


ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟ ΡΟΜΠΟΤΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΕ ΑΜΠΕΛΩΝΕΣ

Βασίλειος Μωυσιάδης^{1,2}, Δημήτριος Κατικαρίδης^{1,2}, Δημήτριος Κατέρης¹,  και Διονύσης Μπόχτης¹

¹Ινστιτούτο Βιο-Οικονομίας και Αγρο-Τεχνολογίας (iBO), Εθνικό Κέντρο Έρευνας & Τεχνολογικής Ανάπτυξης – (ΕΚΕΤΑ), 6^ο Χιλ. Χαριλάου-Θέρμης, 57001, Θεσσαλονίκη, Ελλάδα

²Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 35131 Λαμία, Ελλάδα


 d.kateris@certh.gr

Περίληψη

Η διαχείριση των ζιζανίων είναι μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις στην αμπελοκαλλιέργεια, δεδομένου ότι τα ζιζάνια μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στην παραγωγή μέσω του έντονου ανταγωνισμού με την καλλιέργεια. Σε αυτή την κατεύθυνση, η ανάπτυξη μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας παρακολούθησης ζιζανίων θα δώσει χρήσιμα δεδομένα για την κατανόηση των πρακτικών διαχείρισής τους. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση για την ανίχνευση ζιζανίων εντός της σειράς σε αμπελώνες. Παρουσιάζεται ένα καινοτόμο αυτοματοποιημένο ρομποτικό σύστημα το οποίο ανιχνεύει και χαρτογραφεί σε πραγματικό χρόνο την κατανομή των ζιζανίων σε έναν αμπελώνα χρησιμοποιώντας αλγορίθμους βαθιάς μάθησης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε δοκιμάστηκε σε διάφορες συνθήκες με διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης ζιζανίων και απέδωσε με ακρίβεια σε περιπτώσεις όπου τα ζιζάνια είχαν διακριτά όρια.

Λέξεις κλειδιά: Ανίχνευση ζιζανίων, RGB κάμερα, αμπελώνας, μη επανδρωμένο επίγειο όχημα, βαθιά μάθηση.

AN INTEGRATED WEED DETECTION SYSTEM IN VINEYARDS

Vasileios Moysiadis^{1,2}, Dimitrios Katikaridis^{1,2}, Dimitrios Kateris¹,  and Dionysis Bochtis¹

¹Institute for Bio-Economy and Agri-Technology (iBO), Centre for Research and Technology-Hellas (CERTH), 6th km Charilaou-Thermi Rd, 57001, Thessaloniki, Greece

 d.kateris@certh.gr

Abstract

Weeds management is one of the major challenges in vineyard cultivation, as weeds can cause significant losses and intense competition in crops. In this direction, the development of an automated weed monitoring process will provide valuable data for understanding weed management practices. This paper presents a new approach for detecting weeds within vineyards. It introduces an innovative robotic system that detects and maps the distribution of weeds in real-time using a deep learning algorithm. The developed model was tested under various conditions with different levels of weed growth and performed accurately in cases where weeds had distinct boundaries.

Key words: Weed detection, RGB camera, vineyard, UGV, deep learning.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η επιτυχημένη παραγωγή σταφυλιών συνεπάγεται την εφαρμογή πρακτικών διαχείρισης που ελέγχουν τα ζιζάνια διατηρώντας την απόδοση του αμπελιού και την ποιότητα του εδάφους. Η ολοκληρωμένη διαχείριση των ζιζανίων, σε συνδυασμό με τη χρήση αυτόνομων ρομποτικών πλατφορμών (UGVs και UAVs), επιτρέπει την αποτελεσματική διαχείριση των ζιζανίων, ως ευεργετική μεθοδολογία για το περιβάλλον (Jiménez-Brenes et al., 2019).

Είναι γεγονός ότι η τεχνολογία της ρομποτικής χρησιμοποιείται όλο και πιο συχνά τα τελευταία χρόνια. Η χρήση της ρομποτικής στο πεδίο της φυτικής παραγωγής παρέχει εναλλακτικούς τρόπους διαχείρισης των ζιζανίων μετριάζοντας τις βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις της καλλιέργειας. Για παράδειγμα, τα ρομπότ αυτόματης καταπολέμησης των ζιζανίων στις μέρες μας έχουν αντικαταστήσει τα χημικά ζιζανιοκτόνα σε μεγάλο βαθμό (Wu et al., 2021). Σημεία εμφάνισης συστάδων ζιζανίων ανιχνεύονται εντός της καλλιέργειας με τη βοήθεια λήψης εικόνων από UGV και ειδικών αλγορίθμων (Benos et al., 2021; Anagnostis et al., 2021), προκειμένου ένα αυτόνομο ρομποτικό σύστημα να ελέγχει τα ζιζάνια με ψεκασμό ζιζανιοκτόνων ή με μηχανικές διαδικασίες (Moreno et al., 2020).

Προς αυτή την κατεύθυνση έχουν πραγματοποιηθεί διάφορες έρευνες, ενδεικτικά οι Gonzalez de Santos κ.α. στην έρευνά τους πρότειναν μια μέθοδο η οποία χρησιμοποιούσε δεδομένα τα οποία ελήφθησαν από στόλο UAVs και UGVs με RGB (υψηλής χωρική ανάλυσης) και πολυφασματικές κάμερες για την ανίχνευση ζιζανίων (Gonzalez de Santos et al, 2017). Ο μεγάλος όγκος των φωτογραφιών που συλλέχθηκαν τροφοδότησαν την παραγωγή διαφόρων ορθομωσικών για τη διευκόλυνση της διαδικασίας ανίχνευσης των ζιζανίων εντός του χωραφιού. Μια παρόμοια μεθοδολογία, με τη χρήση του αλγορίθμου OBIA, προτάθηκε από τους Peña κ.ά. (Pena et al., 2013). Οι de Castro κ.ά., στο έργο τους δημιούργησαν έναν προσαρμοσμένο αλγόριθμο OBIA για την ταξινόμηση τεσσάρων διακριτικών κατηγοριών κάλυψης εδάφους (αμπέλι, καλυμμένο έδαφος, αγριάδα και γυμνό έδαφος). Με τη χρήση ενός UAV δημιουργήθηκαν τόσο διδιάστατα όσο και τρισδιάστατα ορθομωσικά για την επικύρωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Επιπλέον, για να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα, χρησιμοποιήθηκε ένας χρωματικός δείκτης της βλάστησης για το φιλτράρισμα των διαθέσιμων δεδομένων (de Castro et al., 2017).

Από την άλλη πλευρά, τα τελευταία χρόνια έχουν καταγραφεί η ανάπτυξη πολλών αλγορίθμων μηχανικής μάθησης και βαθιάς μάθησης σε διάφορους επιστημονικούς τομείς. Η κύρια προϋπόθεση για την εκπαίδευση και ενσωμάτωση ενός αλγορίθμου σε οποιοδήποτε σύστημα είναι η διαθεσιμότητα δεδομένων εκπαίδευσης και επικύρωσης. Προς αυτήν την κατεύθυνση, στην εργασία τους οι Olsen κ.ά., πρότειναν ένα ανοικτό πολυκλασικό σύνολο εικόνων για εφαρμογές μηχανικής μάθησης σχετικά με τα είδη ζιζανίων (Olsen et al., 2019). Τα δεδομένα αυτά περιλάμβαναν περισσότερες από 17.000 ετικεταρισμένες εικόνες, ενώ οι συγγραφείς πρότειναν επίσης ένα μοντέλο βαθιάς μάθησης βασισμένο στους αλγόριθμους Inception-v3 και ResNet-50. Βασιζόμενοι στην εργασία των Olsen et al., οι dos Santos Ferreira κ.ά., αξιολόγησαν δύο μη εποπτευόμενους αλγορίθμους βαθιάς ομαδοποίησης βασισμένοι σε δύο σύνολα δεδομένων ζιζανίων (dos Santow Ferreira et al., 2019). Ο πρώτος αλγόριθμος είναι ο Joint Unsupervised Learning of Deep Representations and Image Clusters (JULE) που προτάθηκε από τους Yang κ.ά. (Yang et al., 2016). Ο δεύτερος αλγόριθμος είναι ο Deep Clustering for Unsupervised Learning of Visual Features (DeepCluster) που μαθαίνει από κοινού τις παραμέτρους ενός νευρικού δικτύου και ομαδοποιεί τις εκχωρίσεις των χαρακτηριστικών των αποτελεσμάτων, (Caron et al., 2018). Τα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση των αλγορίθμων ήταν το Grass-Broadleaf από μια προηγούμενη εργασία τους (dos Santos Ferreira et al., 2017) και το DeepWeeds. Για

περαιτέρω έρευνα, οι Hu κ.ά. ανέπτυξαν μια νέα αρχιτεκτονική βαθιάς μάθησης που βασίζεται σε γραφήματα για την αναγνώριση πολλών ειδών ζιζανίων από εικόνες RGB (Hu et al., 2020). Χρησιμοποίησαν επίσης το σύνολο δεδομένων DeepWeeds για την εκπαίδευση του αλγορίθμου. Κάθε μια από τις εικόνες εισόδου ρυθμίστηκε ως ένα γράφημα πολλαπλής κλίμακας, στο οποίο τα μοτίβα των κορυφών συσχετίζονται με τα υποτμήματα της εικόνας, από τοπικές έως παγκόσμιες κλίμακες. Τελικά, βασισμένοι στην εργασία ανασκόπησης του Wu κ.ά., ορισμένες από τις πιο κοινές αρχιτεκτονικές βαθιάς μάθησης εφαρμόστηκαν σε διάφορα δεδομένα ζιζανίων (Wu et al., 2020).

Τέλος οι Kateris κ.α. και οι Moysiadis κ.α. στις εργασίες τους προτείνουν μια νέα τεχνική βασισμένη σε δεδομένα εικόνων προκειμένου να παρέχονται χάρτες στους οποίους θα αποτυπώνεται το ύψος των ζιζανίων στο μονοπάτι μεταξύ των σειρών των αμπελώνων. Οι αλγόριθμοι που αναπτύχθηκαν δοκιμάστηκαν σε μεγάλο όγκο δεδομένων από αμπελώνες με διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης ζιζανίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη τεχνική δίνει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα σε διάφορες συνθήκες πεδίου (Moysiadis et al., 2022; Kateris et al., 2021).

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, πολλές μέθοδοι δοκιμάστηκαν βασιζόμενοι στις απαιτήσεις της εργασίας αυτής. Οι αδυναμίες της μεθόδου OBIA σχετίζονται με το συνεχώς μεταβαλλόμενο λειτουργικό περιβάλλον των αμπελώνων, σε συνδυασμό με τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ. Ειδικά αυτή που σχετίζεται με τους διαθέσιμους πυρήνες CUDA οδήγησε στην επιλογή των μεθόδων Deep Learning. Επιπλέον, η δεύτερη ουσιαστική απόφαση που ελήφθητε βασίστηκε στον τύπο του αλγορίθμου Deep Learning. Υπήρχαν τρεις ουσιαστικές επιλογές: 1. "Μάθηση από το μηδέν" (learn from scratch), 2. χρήση ενός προ-εκπαιδευμένου μοντέλου χρησιμοποιώντας μεταφορά μάθησης (transfer learning), και 3. Λεπτή παραμετροποίηση (fine tuning). Στη μέθοδο "μάθηση από το μηδέν", ήταν απαραίτητο να ξεκινήσει η διαδικασία μάθησης με τυχαία βάρη. Αυτή η μέθοδος σχετίζεται με την χρήση πολλών εικόνων για τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Στη μέθοδο λεπτής παραμετροποίησης, τα βάρη που αρχικοποιήθηκαν χρησιμοποιήσαν ένα προ-εκπαιδευμένο μοντέλο από τον ίδιο τομέα τα οποία επαναχρησιμοποιήθηκαν και επιχειρήθηκε η επανεκπαίδευση του μοντέλου στα νέα δεδομένα με πολύ χαμηλό ρυθμό εκμάθησης. Η μεταφορά μάθησης είναι παρόμοια με τη μέθοδο βελτιστοποίησης με την προσθήκη ότι τα βάρη από το προ-εκπαιδευμένο μοντέλο δεν ήταν απαραίτητα από τον ίδιο τομέα. Οι δύο τελευταίες μέθοδοι χρησιμοποιούνται συνήθως όταν τα διαθέσιμα δεδομένα αποτελούνται από ένα μικρό αριθμό εικόνων. Τα πλεονεκτήματα των μεθόδων μεταφοράς μάθησης και λεπτής παραμετροποίησης οδήγησαν στην επιλογή ενός συνδυασμού των δύο μεθόδων.

Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από δύο ουσιαστικά υποσυστήματα. Το πρώτο είναι η αυτόνομη ρομποτική πλατφόρμα (Thorvald, SAGA Robotics) που φέρει όλους τους απαραίτητους αισθητήρες μαζί με την απαιτούμενη υπολογιστική ισχύ (Σχήμα 1α), ενώ το δεύτερο υποσύστημα είναι ο αναπτυγμένος αλγόριθμος ανίχνευσης ζιζανίων. Στην αυτόνομη ρομποτική πλατφόρμα τοποθετήθηκαν τέσσερις διαφορετικοί τύποι αισθητήρων. Αναλυτικότερα τοποθετήθηκαν, α) Ένας σαρωτής λέιζερ (Lidar), β) ένα RTK GPS, γ) δύο αισθητήρες IMU και δ) μια RGB κάμερα. Οι τρεις πρώτοι αισθητήρες χρησιμοποιήθηκαν για τη διευκόλυνση της αυτόνομης πλοήγησης και ο τέταρτος για την ανίχνευση των ζιζανίων. Όλοι οι αισθητήρες τοποθετήθηκαν στο ρομποτικό πλαίσιο με σκοπό την ελαχιστοποίηση του σφάλματος των δεδομένων εισόδου, όπως φαίνεται στο σχήμα που ακολουθεί (Σχήμα 1β). Η

θέσεις των ζιζανίων από το RPN και τις ταξινομεί, και στο τρίτο στάδιο δημιουργήθηκαν τα οι προτεινόμενες περιοχές μέσα στην εικόνα που εμπεριέχουν ζιζάνια. Σε αυτό το στάδιο, λαμβάνονται οι προτεινόμενες περιοχές από το προηγούμενο επίπεδο και εκτελείται ένας αλγόριθμος για την δημιουργία μασκών για κάθε περίπτωση (mask generation). Επιπλέον, ελήφθησαν εικόνες και με μια διαφορετική RGB κάμερα προκειμένου να γίνει με αυτό το άγνωστο σετ δεδομένων ο έλεγχος της απόδοσης του μοντέλου. Στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 2) παρουσιάζονται έξι εικόνες με διάφορες γωνίες που καταγράφηκαν σε διάφορες περιόδους καλλιέργειας. Επίσης, στους ακόλουθους πέντε πίνακες παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε ποικιλία (Πίνακας 1-5).



Εικόνα 2. Επικύρωση από άγνωστες εικόνες.

Πίνακας 1. Ποικιλία Sauvignon Blanc, Αριθμός δειγμάτων: 52

Accuracy	Precision	Recall	F1
0,91	0,96	0,91	0,94

Πίνακας 2. Ποικιλία Chardonnay variety, Αριθμός δειγμάτων: 48

Accuracy	Precision	Recall	F1
0,93	0,89	0,93	0,91

Πίνακας 3. Ποικιλία Malagouzia, Αριθμός δειγμάτων: 76

Accuracy	Precision	Recall	F1
0,77	0,96	0,77	0,85

Πίνακας 4. Ποικιλία Syrah, Αριθμός δειγμάτων: 84

Accuracy	Precision	Recall	F1
0,75	0,93	0,75	0,83

Πίνακας 5. Σύνολο, Αριθμός δειγμάτων: 260

Accuracy	Precision	Recall	F1
0,84	0,94	0,84	0,87

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συμπερασματικά, η παρούσα εργασία έχει ως σκοπό να παρέχει μια λύση στη διαχείριση των ζιζανίων, μία από τις κύριες προκλήσεις στην αμπελουργία, δεδομένου ότι τα ζιζάνια μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές απώλειες στην παραγωγή και σκληρό ανταγωνισμό στην καλλιέργεια. Σύμφωνα με αυτό, η ανάπτυξη μιας πλήρως αυτοματοποιημένης διαδικασίας για την παρακολούθηση των ζιζανίων θα παρέχει χρήσιμα δεδομένα για την κατανόηση των πρακτικών διαχείρισης των ζιζανίων. Επίσης, η εργασία αυτή στοχεύει στην παρουσίαση μιας νέας τεχνικής βασισμένης σε εικόνες που αναπτύχθηκε για την ανίχνευση ζιζανίων στο μονοπάτι μεταξύ των σειρών στους αμπελώνες. Το αναπτυγμένο μοντέλο δοκιμάστηκε σε διάφορες συνθήκες αμπελώνων στο πεδίο με διάφορα επίπεδα ανάπτυξης των ζιζανίων και είχε ακρίβεια στις περιπτώσεις όπου τα ζιζάνια είχαν διακριτά όρια. Από την άλλη, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο παρέχει ελπιδοφόρα αποτελέσματα σε διάφορες συνθήκες στον αγρό και σε συνθήκες όπου δεν υπάρχουν διακριτά όρια μεταξύ των ζιζανίων.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα χρηματοδοτήθηκε από το έργο HORIZON 2020 "BACCHUS: Mobile Robotic Platforms for Active Inspection and Harvesting in Agricultural Areas" (κωδικός έργου: 871704), το οποίο χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, στο πλαίσιο της πρόσκλησης H2020-ICT-2018-2020.

5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Anagnostis, A., Tagarakis, A.C., Asiminari, G., Papageorgiou, E., Kateris, D., Moshou, D., Bochtis, D., 2021. A deep learning approach for anthracnose infected trees classification in walnut orchards. *Computers and Electronics in Agriculture*, 182, 105998.
- Benos, L., Tagarakis, A.C., Dolias, G., Berruto, R., Kateris, D., Bochtis, D., 2021. *Machine Learning in Agriculture: A Comprehensive Updated Review*. *Sensors*, 21, 3758.
- Caron, M., Bojanowski, P., Joulin, A., and Douze, M., 2018. *Deep Clustering for Unsupervised Learning of Visual Features*, Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 11218, 139–156.
- de Castro, A. I., Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Jiménez-Brenes, F., and López-Granados, F., 2017. *Mapping Cynodon dactylon in vineyards using UAV images for site-specific weed control*, *Advances in Animal Biosciences*, 8(2), 267–271.
- dos Santos Ferreira, A., Freitas, D. M., da Silva, G. G., Pistori, H. and Folhes, M. T., 2019. *Unsupervised deep learning and semi-automatic data labeling in weed discrimination*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 165, 104963.
- dos Santos Ferreira, A., Matte Freitas, D., Gonçalves da Silva, G., Pistori, H. and Theophilo Folhes, M., 2017. *Weed detection in soybean crops using ConvNets*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 314–324.
- Gonzalez-de-Santos, P. et al., 2017. *Fleets of robots for environmentally-safe pest control in agriculture*, *Precision Agriculture*, 18(4), 574–614.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., Sun, J., 2016. *Deep residual learning for image recognition*. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 770–778.
- He, K., Gkioxari, G., Dollár, P., Girshick, R., 2017. *Mask R-CNN*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 42(2), 386–397.
- Hu, K., Coleman, G., Zeng, S., Wang, Z. and Walsh, M., 2020. *Graph weeds net: A graph-based deep learning method for weed recognition*, *Computers and Electronics in Agriculture*, 174, 105520.
- Jiménez-Brenes, F.M., López-Granados, F., Torres-Sánchez, J., Peña, J.M., Ramírez, P., Castillejo-González, I.L., de Castro, A.I., 2019. *Automatic UAV-based detection of Cynodon dactylon for site-specific vineyard management*. *PLoS ONE*, 14, e0218132.
- Kateris, D., Kalaitzidis, D., Moysiadis, V., Tagarakis, A. C., Bochtis, D., 2021. *Weed Mapping in Vineyards Using RGB-D Perception*, *Engineering proceedings*, 9, 30.
- Lu, X., Kang, X., Nishide, S., Ren, F., 2019. *Object detection based on SSD-ResNet*. *Proceedings of 6th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems CCIS*, 89–92.
- Moreno, H., Rueda-Ayala, V., Ribeiro, A., Bengochea-Guevara, J., Lopez, J., Peteinatos, G., Valero, C., Andújar, D., 2020. *Evaluation of vineyard cropping systems using on-board rgb-depth perception*. *Sensors*, 20, 6912.
- Moysiadis, V., Kateris, D., Katikaridis, D., Vasileiadis, G., Kolorizos, V., Tagarakis, A. C., Bochtis, D., 2022. *A Real-time Approach System for Vineyards Intra-row Weed Detection*. *Proceedings of HAICTA 2022*, 39-44.
- Olsen et al., A., 2019. *DeepWeeds: A Multiclass Weed Species Image Dataset for Deep Learning*, *Scientific Reports* 9(1), 1–12.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., and López-Granados, F., 2013. *Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images*, *PLOS ONE*, 8(10).

- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., and López-Granados, F., 2013. *Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images*, PLOS ONE, 8(10).
- Wu, Z., Chen, Y., Zhao, B., Kang, X. and Ding, Y., 2021. *Review of Weed Detection Methods Based on Computer Vision*, Sensors 21(11), 3647.
- Yang, J., Parikh, D. and Batra, D., 2016. *Joint unsupervised learning of deep representations and image clusters*, Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 5147–5156.