIF με εικόνες που παράχθηκαν από CPPN (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 25. Εικόνα 24. GIF με εικόνες που παράχθηκαν από CPPN (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

iii. Δημιουργία κινούμενων γραφικών

Για τη δημιουργία κινούμενων γραφικών επιλέχθηκε η τεχνική Style Transfer με βάση τον βελτιστοποιημένο αλγόριθμο που παρουσιάστηκε το 2017 από τους Xun Huang και Serge Belongie στο επιστημονικό άρθρο "Arbitrary Style Transfer in Real-time with Adaptive Instance Normalization"¹³⁰. Ο αλγόριθμος βασίζεται στο έργο των Gatys et al, "A neural algorithm of artistic style"¹³¹ που αναπτύχθηκε παραπάνω. Ο κώδικας που χρησιμοποιήθηκε είναι δημοσιευμένος από τον πρώτο συγγραφέα σε αποθετήριο του GitHub¹³². Χρησιμοποιείται γλώσσα Lua στο πλαίσιο της επιστημονικής υπολογιστικής βιβλιοθήκης μηχανικής μάθησης Torch. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί την τεχνική μεταφοράς μάθησης (transfer learning) και χρησιμοποιεί τα νευρωνικά δίκτυα VGG¹³³, ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο Συνελκτικών Νευρωνικών Δικτύων (CNNs) και από τα καλύτερα μοντέλα για την κατηγοριοποίηση εικόνων.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται είναι η μεταφορά της τεχνοτροπίας μιας επιλεγμένης εικόνας σε αντίστοιχα επιλεγμένο αρχείο σε μορφή βίντεο. Η διαδικασία που ακολουθείται για τη βασική εκτέλεση με βάση τον παραπάνω αλγόριθμο είναι η εξής: α) αρχικά εισάγονται οι απαραίτητες βιβλιοθήκες και τα προεκπαιδευμένα μοντέλα για την εκτέλεση του προγράμματος, καθορίζονται οι παράμετροι εκπαίδευσης του μοντέλου και ορίζονται οι βοηθητικές συναρτήσεις, β) στη συνέχεια μεταφορτώνεται το αρχείο βίντεο και ορίζεται ο αριθμός εικόνων ανά δευτερόλεπτο, γ) το βίντεο διασπάται στον αντίστοιχο αριθμό εικόνων από τις οποίες αποτελείται ανάλογα με τη διάρκειά του, δ) εισάγεται η εικόνα, η οποία αποτελεί την πηγή προέλευσης της τεχνοτροπίας, ε) το μοντέλο εκπαιδεύεται και εκτελεί τη μεταφορά της τεχνοτροπίας της εικόνας σε κάθε επιμέρους εικόνα από την οποία αποτελείται το επιλεγμένο αρχείο βίντεο, στ) οι επιμέρους εικόνες που έχουν μετατραπεί με βάση την επιλεγμένη τεχνοτροπία της εικόνας ενώνονται εκ νέου σε μορφή αρχείου βίντεο, και ζ) αποθηκεύεται το τελικό αρχείο σε προκαθορισμένη διεύθυνση φακέλου.

Ως παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου αναφέρουμε το εξής:

¹³⁰ Xun Huang and Serge Belongie. "Arbitrary style transfer in real-time with adaptive instance normalization" *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2017.

¹³¹ Gatys, ό.π.

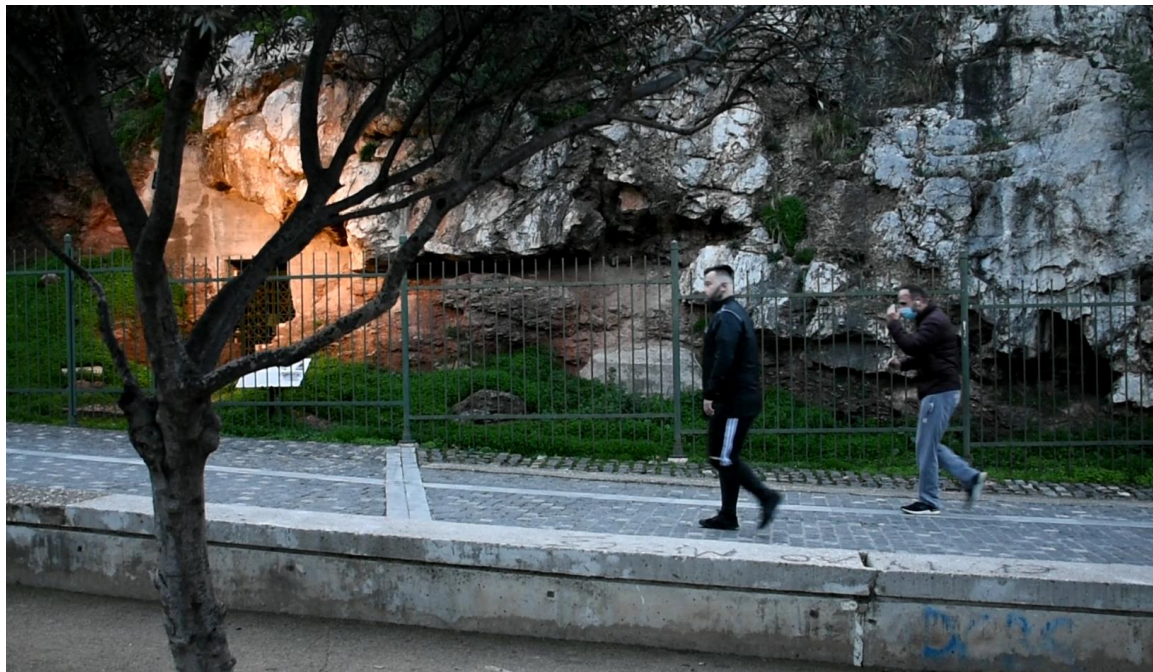
¹³² Xun Huang, "AdaIN-style", *GitHub*, <https://github.com/xunhuang1995/AdaIN-style>.

¹³³ Karen Simonyan and Andrew Zisserman, "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition", *arXiv preprint arXiv:1409.1556* (2014).



DSC_2831.MOV

Εικόνα 24. Αρχικό αρχείο βίντεο (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 25. Στιγμιότυπο οδόντης από το αρχικό βίντεο



Εικόνα 26. Στιγμιότυπο οδόντης από το αρχικό βίντεο



Εικόνα 27. Εικόνα πηγής για μεταφορά τεχνοτροπίας (Πηγή: unsplash.com)



Εικόνα 28. Στυλιζαρισμένη εικόνα βίντεο (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 29. Στυλιζαρισμένη εικόνα βίντεο (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

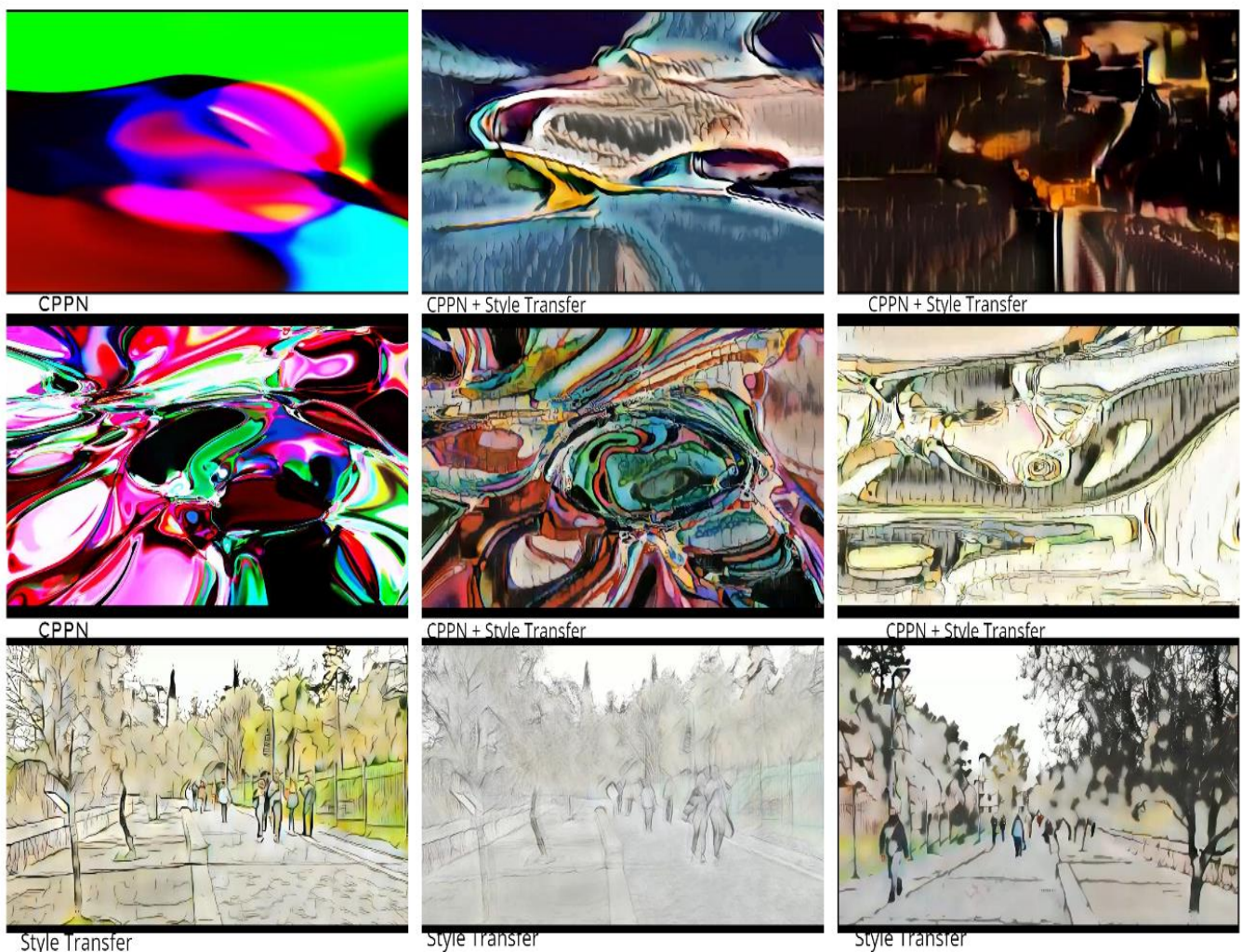


stylized_video (9).mp4

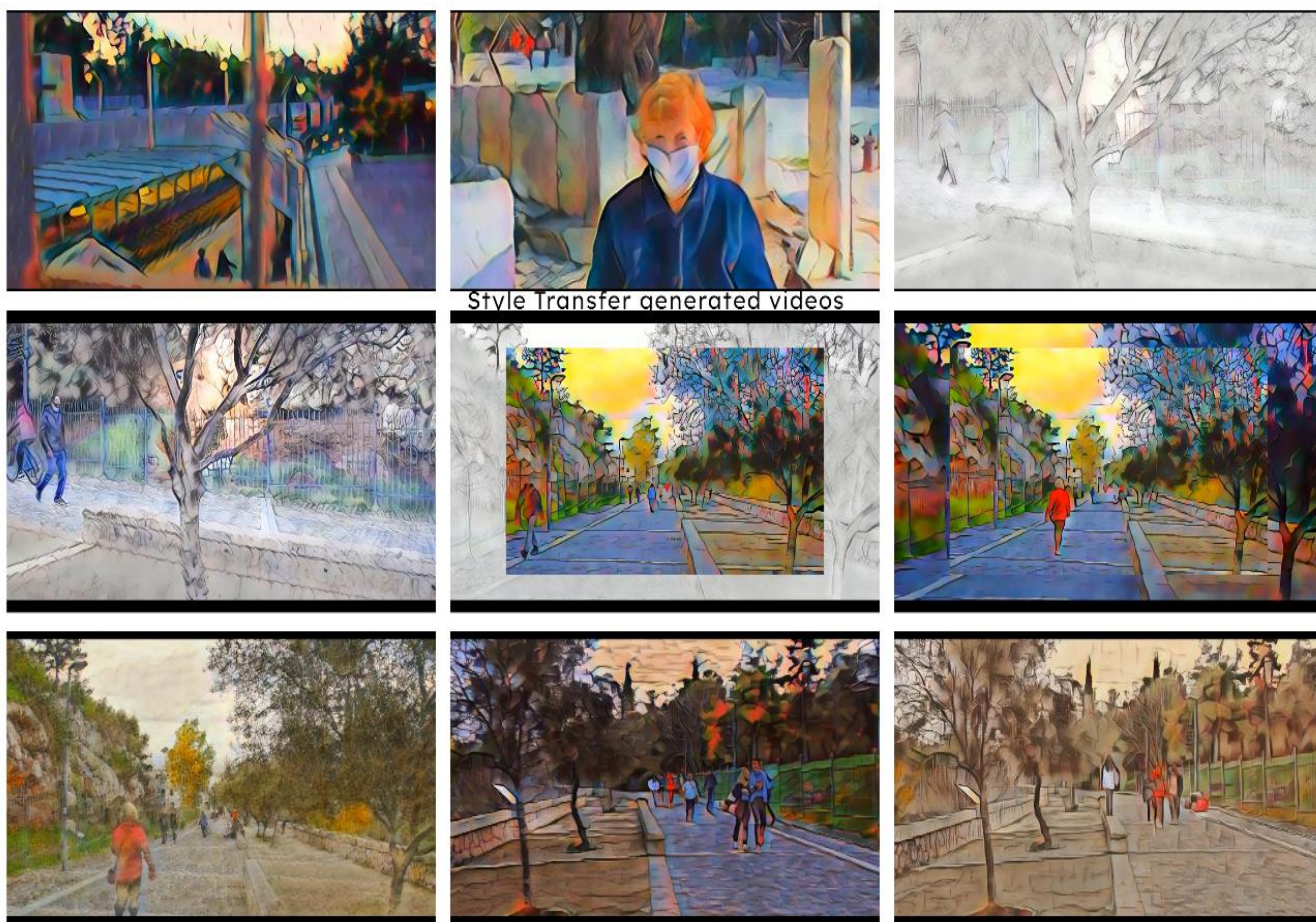
Εικόνα 30. Τελικό αρχείο βίντεο με μεταφορά τεχνοτροπίας

iv. Τελική σύνθεση βίντεο

Για την τελική σύνθεση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Premiere Pro. Η σύνθεση αποτελείται από αρχεία που προέκυψαν από πειραματισμούς με τους αλγόριθμους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Συγκεκριμένα, από τα ηχητικά αρχεία που προέκυψαν από το μοντέλο Music Transformer, καθώς και από αρχεία βίντεο, τα οποία δημιουργήθηκαν με τους αλγόριθμους CPPN και Arbitrary Style Transfer in Real-time with Adaptive Instance Normalization. Οι αρχικές εικόνες που δημιουργήθηκαν με CPPN μετατράπηκαν σε αρχείο βίντεο και στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Style Transfer σε βίντεο. Για τη δημιουργία των υπόλοιπων βίντεο με Style Transfer, χρησιμοποιήθηκαν δείγματα βίντεο από το προσωπικό αρχείο.



Εικόνα 31. Στιγμιότυπα οθόνης από το τελικό βίντεο (Πηγή: προσωπικό αρχείο)



Εικόνα 32. Στιγμιότυπα οθόνης από το τελικό βίντεο (Πηγή: προσωπικό αρχείο)

Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία ερευνήθηκε η χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης στη σύγχρονη τέχνη. Δεδομένου ότι το αντικείμενο είναι σύνθετο και διεπιστημονικό, επιχειρήθηκε μια κατά το δυνατό πληρέστερη ανάπτυξη ώστε να γίνει κατανοητό το θεωρητικό πλαίσιο, ενώ ταυτόχρονα παρουσιάζεται και σε πρακτικό επίπεδο. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το θέμα της τεχνητής νοημοσύνης ανήκει στην επιστήμη των υπολογιστών, όμως εφαρμόζεται και επηρεάζει τη σύγχρονη τέχνη, επιλέξαμε να παρουσιάσουμε την εφαρμογή του ειδικότερα στην τέχνη.

Είδαμε στην ιστορική αναδρομή πως από τις αναφορές στους μύθους της αρχαιότητας και την επιθυμία των ανθρώπων να κατασκευάσουν τεχνητά όντα που να φέρουν ανθρώπινα χαρακτηριστικά και ιδιαίτερα εκείνο της νοημοσύνης, έφτασαν οι επιστήμονες από διαφορετικά επιστημονικά πεδία στον ορισμό της τεχνητής νοημοσύνης και στην ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων. Είδαμε, επίσης, ότι ένα όνειρο που έγινε πραγματικότητα απειλεί να μετατρέψει σε εφιάλτη τις σύγχρονες κοινωνίες, όπου η τεχνητή νοημοσύνη όχι μόνο εφαρμόζεται στους περισσότερους τομείς της ζωής, αλλά ενδέχεται, πολλές φορές, εξαιτίας της αλόγιστης χρήσης να απειλούνται θεμελιώδεις ελευθερίες και δικαιώματα των ανθρώπων .

Η ανάπτυξη των αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης δεν θα μπορούσε να μην επηρεάσει τον χώρο της τέχνης. Οι καλλιτέχνες, άνθρωποι με έμφυτη περιέργεια και τάση για πειραματισμό με διάφορες μορφές τέχνης, δε θα μπορούσαν να μην εντυπωσιαστούν από τις δυνατότητες της μηχανικής μάθησης και των νευρωνικών δικτύων. Κάποιοι τα χρησιμοποιούν ως πηγή έμπνευσης, άλλοι προβληματίζονται με το πως μπορεί να επηρεάζεται η ζωή όλων μας, άλλοι τα χρησιμοποιούν ως δημιουργικούς βοηθούς και άλλοι πειραματίζονται με τις δυνατότητές τους και τα χρησιμοποιούν ως ένα άλλο σύγχρονο εργαλείο. Πέρα από την αγάπη τους για την τέχνη, διαπιστώνουμε ότι ένα άλλο κοινό σημείο των καλλιτεχνών AI είναι ότι διαθέτουν γνώσεις και για την επιστήμη των υπολογιστών, γνώσεις τις οποίες χρησιμοποιούν ως εκφραστικό μέσο με δημιουργικό τρόπο.

Για την παρουσίαση των κυριότερων νευρωνικών δικτύων που εφαρμόζονται στην τέχνη, κρίθηκε απαραίτητη η ανάπτυξη του θεωρητικού και επιστημονικού

πλαίσιου, μέσα στο οποίο αναπτύχθηκαν. Για το λόγο αυτό, παρουσιάστηκε ο συσχετισμός των νευρωνικών δικτύων με τη βιολογική δομή του ανθρώπινου εγκεφάλου, καθώς και η σχέση των συνελκτικών νευρωνικών δικτύων με το οπτικό σύστημα. Παρουσιάστηκε ο τρόπος λειτουργίας των παραγωγικών ανταγωνιστικών δικτύων, που εφαρμόζονται ευρέως σε καλλιτεχνικά έργα, καθώς και η ιδιαίτερη δομή λειτουργίας των επαναλαμβανόμενων νευρωνικών δικτύων, τα οποία εφαρμόζονται στην επεξεργασία ηχητικών σημάτων, μουσικής, κειμένων και λόγου εξαιτίας της δυνατότητάς τους να επεξεργάζονται ακολουθιακά δεδομένα. Αναπτύχθηκε η ιδιαίτερη αρχιτεκτονική δομή του καθενός από τα νευρωνικά δίκτυα και ο τρόπος επεξεργασίας των δεδομένων. Τέλος, ερευνήθηκε με ποιους τρόπους υλοποιείται το καθένα σε διαφορετικές καλλιτεχνικές εφαρμογές.

Μετά τη γενική αναφορά στα κυριότερα νευρωνικά, αναλύθηκαν επιλεγμένοι αλγόριθμοι, που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια. Διαπιστώσαμε ότι ο καθένας από αυτούς εκτελεί μια συγκεκριμένη διεργασία και εφαρμόζεται με διαφορετικό τρόπο, ενώ αναπτύχθηκε με στόχο να λύσει ένα ξεχωριστό πρόβλημα στην επεξεργασία ήχου ή εικόνας. Το Spleeter συμβάλλει στο διαχωρισμό ηχητικών πηγών. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαχωρίσει τα φωνητικά από το μουσικό μέρος μιας σύνθεσης και ήδη έχει ενσωματωθεί σε εμπορικές εφαρμογές. Το NSynth του Magenta λειτουργεί ως ηλεκτρονικό συνθεσάιζερ που μπορεί να παράγει διαφορετικούς ήχους, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη σύνθεση μουσικής. Τα CPPNs, αν και προσπαθούν να κωδικοποιήσουν τους κανόνες της φυσικής ανάπτυξης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη γενετική σύνθεση αφηρημένων μοτίβων. Η μέθοδος Style Transfer μπορεί να εφαρμοστεί για τη μεταφορά τεχνοτροπίας, τόσο σε εικόνες όσο και σε βίντεο, με πολύ ενδιαφέροντα αποτελέσματα.

Μέσα από τη διαδικασία δημιουργίας πειραματικού οπτικοακουστικού έργου, διαπιστώσαμε ότι η χρήση δικτύων τεχνητής νοημοσύνης αποτελεί ένα ακόμη εργαλείο, το οποίο μπορεί να υποβοηθήσει την καλλιτεχνική δημιουργία και να δώσει ώθηση για περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη. Είναι φανερό ότι οι αλγόριθμοι δεν μπορούν από μόνοι τους να κατασκευάσουν με αυτοματοποιημένο τρόπο καλλιτεχνικά έργα και ότι ο καλλιτέχνης είναι εκείνος που επιλέγει τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν. Ο ίδιος θα πρέπει να κάνει και την τελική επιλογή από τα

αποτελέσματα που παράγονται από το νευρωνικό δίκτυο. Επίσης, είναι δυνατή η διαφοροποίηση της αρχιτεκτονικής των δικτύων, μέσα από την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων, έτσι ώστε να προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα.

Διαπιστώνουμε, κλείνοντας, ότι το πεδίο έρευνας στην τεχνητή νοημοσύνη είναι πολύ ευρύ και οι εφαρμογές που μπορεί να έχει στην τέχνη είναι επίσης πολλές. Ήδη, τα περισσότερα από τα λογισμικά επεξεργασίας ήχου και εικόνας έχουν ενσωματωμένα νευρωνικά δίκτυα και στο μέλλον αναμένεται να αναπτυχθούν ακόμη περισσότερο με εντυπωσιακές δυνατότητες. Όπως έχει δηλώσει ο Nick Bostrom, όταν μια τεχνολογία τεχνητής νοημοσύνης ενσωματώνεται σε εφαρμογές που χρησιμοποιούνται στην καθημερινότητα, τότε γίνεται mainstream και δεν φαίνεται πια ως τεχνητή νοημοσύνη. Στις μέρες μας, που η υπολογιστική δύναμη των μηχανών διαρκώς μεγαλώνει, είναι πιο εύκολη και δυνατή από ποτέ άλλοτε η ανάπτυξη των «έξυπνων» δυνατοτήτων τους. Όμως, από την άλλη, τόσο περισσότερο ελλοχεύει ο φόβος η ανάπτυξη της υπερευφυΐας να αποτελέσει σοβαρό κίνδυνο για την πορεία της ανθρωπότητας, ειδικότερα όσο τα συστήματα τεχνητής νοημοσύνης σχεδιάζονται και ορίζονται υπεύθυνα για τη λήψη αποφάσεων που επηρεάζουν τις ζωές των ανθρώπων. Όπως κάθε εργαλείο που έχει αναπτυχθεί για την ευκολία του ανθρώπου και τη βελτίωση της ζωής του μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την καταστροφή του, έτσι και οι αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για καλλιτεχνική δημιουργία όσο και κακόβουλα. Γι' αυτό, έγκειται στις προσωπικές επιλογές και διαθέσεις του καθενός ο τρόπος και ο σκοπός χρήσης. Η χρήση τεχνητής νοημοσύνης στην τέχνη δεν καθιστά τα έργα που παράγονται ανώτερα από άλλα. Αντίθετα, μπορεί τα αποτελέσματα να φαίνονται παράξενα ή με μη αποδεκτή αισθητική. Το ίδιο όμως μπορεί να συμβαίνει και με οποιαδήποτε άλλη παραδοσιακή ή μοντέρνα μορφή τέχνης.

Βιβλιογραφία

- AIArtists. "Dr. Ahmed Elgammal". <https://aiartists.org/ahmed-elgammal>.
- AIArtists. "Jon McCormack". <https://aiartists.org/jon-mccormack>.
- AICAN. "Meet AICAN". <https://aican.io/>.
- Anadol, Refik. <https://refikanadol.com/about>.
- Ars Electronica. "Digital Communities 2020". <https://ars.electronica.art/prix/en/winners/digital-communities/>.
- Atken, Memo. <https://www.memo.tv/info/>.
- Atsma, Aaron. "Automotons (Automotones)". *Theoi Project*.
<https://www.theoi.com/Ther/Automotones.html#Kuon>.
- Bachelet, Michelle. "Artificial intelligence risks to privacy demand urgent action". *United Nations Human Rights*. <https://www.ohchr.org/EN/NewsEvents/Pages/DisplayNews.aspx?NewsID=27469&LangID=E>.
- Basheer, Imad A., and Hajmeer, Maha. "Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application." *Journal of microbiological methods* 43.1 (2000): 3-31.
- Best, Christoph. "Ars gratia retium: Understanding How Artificial Neural Networks Learn To Emulate Art." *Algorithmic and Aesthetic Literacy: Emerging Transdisciplinary Explorations for the Digital Age* (2021): 171.
- Briot, Jean-Pierre, Gaëtan Hadjeres, and François-David Pachet. "Deep learning techniques for music generation--a survey." *arXiv preprint arXiv:1709.01620* (2017). <https://arxiv.org/pdf/1709.01620.pdf>.
- Britz, Denny. "Recurrent Neural Networks Tutorial, Part 1 – Introduction to RNNs". *WILDML*, Sept 17, 2015. <http://www.wildml.com/2015/09/recurrent-neural-networks-tutorial-part-1-introduction-to-rnns/>.
- Buchanan, Bruce G. "A (very) brief history of artificial intelligence." *AI Magazine* 26.4 (2005): 53-53.
- Buolamwini, Joy. Poet of Code. <https://poetofcode.com/?home>.
- Cordeschi, Roberto. "Artificial Intelligence and evolutionary theory: Herbert Simon's unifying framework." (2011).
- Crespo, Sofia. <https://sofiacrespo.com/>.

Deezer. "spleeter". *GitHub*. <https://github.com/deezer/spleeter>.

Elhoseiny, Mohamed, and Mohamed Elfeki. "Creativity inspired zero-shot learning." *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*. 2019.

Engel, Jesse, et al. "Neural Audio Synthesis of Musical Notes with WaveNet Autoencoders." *International Conference on Machine Learning*. PMLR, 2017.

Faculty of Electrical Engineering. "The unique Puppetron graphic tool was programmed by scientists at the Faculty of Electrical Engineering". Czech Technical University in Prague. <https://fel.cvut.cz/en/aktuality/2017/puppetron>.

Fawzi, Alhussein, et al. "Image inpainting through neural networks hallucinations." *2016 IEEE 12th Image, Video, and Multidimensional Signal Processing Workshop (IVMSP)*. IEEE, 2016.

Fernando, Chrisantha, et al. "Convolution by evolution: Differentiable pattern producing networks." *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2016. <https://arxiv.org/pdf/1606.02580.pdf>.

Fernández, Jose D., and Francisco Vico. "AI methods in algorithmic composition: A comprehensive survey." *Journal of Artificial Intelligence Research* 48 (2013): 513-582.

Field, Judith Veronica, and Michael T. Wright. "Gears from the Byzantines: a portable sundial with calendrical gearing." *Annals of Science* 42.2 (1985): 87-138.

Gatys, Leon A., Alexander S. Ecker, and Matthias Bethge. "A neural algorithm of artistic style." *arXiv preprint arXiv:1508.06576* (2015).

Giannakou, Evi. "artsifical". *GitHub*. <https://github.com/evigian/artsifical>.

Goethe. "My material is mostly information: AI artist Christiam Mio Loclair in interview". <https://www.goethe.de/prj/k40/en/kun/loc.html>.

Goodfellow, Ian J., et al. "Generative adversarial networks." *arXiv preprint arXiv:1406.2661* (2014).

Goodfellow, Ian, Bengio, Yoshua, and Courville, Aaron. *Deep Learning*. MIT Press, 2016.

Guibas, John T., Tejpal S. Virdi, and Peter S. Li. "Synthetic medical images from dual generative adversarial networks." *arXiv preprint arXiv:1709.01872* (2017). <https://arxiv.org/pdf/1709.01872.pdf>.

- Haenlein, Michael, and Kaplan, Andreas. "A Brief History of Artificial Intelligence: On the Past, Present, and Future of Artificial Intelligence." *California management review* 61.4 (2019): 5-14.
- Hennequin, Romain, et al. "Spleeter: a fast and efficient music source separation tool with pre-trained models." *Journal of Open Source Software* 5.50 (2020): 2154.
- Hong, Joo-Wha, and Curran, Nathaniel Ming. "Artificial intelligence, artists, and art: attitudes toward artwork produced by humans vs. artificial intelligence". *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)* 15.2s (2019): 1-16.
- Huang, Cheng-Zhi Anna, et al. "Music transformer: Generating music with long-term structure (2018)." *arXiv preprint arXiv:1809.04281* (2018).
- Huang, Xun, and Belongie, Serge. "Arbitrary style transfer in real-time with adaptive instance normalization." *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2017.
- Huang, Xun. "AdaIN-style". *GitHub*. <https://github.com/xunhuang1995/AdaIN-style>.
- Jain, Anil K., Jianchang, Mao, and Mohiuddin, Moidin K. "Artificial neural networks: A tutorial." *Computer* 29.3 (1996): 31-44.
- Jeon, Myounghoon, Fiebrink, Rebecca, Edmonds, Ernest A., and Herath, Damith. "From rituals to magic: Interactive art and HCI of the past, present, and future." *International Journal of Human-Computer Studies* 131 (2019): 108-119.
- Johansson, Dennis. "Real-time analysis, in SuperCollider, of spectral features of electroglottographic signals." (2016).
- Karras, Tero, et al. "Progressive growing of GANs for improved quality, stability, and variation." *arXiv preprint arXiv:1710.10196* (2017).
- Klingemann, Mario. <http://quasimondo.com/>.
- Κυδωνάκη, Μαρία. «Η Ιστορία των Ρομπότ. Η εξέλιξή τους.». *Αθηνοδρόμιο*, Ρομποτική. <https://tinyurl.com/yzcbsch8>.
- Kunz, Meredith Alexander. "Puppetron: Your Face as a Stylized Work of Art". *Adobe Research*. March 26, 2018. <https://research.adobe.com/news/puppetron-your-face-as-a-stylized-work-of-art/>.
- Loclair, Christian Mio. <https://christianmiolclair.com>.
- Lorway, Norah, et al. "Autopia: An AI Collaborator for Live Coding Music

- Performances." (2019).
http://repository.falmouth.ac.uk/3770/1/ICLC2020_Lorway.pdf.
- Magenta. "Make Music and Art Using Machine Learning".
<https://magenta.tensorflow.org/>.
- Magenta. "Colab Notebooks". <https://magenta.tensorflow.org/demos/colab/>.
- Magenta. "NSynth: Neural Audio Synthesis". Apr 6, 2017.
<https://magenta.tensorflow.org/nsynth>.
- Manovich, Lev. "Defining AI arts: Three proposals." *AI and dialog of cultures" exhibition catalog*. Saint-Petersburg: Hermitage Museum, 2019.
- Mayor, Adrienne. *Gods and robots: myths, machines, and ancient dreams of technology*. Princeton University Press, 2020.
- McCarthy, Laureen. "Feeling at Home: Between Human and AI". *Immerse*. Jan 8, 2018. <https://immerse.news/feeling-at-home-between-human-and-ai-6047561e7f04>.
- McCarthy, Laureen Lee. <https://lauren-mccarthy.com/>.
- McCorduck, Pamela, et al. "History of artificial intelligence." *IJCAI*. 1977: 951-954.
- McCorduck, Pamela. *Machines who think: A personal inquiry into the history and prospects of artificial intelligence*. CRC Press, 2004.
- McCormack, Jon. <https://ionmccormack.info/about>.
- McGregor, Wayne. <https://waynemcgregor.com/>.
- Μήττα, Δήμητρα. «Αρχαία Ελληνική Μυθολογία, Μειξογενείς θνητές οντότητες – Τέρατα – Αυτόματα, Κόρες Χρυσές (ζωντανά αγάλματα, αυτόματα)».
<http://users.sch.gr/ipap/mixogeni/183.htm>
- Μήττα, Δήμητρα. «Μορφές και Θέματα της Αρχαίας Ελληνικής Μυθολογίας».
 Ψηφίδες για την ελληνική γλώσσα. https://www.greek-language.gr/digitalResources/ancient_greek/mythology/lexicon/crete/page_003.html.
- Newell, Allen. *Intellectual issues in the history of artificial intelligence*. Carnegie-Mellon University Pittsburgh PA Dept of Computer Science, 1982.
- Nilsson, Nils J. *The quest for artificial intelligence*. Cambridge University Press, 2009.
- Oord, Aaron van den, et al. "Wavenet: A generative model for raw audio." *arXiv preprint arXiv:1609.03499* (2016).

- Rafii Zafar, Liutkus Antoine, Stöter Fabian-Robert, Mimilakis Stylianos
Ioannis and Rachel Bittner. *MUSDB18 - a corpus for music separation*. 2017, ff10.5281/zenodo.1117371.
- Ridler, Anna. <http://annaridler.com/>.
- Serbanescu, Caroline. "Why Does Artificial Intelligence Challenge Democracy? A Critical Analysis of the Nature of the Challenges Posed by AI-Enabled Manipulation". *Retskraft – Copenhagen Journal of Legal Studies*. Vol. 5, Number 1, Spring 2021.
- Shi, Bibo, et al. "Learning better deep features for the prediction of occult invasive disease in ductal carcinoma in situ through transfer learning." *Medical Imaging 2018: Computer-Aided Diagnosis*. Vol. 10575. International Society for Optics and Photonics, 2018.
- Simon, Ian, Huang, Cheng-Zhi Anna, Engel, Jesse, Hawthorne, Curtis, and Dinculescu, Monica. "Generating Piano Music with Transformer". *Magenta*. Sep 16, 2019. <https://magenta.tensorflow.org/piano-transformer>.
- Simonyan, Karen, and Zisserman, Andrew. "Very deep convolutional networks for large-scale image recognition." *arXiv preprint arXiv:1409.1556* (2014).
- Sparacino, Flavia. "(Some) computer vision based interfaces for interactive art and entertainment installations." In *INTER_FACE Body Boundaries, Anomalie, n. 2, anomos*. 2001.
- Stanley, Kenneth O. "Compositional pattern producing networks: A novel abstraction of development." *Genetic programming and evolvable machines* 8.2 (2007): 131-162. <https://axon.cs.byu.edu/Dan/778/papers/NeuroEvolution/stanley5.pdf>.
- Studio Ivanova. "FutureLab Residency". <https://www.annieivanova.com/jon-mccormack.html>.
- Subramanian, Vishnu. *Deep Learning with PyTorch: A practical approach to building neural network models using PyTorch*. Packt Publishing Ltd, 2018.
- Sun, Jiajun, Jing Wang, and Ting-chun Yeh. "Video understanding: from video classification to captioning." *Computer Vision and Pattern Recognition*. Stanford University, 2017. <http://cs231n.stanford.edu/reports/2017/pdfs/709.pdf>.
- Tolonen, Tero, Vesa Välimäki, and Matti Karjalainen. *Evaluation of modern sound synthesis methods*. Helsinki University of Technology, 1998.

Van Arman, Pindar. <https://www.cloudpainter.com/>.

Walczak, Steven, and Cerpa, Narciso. "Artificial Neural Networks" in *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition). Academic Press Int, 2003.

Yu, Jiahui, et al. "Generative image inpainting with contextual attention." *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018.