

Βελτιστοποίηση της κατεργασίας επιλεκτικής πυροσυσσωμάτωσης και τήξης με laser (SLS/SLM) με βάση αριθμητική προσομοίωση και μηχανική μάθηση

Διδακτορική διατριβή

Εμμανουήλ Σταθάτος

ΕΜΠ, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών

Περίληψη

Η παρούσα έρευνα στοχεύει στην υλοποίηση πλαισίου βελτιστοποίησης της κατεργασίας Επιλεκτικής Πυροσυσσωμάτωσης και Τήξης με laser (SLS/SLM), κάνοντας χρήση της αυξημένης υπολογιστικής αποδοτικότητας μοντέλων μηχανικής μάθησης έναντι μοντέλων φυσικής. Στην κατεργασία SLS/SLM το τελικό τεμάχιο παράγεται ως επαλληλία διαδοχικών στρωμάτων σκόνης, επιλεκτικά συντετηγμένων λόγω θερμότητας που παρέχεται από κινούμενη δέσμη laser. Θεωρητική βελτιστοποίηση της κατεργασίας είναι κρίσιμη για την ωρίμανση της, δεδομένου ότι έως τώρα οδηγείται από γενικά μη βέλτιστες και ασύμφωρες δοκιμές σε πραγματικές μηχανές. Κατόπιν δεκαετιών έρευνας, η θεωρητική μοντελοποίηση της κατεργασίας εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση, κυρίως λόγω του μεγάλου εύρους κλιμάκων στις οποίες απαντώνται κρίσιμα φαινόμενα. Μεταφορά γνώσης μεταξύ μοντέλων διαδοχικών επιπέδων αφαίρεσης στοχεύει σε κλιμακωτή αύξηση του πεδίου εφαρμογής των αντίστοιχων προσομοιώσεων.

Η θερμική ιστορία στρώματος, η οποία εν μέρει οφείλεται στην τοπολογία της εκάστοτε τροχιάς δέσμης, έχει έντονη επίδραση στα τελικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου. Μοντέλα μεμονωμένων κόκκων δεν δύνανται να προσομοιώσουν σημαντικά μήκη ραφής. Μοντέλα χαμηλής ανάλυσης που αναφέρονται σε ολόκληρο τεμάχιο επικαλούνται απλοποιήσεις σχετικά με την θερμική ιστορία κάθε στρώματος. Και στις δύο αυτές ακραίες περιπτώσεις, η κρίσιμη επίδραση μιας συγκεκριμένης στρατηγικής σάρωσης δεν λαμβάνεται υπόψη. Η ενδιάμεση κλίμακα μεμονωμένου στρώματος σκόνης, θεωρούμενου μακροσκοπικά ως συνεχές μέσο, θεωρείται ως η καταλληλότερη για εργασίες βελτιστοποίησης. Η τάση είναι παρακολούθηση και βελτιστοποίηση ποσοτήτων, στο επίπεδο στρώματος, που επιδεικνύουν έντονη συσχέτιση με τα τελικά χαρακτηριστικά του τεμαχίου. Η μέγιστη θερμοκρασία κατά μήκος τροχιάς αποτελεί τυπική επιλογή.

Μοντέλα φυσικής εφαρμόζονται επιτυχώς στο κάτω όριο του επιπέδου στρώματος (~mm). Ωστόσο, ένα στρώμα πρακτικού ενδιαφέροντος απαιτεί πολύ μεγαλύτερες τροχιές (~10² m). Σε αυτή την κλίμακα, προσομοιώσεις φυσικής είναι ασύμφωρες έως και αδύνατες. Επιπλέον, η βελτιστοποίηση τυπικά απαιτεί πολλαπλές προσομοιώσεις για δεδομένο ζητούμενο. Μοντέλα μηχανικής μάθησης επιδεικνύουν την απαιτούμενη υπολογιστική αποδοτικότητα, ωστόσο, μέχρι στιγμής, τυπικά εφαρμόζονται σε τετριμμένες τροχιές ή/και μικρές γεωμετρίες. Βασισμένη σε μοντέλα δυναμική βελτιστοποίηση παραμέτρων κατεργασίας κατά μήκος αυθαίρετης τροχιάς πρακτικού μήκους αποτελεί ανοιχτό πρόβλημα.

Η παρούσα διατριβή αναπτύσσει τρεις πλατφόρμες μοντελοποίησης με αυξανόμενο εύρος εφαρμογής: το Μητρικό Μοντέλο, το Μεταμοντέλο και το Μεταμοντέλο Ισχύος. Το Μητρικό Μοντέλο είναι ένα θερμικό μοντέλο Πεπερασμένων Στοιχείων, βελτιστοποιημένο για σχετικά μικρές τροχιές (~mm). Περιλαμβάνει θερμικά κελύφη, αυτόματη δημιουργία σεναρίων και γεωμετρίας με διαδοχική αραίωση πλέγματος, και

τεχνικές επιτάχυνσης επίλυσης. Επιπλέον, κάνει χρήση εικονικών υλικών για αναπαράσταση ενδιάμεσων καταστάσεων συνένωσης σκόνης. Σκοπός του είναι η αποδοτική παραγωγή μεγάλου όγκου δεδομένων εκπαίδευσης για την υποστήριξη των μοντέλων μηχανικής μάθησης που αναπτύσσονται στην συνέχεια.

Το Μεταμοντέλο είναι μια πλατφόρμα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ), χτισμένη για ταχείες προσομοιώσεις σε πολύ μεγάλες αυθαίρετες τροχιές ($>10^2$ m). Εφαρμόζει το πρότυπο ενός «μαύρου κουτιού» δεμένο στην κινούμενη δέσμη, το οποίο μαθαίνει να υπολογίζει μέγιστη θερμοκρασία και μέση σχετική πυκνότητα κάτω από αυτήν. Η δυναμική πρόβλεψη κατά μήκος τυχαίας τροχιάς εξυπηρετείται από μία πρωτότυπη μέθοδο αποδόμησης τροχιάς, η οποία μειώνει δραστικά την διαστατικότητα της τοπολογικής εισόδου. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός περιγραφέα που παρακολουθεί το σχήμα της τροχιάς, καθώς επίσης και την ιστορία της σε διάφορες εκτάσεις μνήμης. Το αρχικό αυτό πρότυπο μηχανικής μάθησης έχει σειριακό χαρακτήρα, συνεπώς δεν εκμεταλλεύεται την ιδιότητα των ΤΝΔ για παράλληλη επεξεργασία πολλαπλών διανυσμάτων εισόδου. Το κώλυμα δυσχεραίνεται από το γεγονός ότι ανάδραση θερμοκρασίας μεταξύ των βημάτων προσομοίωσης αποδεικνύεται απαραίτητη για αυξημένη ακρίβεια του ΤΝΔ. Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, υλοποιείται ένα επαναληπτικό σχέδιο που επιτρέπει στο Μεταμοντέλο παράλληλες προσομοιώσεις σε ολόκληρες τροχιές, μέσω εκκίνησης από εκτίμηση και, στην συνέχεια, διαδοχικής ανατροφοδότησης και βελτίωσης των αποτελεσμάτων του. Η τελική, βελτιστοποιημένη έκδοση του Μεταμοντέλου επιτυγχάνει μικρότερους χρόνους προσομοίωσης από την διάρκεια της πραγματικής κατεργασίας, γεγονός που αντιστοιχεί σε επίτευγμα υπολογιστικής αποδοτικότητας.

Το Μεταμοντέλο Ισχύος επεκτείνει το Μεταμοντέλο με προσθήκη ισχύος laser στο διάνυσμα εισόδου, προσφέροντας μια ανεξάρτητη μεταβλητή για ρύθμιση θερμοκρασίας. Σκοπός είναι η εύρεση ενός βέλτιστου προφίλ ισχύος, το οποίο να ακυρώνει τα φαινόμενα θερμικής συσσώρευσης που οφείλονται στην τοπολογία της τροχιάς. Αρχικά υλοποιείται ένας βηματικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, ως μέτρο υπολογιστικής αποδοτικότητας. Στην συνέχεια υλοποιείται ένας βελτιωμένος, προσαρμοστικός νόμος ελέγχου, σχεδιασμένος για παράλληλη εφαρμογή σε ολόκληρο το προφίλ ισχύος. Έχει επαναληπτικό χαρακτήρα και επιτυγχάνει ομαλό μέτωπο θερμοκρασίας μετά από μικρό αριθμό επαναλήψεων. Το τελικό πλαίσιο εκμεταλλεύεται επιτυχώς την εξαιρετική ταχύτητα του μοντέλου μηχανικής μάθησης για αποδοτική ρύθμιση θερμοκρασίας μέσω δυναμικής βελτιστοποίησης ισχύος.

Το Μητρικό Μοντέλο, ως βάση της αλυσίδας μηχανικής μάθησης, επικυρώθηκε επιτυχώς από αντίστοιχα μοντέλα και πειράματα της βιβλιογραφίας, επιδεικνύοντας αποκλίσεις μικρότερες από 10%, για τις χειρότερες περιπτώσεις μεταξύ πλήθους σεναρίων σύγκρισης. Τα μεταμοντέλα επιδεικνύουν μέσα σχετικά σφάλματα της τάξης του 1% για μεμονωμένες προσομοιώσεις και μικρότερα από 2% για το τελικό βελτιστοποιημένο προφίλ θερμοκρασίας, ως προς το Μητρικό Μοντέλο. Μελλοντική πρόσβαση σε πειράματα δύναται να επικυρώσει απευθείας ή και να βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια του προτεινόμενου πλαισίου. Εξάλλου, η παρούσα έρευνα κυρίως στοχεύει να αποτελέσει έναν μεθοδολογικό χάρτη για καινοτομική εφαρμογή εργαλείων μηχανικής μάθησης στο σχετικά ανεξερεύνητο πεδίο βελτιστοποίησης της κατεργασίας SLS/SLM.