

Περίληψη στα Ελληνικά της σπουδαστικής εργασίας: Ανίχνευση ινών σε εικόνες υπολογιστική μικροτομογραφία σύνθετων υλικών προσθετικής κατασκευής με χρήση νευρωνικών δικτύων.

Χρήστος Νικολάου, 246991

Οι τεχνικές προσθετικής κατασκευής επέτρεψαν την παραγωγή τρισδιάστατα εκτυπωμένων σύνθετων υλικών, τα οποία δημιουργούνται με το συνδυασμό δύο ή περισσότερων υλικών. Συνήθως, αυτά τα σύνθετα υλικά περιλαμβάνουν ένα υλικό μήτρας, όπως πλαστικό, ενισχυμένο με ίνες για την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Οι εφαρμογές των σύνθετων υλικών είναι ποικίλες και κυμαίνονται από αεροδιαστημικά και ιατρικά εξαρτήματα έως εξαρτήματα αυτοκινήτων. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους κατασκευής, τα τρισδιάστατα εκτυπωμένα σύνθετα υλικά προσφέρουν αρκετά πλεονεκτήματα, όπως η δυνατότητα παραγωγής πολύπλοκων, προσαρμοσμένων σχημάτων και η προσαρμογή των ιδιοτήτων του υλικού για συγκεκριμένες χρήσεις. Οι δυνατότητες των τρισδιάστατα εκτυπωμένων σύνθετων υλικών έχουν οδηγήσει σε εκτεταμένη έρευνα τα τελευταία χρόνια και η παρούσα εργασία παρουσιάζει μια νέα προσέγγιση για την ανίχνευση των ινών των τρισδιάστατα εκτυπωμένων σύνθετων υλικών με τη χρήση συμβατικής υπολογιστική μικροτομογραφία και αλγορίθμων νευρωνικού δικτύου για την επεξεργασία εικόνας.

Η εξώθηση υλικού είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη τεχνική τρισδιάστατης εκτύπωσης που είναι αποτελεσματική για την κατασκευή πολύπλοκων γεωμετριών με υψηλή ανάλυση. Περιλαμβάνει την τήξη και την εξώθηση ενός συνεχούς ροής θερμοπλαστικού υλικού μέσω ενός ακροφυσίου, επιτρέποντας τη δημιουργία τρισδιάστατων αντικειμένων στρώση προς στρώση. Η εξώθηση υλικού έχει χαμηλό σχετικό κόστος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με διάφορα υλικά, συμπεριλαμβανομένων πολυμερών και σύνθετων υλικών. Ωστόσο, το προϊόν έχει περιορισμένη αντοχή. Για την ενίσχυση της αντοχής και της ανθεκτικότητας των τρισδιάστατα εκτυπωμένων τεμαχίων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν υλικά ενίσχυσης, όπως ίνες.

Τόσο οι κοντές όσο και οι μακριές ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τρισδιάστατα εκτυπωμένων σύνθετων υλικών. Το μήκος της ίνας έχει σημαντική επίδραση στις ιδιότητες του τελικού σύνθετου υλικού. Οι μακριές ίνες έχουν μεγαλύτερη ικανότητα μεταφοράς

φορτίου και απορρόφησης ενέργειας από τις κοντές ίνες, οδηγώντας σε βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες στο σύνθετο υλικό που προκύπτει. Αυτό έχει αποδειχθεί για τρισδιάστατα εκτυπωμένα σύνθετα υλικά που μπορούν να έχουν ιδιότητες εφελκυσμού μια τάξη μεγέθους υψηλότερες από τα καθαρά πολυμερή και τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με κοντές ίνες, φτάνοντας τις ιδιότητες των μετάλλων.

Όταν χρησιμοποιούνται ίνες ως ενίσχυση, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη παράγοντες όπως ο τύπος, ο προσανατολισμός και το κλάσμα όγκου των ινών στο υλικό. Διαφορετικοί τύποι ινών, όπως ο άνθρακας, το γυαλί ή το Kevlar, διαθέτουν μοναδικές μηχανικές ιδιότητες και είναι κατάλληλοι για διαφορετικές εφαρμογές. Ο προσανατολισμός των ινών σε σχέση με τα εφαρμοζόμενα φορτία έχει επίσης σημαντικό αντίκτυπο στις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου, με τις ίνες που είναι προσανατολισμένες προς την κατεύθυνση των φορτίων να είναι πιο αποτελεσματικές. Το κλάσμα όγκου των ινών στο υλικό μπορεί επίσης να επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες του τεμαχίου, με υψηλότερα κλάσματα όγκου να οδηγούν σε υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα.

Η τομογραφία (micro-CT) είναι μια ισχυρή τεχνική απεικόνισης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της εσωτερικής μικροδομής των τρισδιάστατα εκτυπωμένων εξαρτημάτων. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον εντοπισμό πιθανών προβλημάτων που μπορούν να επηρεάσουν τις μηχανικές ιδιότητες των εξαρτημάτων. Η υπολογιστική μικροτομογραφία περιλαμβάνει τη σάρωση του εξαρτήματος και στη συνέχεια την ανακατασκευή των εικόνων σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο. Αναλύοντας αυτό το μοντέλο, μπορεί κανείς να βελτιστοποιήσει την απόδοση του εξαρτήματος εντοπίζοντας περιοχές όπου το κλάσμα όγκου ινών είναι πολύ χαμηλό. Αυτή η τεχνική μπορεί να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την εσωτερική δομή του εξαρτήματος, επιτρέποντας το σχεδιασμό εξαρτημάτων με καλύτερες επιδόσεις. Η ανάλυση των εικόνων υπολογιστική μικροτομογραφία που λαμβάνονται με τη χρήση συμβατικού εξοπλισμού, όπως το Bruker Skyscan 1172, δεν είναι όμως τόσο υψηλή όσο αυτή που λαμβάνεται με τη χρήση εγκαταστάσεων synchrotron.

Η κατωφλίωση είναι μια μέθοδος μετατροπής μιας εικόνας σε ασπρόμαυρη με το διαχωρισμό των εικονοστοιχείων σε δύο κατηγορίες με βάση μια συγκεκριμένη τιμή έντασης. Η κατωφλίωση του Otsu είναι μια κοινή μέθοδος για τον αυτόματο προσδιορισμό της τιμής κατωφλίου μεγιστοποιώντας τη διαφορά μεταξύ των δύο κλάσεων. Όταν όμως η ποιότητα της εικόνας είναι

χαμηλή, οι τιμές έντασης μπορεί να είναι ανομοιόμορφες και η αντίθεση μεταξύ του προσκηνίου και του παρασκηνίου μπορεί να είναι ασθενής, καθιστώντας δύσκολη τη χρήση της κατωφλίσωσης Otsu για τον ακριβή προσδιορισμό της τιμής κατωφλίου. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η ανίχνευση και ο διαχωρισμός αντικειμένων μπορεί να μην είναι δυνατός ή να είναι αναξιόπιστος.

Μια εναλλακτική προσέγγιση για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος είναι η χρήση σύγχρονων μεθόδων ανίχνευσης και διαχωρισμού αντικειμένων. Η ανίχνευση και ο διαχωρισμός αντικειμένων είναι τεχνικές οράσεως των υπολογιστών που περιλαμβάνουν τον εντοπισμό, την εύρεση και τον διαχωρισμό αντικειμένων σε μια εικόνα ή ένα βίντεο με τη χρήση διαφόρων αλγορίθμων, όπως οι μέθοδοι που βασίζονται στη βαθιά μάθηση και χρησιμοποιούν νευρωνικά δίκτυα. Στόχος της ανίχνευσης και τμηματοποίησης αντικειμένων είναι ο ακριβής εντοπισμός και η κατηγοριοποίηση αντικειμένων, κάτι που έχει δυνητικές εφαρμογές σε τομείς όπως τα αυτόνομα οχήματα, η επανδρωμένη οχήματα και η ανάκτηση εικόνων.

Οι αλγόριθμοι βαθιάς μάθησης, όπως τα νευρωνικά δίκτυα συνελίζεων (CNN), μπορούν να εκπαιδευτούν για να αναγνωρίζουν μοτίβα και χαρακτηριστικά σε εικόνες και να ταξινομήσουν τα εικονοστοιχεία ως ανήκοντα στην μήτρα ή στις ίνες. Αυτοί οι αλγόριθμοι είναι σε θέση να εκπαιδευτούν από ένα μεγάλο σύνολο δεδομένων επισημασμένων εικόνων και είναι πιο ανθεκτικοί στο θόρυβο και στις διακυμάνσεις της έντασης από ό,τι οι παραδοσιακές τεχνικές κατωφλίσωσης.

Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διερευνήσει τη χρήση συμβατικής υπολογιστική μικροτομογραφία και νευρωνικών δικτύων (NN) για τον εντοπισμό των ινών των τρισδιάστατα εκτυπωμένων σύνθετων υλικών αυτοματοποιημένα, με τη χρήση αλγορίθμων εντοπισμού και διαχώρησης αντικειμένων. Η προσέγγιση αυτή αποσκοπεί στην παράκαμψη των ζητημάτων που σχετίζονται με τη χρήση εγκαταστάσεων synchrotron και επιτρέπει την ακριβή ανακατασκευή της εσωτερικής γεωμετρίας με συμβατική υπολογιστική μικροτομογραφία.

Αυτό το πρότζεκτ βασίστηκε σε έναν υπολογιστή με Windows 10, επεξεργαστή Ryzen 7 3800XT, 16 GB μνήμης RAM DDR4 και μια κάρτα γραφικών GTX 1070. Στόχος του πρότζεκτ ήταν να εντοπιστεί ένας αλγόριθμος που να είναι εύκολα διαθέσιμος, αποδοτικός και συμβατός με περιορισμένους πόρους, όπως ένας μέτριας ικανότητας οικιακός υπολογιστής. Το Roboflow χρησιμοποιήθηκε για την επισήμανση, την εμπλούτιση και την εξαγωγή των εικόνων που θα εκπαιδευόταν το μοντέλο, ενώ ο αλγόριθμος YOLOv7 εγκαταστάθηκε και χρησιμοποιήθηκε εντός

της πλατφόρμας διανομής Python, Anaconda. Στη συνέχεια δημιουργήθηκε μια προσαρμοσμένη έκδοση του μοντέλου YOLOv7 Tiny, ενσωματώνοντας την αρχική ραχοκοκαλιά και την κεφαλή του YOLOv7 Tiny μαζί με το τμήμα διαχώρησης αντικειμένων. Το Roboflow επιλέχθηκε για τη δημιουργία του συνόλου των εικόνων για την εκπαίδευση λόγω της φιλικής προς το χρήστη διεπαφής του και των εκτεταμένων χαρακτηριστικών εμπλούτισης εικόνας. Επίσης απλοποίησε τη διαδικασία εξαγωγής των εικόνων, επιτρέποντας την επιλογή μορφότυπου συνόλου δεδομένων συμβατού με το YOLO και επιτρέποντας τον εκ των προτέρων προσδιορισμό του συνόλου εικόνων εκπαίδευσης και του συνόλου επικύρωσης. Το σύνολο επικύρωσης αξιολογεί τις επιδόσεις του μοντέλου κατά την εκπαίδευση, εκτιμά τη γενίκευσή του σε μη ειδικά δεδομένα και λαμβάνει αποφάσεις σχετικά με τις υπερπαραμέτρους, την επιλογή μοντέλου και την πρόωρη διακοπή της εκπαίδευσης για την ενίσχυση της ικανότητας γενίκευσής του σε περισσότερα δεδομένα.

Το πρότζεκτ αυτό επικεντρώνεται σε εργασίες ανίχνευσης ινών Kevlar και ινών άνθρακα. Για τη βελτιστοποίηση του χρόνου δημιουργίας του συνόλου εικόνων προς εκπαίδευση οι αρχικές εικόνες περικόπηκαν σε μικρότερα κομμάτια. Στη συνέχεια, διαμορφώθηκαν και δοκιμάστηκαν διάφορες εμπλοτίσεις μέσω του Roboflow, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών προεπεξεργασίας, προσαρμογών φωτεινότητας και συντελεστών περικοπής. Αυτές οι δοκιμές βοήθησαν στον προσδιορισμό των καταλληλότερων ρυθμίσεων για κάθε μία από τις δύο εργασίες, όπως η αύξηση της φωτεινότητας για προβλέψεις σε περιοχές χαμηλότερης ή υψηλότερης φωτεινότητας και η περικοπή τις εικόνας για εντοπισμό των περιστασιακών μεγαλύτερων ινών.

Η μετρική mAP-0.5 (μέση ακρίβεια για τιμή της Διασταύρωσης επί της Ένωσης (IoU) ίση με 0.5) χρησιμοποιείται εδώ για την αξιολόγηση της απόδοσης της ανίχνευσης αντικειμένων. Η μετρική υπολογίζει τη μέση ακρίβεια του μοντέλου όταν η τιμή του IoU μεταξύ του προβλεπόμενου απο το μοντέλο οριοθετημένου πλαισίου και της βασικής αλήθειας της εικόνας ορίζεται σε 50%. Αυτή η μετρική αξιολογεί την ικανότητα του μοντέλου να εντοπίζει με ακρίβεια αντικείμενα σε μια εικόνα, επιτρέποντας παράλληλα έναν ορισμένο βαθμό σφάλματος εντοπισμού. Η βαθμολογία mAP-0.5 κυμαίνεται από 0 έως 1, με τη βαθμολογία 1 να υποδηλώνει τη βέλτιστη απόδοση και τη βαθμολογία 0 τη χειρότερη δυνατή απόδοση. Τιμές μεγαλύτερες του 0.5 θεωρούνται αποδεκτές και μεγαλύτερες του 0.7 είναι θεμιτές.

Το μοντέλο ινών Kevlar εκπαιδεύτηκε σε ένα προσεκτικά επισημασμένο σύνολο 30 εικόνων, προεπεξεργασμένων και εμπλουτισμένων στο Roboflow με αυτόματο προσανατολισμό, αύξηση ευκρίνειας και προσαρμογή φωτεινότητας. Το mAP-0,5 του μοντέλου ξεπέρασε το 0,9, υποδεικνύοντας επαρκή απόδοση. Το μοντέλο ινών άνθρακα εκπαιδεύτηκε χρησιμοποιώντας 40 εικόνες, ακολουθώντας την παραπάνω διαδικασία, αλλά ταυτοχρόνως προσθέτοντας και την εμπλούτιση του ποσοστού περικοπής εικόνας. Το mAP-0,5 του μοντέλου ξεπέρασε το 0,85, υποδεικνύοντας και πάλι την επαρκή απόδοσή του.

Για να επιτευχθούν ακριβείς προβλέψεις, οι ρυθμίσεις πρόβλεψης του αλγόριθμου προσαρμόστηκαν ώστε να ταιριάζουν σε κάθε μία από τις δύο εργασίες, ρυθμίζοντας λεπτομερώς την τιμή IoU για την πρόβλεψη αυτή τη φορά και την τιμή της εμπιστοσύνης, όπου είναι η τιμή εμπιστοσύνης (από το 0 έως το 1) που απαιτείται για την αποδοχή μίας πρόβλεψης ενός αντικειμένου ως έγκυρης και αξιόπιστης.

Αφού δημιουργήθηκαν προσαρμοσμένα μοντέλα για κάθε σύνθετο υλικό, χρησιμοποιήθηκαν για προβλέψεις χιλιάδων φωτογραφιών που παρείχε το VUB, με κάθε σύνθετο υλικό να έχει περίπου 17000 εικόνες που χρειάζονταν πρόβλεψη. Ο αλγόριθμος εκτέλεσε την κάθε διαδικασία σε λιγότερο από 4 λεπτά.

Τα αξιόλογα αποτελέσματα στην περίπτωση των ινών Kevlar, αλλά και άνθρακα, σε συνδυασμό με την βελτιστοποιημένη σε χρόνο διαδικασία προετοιμασίας των απαιτούμενων εικόνων, αλλά και την ταχύτητα του YOLO στην εκπαίδευση του μοντέλου και στην πρόβλεψη των εικόνων, καθιστούν την παρούσα έρευνα ως μια σημαντική προσθήκη στην παγκόσμια βιβλιογραφία. Τέλος, τα αποτελέσματα θα αξιοποιηθούν στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας για την πρόβλεψη των μηχανικών ιδιοτήτων του σύνθετου τρισδιάστατα εκτυπωμένου υλικού.

- **Additive manufacturing (AM):** Η προσθετική κατασκευή, ή αλλιώς τρισδιάστατη εκτύπωση, είναι μια διαδικασία κατασκευής που δημιουργεί τρισδιάστατα αντικείμενα προσθέτοντας στρώματα υλικού ένα πάνω στο άλλο, επιτρέποντας τη δημιουργία πολύπλοκων γεωμετριών και προσαρμοσμένων σχεδίων.
- **Material extrusion (ME):** Η εκτύπωση υλικού μέσω εξωθήσεως είναι μια διαδικασία κατασκευής που χρησιμοποιεί την εξωθητική δύναμη για την απόθεση και συμπύκνωση στρώσεων υλικού, όπως πλαστικό ή μέταλλο, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα τρισδιάστατο αντικείμενο.
- **Fused filament fabrication (FFF):** Η συγκόλληση και αποτύπωση νήματος είναι μια διαδικασία παραγωγής τρισδιάστατων αντικειμένων όπου το θερμαινόμενο νήμα υλικού πλαστικοποιείται και κατατοπιάζεται στρώση πάνω σε στρώση για την κατασκευή του αντικειμένου.
- **micro Computed Tomography (micro-CT):** Η μικροϋπολογιστική τομογραφία είναι μια μη-καταστροφική τεχνική απεικόνισης που χρησιμοποιεί την τεχνολογία των ακτίνων X για την παραγωγή τρισδιάστατων εικόνων υψηλής ανάλυσης μικρών αντικειμένων ή δειγμάτων.
- **Deep learning (DL):** Η βαθιά μάθηση είναι μια υποκατηγορία της μηχανικής μάθησης (machine learning) που χρησιμοποιεί τεχνητά νευρωνικά δίκτυα για την ανάλυση και εξαγωγή συνθέσεων πολύπλοκων προτύπων από μεγάλα σετ δεδομένων.
- **Convolutional neural networks (CNN):** Τα νευρωνικά δίκτυα συνελιζέων είναι μια κατηγορία τεχνητών νευρωνικών δικτύων που είναι ειδικά σχεδιασμένα για την επεξεργασία και ανάλυση πληροφοριών σε εικόνες και την αναγνώριση μοτίβων.
- **Instance segmentation:** Ο επιμέρους εντοπισμός είναι η διαδικασία ανάθεσης συγκεκριμένων ετικετών και οριοθέτησης σε κάθε μεμονωμένο αντικείμενο που βρίσκεται σε μια εικόνα.
- **Image annotation:** Η επισήμανση εικόνας είναι η διαδικασία προσθήκης ετικετών σε μια εικόνα, προκειμένου να παρέχεται πληροφορία για το περιβάλλον ή να δυνατοποιείται η αυτόματη αναγνώριση και ανάλυση συγκεκριμένων αντικειμένων ή περιοχών εντός της εικόνας.
- **Hyperparameters:** Οι υπερπαραμέτροι είναι προσαρμόσιμες παράμετροι που καθορίζουν την αρχιτεκτονική και τη συμπεριφορά ενός νευρωνικού δικτύου, όπως ο αριθμός των στρωμάτων, οι διαστάσεις των φίλτρων, ο ρυθμός μάθησης και το μέγεθος πακέτων, επηρεάζοντας την εκπαίδευση και την απόδοσή του.
- **Image augmentation:** Η εμπλούτιση εικόνας είναι η τεχνική εφαρμογής διάφορων μετασχηματισμών για τη διεύρυνση ενός συνόλου δεδομένων και την ενίσχυση της ποικιλίας και της ανθεκτικότητας των μοντέλων μηχανικής μάθησης που βασίζονται σε εικόνες.
- **Intersection over Union (IoU) threshold:** Το IoU είναι ένας δείκτης που μετρά την επικάλυψη μεταξύ δύο ορθογωνίων περιοχών ή περιοχών ενδιαφέροντος, χρησιμοποιούμενος για την αξιολόγηση της ακρίβειας αλγορίθμων εντοπισμού αντικειμένων.
- **Confidence threshold:** Είναι μια προκαθορισμένη τιμή που χρησιμοποιείται σε αλγορίθμους εντοπισμού αντικειμένων για να καθορίσει τον ελάχιστο επίπεδο εμπιστοσύνης που απαιτείται για ένα αντικείμενο ή μια πρόβλεψη για να θεωρηθεί έγκυρη ή αξιόπιστη.
- **Mean average precision for an IoU threshold of 0.5(mAP-0.5):** Η μέση Απόδοση στο 0.5 IoU είναι μια μετρική που υπολογίζει τη μέση ακρίβεια αλγορίθμων εντοπισμού αντικειμένων, λαμβάνοντας υπόψη ένα IoU της τάξης του 50%, προκειμένου να αξιολογήσει την ακρίβειά τους στην αναγνώριση αντικειμένων εντός μιας εικόνας.

