

Drohnenbasierte Ermittlung des Fractional green Vegetation Cover (FVC)

Görres J. Grenzdörffer¹

Zusammenfassung

Der Fractional green Vegetation Cover (FVC) ist ein zentraler Parameter zur Beschreibung der Vegetationsbedeckung und wird sowohl in der Landwirtschaft als auch in der Satellitenfernerkundung eingesetzt. In diesem Beitrag wird untersucht, inwieweit sich etablierte terrestrische Kamera/RGB-basierte Verfahren zur Trennung von Boden und grüner Vegetation auf sehr hochaufgelöste Drohnenaufnahmen übertragen lassen. Dazu wurden verschiedene Drohnen- und Kamerasysteme mit unterschiedlichen Bodenaufösungen verglichen. Der Fokus liegt auf dem Einfluss von Flughöhe, Sensorik, Beleuchtungsbedingungen und Vorverarbeitung auf die berechneten FVC-Werte. Die Ergebnisse zeigen, dass die räumliche Auflösung und die Aufnahmebedingungen einen entscheidenden Einfluss auf den FVC haben und je nach verwendetem Index zu systematischen Abweichungen führen können. Für eine direkte Übertragbarkeit des terrestrischen Verfahrens sind Telekameras moderner Drohnen perfekt geeignet, die in der Lage sind eine vorab definierte Position mit Dezimetergenauigkeit anzufliegen.

Schlagwörter FVC · Telekamera · Bewegungsunschärfe · Drohnen

1 Einführung

Der Anteil grüner Vegetation ist ein wichtiger Parameter, der sowohl für unterschiedlichste landwirtschaftliche als auch für landschaftsökologische und hydrologische Fragestellungen in sehr verschiedenen Skalen, sowie zur Klimamodellierung verwendet wird. Aufbauend auf der Definition von (Carlson & Ripley, 1997) steht der FVC (Fraction of Vegetation Cover) für den Anteil einer Fläche, welche durch grüne, d.h. vitale Vegetation bedeckt ist. Der FVC umspannt Werte von 0 bis 100%. Der FVC steht für die räumliche Abdeckung der Vegetation – ein mehrschichtiger Aufbau der Vegetation, z.B. durch überlagernde Blätter hat keinen Einfluss auf den FVC. D.h. der FVC kann für alle Arten von Vegetation berechnet werden und umfasst in der Regel landwirtschaftliche Kulturen, Grünland, strauchartige Vegetation und Wald.

Für den FVC, dessen Abkürzung vor allem in der Satellitenfernerkundung gebräuchlich ist, finden sich in der Literatur mehrere Synonyme für den FVC. Z.B. GCC (Green Canopy Cover), GVF (green vegetation fraction) (Imukova et al., 2015), FGCC (Fractional Green Canopy Cover) (Patrignani and Ochsner, 2015), Green Fractional Vegetation (Song et al., 2015) oder auch FV (Fractional Vegetation) (Gitelson et al., 2002).

Der FVC ist nicht mit dem Blattflächenindex (LAI) zu verwechseln. Der Bodenbedeckungsgrad nimmt mit dem LAI zu, wenn auch nicht linear.

Der FVC wird in zwei verschiedenen Skalen für ganz unterschiedliche Zwecke verwendet. Zum einen für konkrete landwirtschaftliche Fragestellungen, z.B. zur Erfassung der Feldaufgangsrates, der Bestandsdichte, der Vollständigkeit der Etablierung von Untersaaten, zur Bestimmung der Gesamtbiomasse oder der Unkrautdichte. Zum anderen in der Satellitenfernerkundung auf der regionalen bis globalen Ebene.

In der Satellitenfernerkundung stellt der FVC einen wichtigen Parameter zur Beschreibung der Vegetationsbedeckung auf der Erdoberfläche dar (Baret et al., 2013) und wird auch als wichtiger Indikator für die Veränderung von z.B. Waldökosystemen betrachtet (Hansen et al., 2013). Darüber hinaus ist der FVC in regionale und globale Klimamodelle integriert, da durch den FVC eine prozentuale Trennung von Vegetation und Boden vorgenommen werden kann. Diese haben unterschiedliche Energiebilanzen, einschließlich Temperatur und Evapotranspiration. Der FVC kann auch als Indikator zur Erosionsminderung durch Vegetation genutzt werden (Niu et al., 2014). Kim et al. (2020) nutzen den FVC zur Untersuchung der Desertifikation der mongolischen Steppe.

¹ Universität Rostock, Professur für Geodäsie und Geoinformatik, J.-v.-Liebig Weg 6, D-18059 Rostock
E-Mail: goerres.grenzdorffer@uni-rostock.de

Unabhängig von der Methodik steht die fernerkundliche Bestimmung des FVC mit mittel und hoch aufgelösten Satellitendaten vor der Herausforderung, dass der FVC aktuell für fernerkundliche Kalibrations- und Validationszwecke Zwecke nur punktuell zur Verfügung steht und nicht in der Fläche, die ein oder mehrere Pixel hoch oder mittel aufgelöster Satellitendaten umfasst. Unter anderem deshalb besteht Bedarf an einfachen und effizienten Methoden zur terrestrischen Bestimmung des FVC.

1.1 Terrestrische Messung des FVC

Für die terrestrische Ermittlung des FVC gibt es ein etabliertes Verfahren: Die Aufnahme mit einer RGB-((Handy)kamera) aus geringer Höhe (1 – 3 m), entweder aus der Hand oder mit Hilfe einer Leiter, (Patrignani and Ochsner, 2015). Alternativ dazu, können für Precision Farming Anwendungen auch Aufnahmen von einem Traktor aus gemacht werden (Riehle et al., 2020).

Der Berechnung des FVC mittels RGB-Aufnahmen liegt eine Trennung von Boden und Pflanzen zugrunde. Die meisten Verfahren beruhen darauf, dass vitale grüne Pflanzen signifikant andere Reflexionseigenschaften in den RGB-Bildern als unbedeckter bzw. durch Stroh oder Steine bedeckter Boden haben. Dies ist in der Praxis gar nicht so trivial, denn mehrere Faktoren beeinflussen die Reflexionseigenschaften von Vegetation und Böden. Das Reflexionsverhalten des Bodens wird beispielsweise vor allem durch die Bodenfeuchte stark beeinflusst. Trockene Böden sind generell heller als nasse, bzw. feuchte Böden. Die grüne Farbe der Vegetation ist kulturartenabhängig und variiert im Laufe der Vegetationsperiode durch den Alterungsprozess der Blätter, aber auch in Abhängigkeit der Düngung und anderen Stressoren, wie z.B. Trockenstress oder Pflanzenkrankheiten.

Ein weiter wichtiger Einflussfaktor bei der Datenerfassung spielen die Witterungsbedingungen bei der Datenaufnahme, genauer gesagt sonniger vs. bedeckter Himmel. Bei sonnigem Himmel ist die Trennung zwischen Boden und Vegetation ungleich schwieriger, da der Schattenanteil zusätzlich berücksichtigt werden muss. Zugleich kann die Vegetation oder auch der Boden, bzw. Steine je nach Exposition und Sonnenstand überstrahlt werden. Bei bewölktem Himmel, bzw. diffuser Beleuchtung trifft dies nicht zu, was die Auswertung erheblich vereinfacht.

Farbluftbilder sind in der Regel nicht radiometrisch, d.h. spektral kalibriert. Vielmehr macht die Kamera einen automatischen Weißabgleich, um die Farbwerte auszugleichen. Handelsübliche Kameras berechnen in der Regel automatisch aus einer Kombination von Belichtungszeit, Blende und ISO-Wert die „optimale“ Helligkeit für das gesamte

Bild. Das führt dazu, dass die Grauwerte der einzelnen Kanäle sehr unterschiedliche Werte annehmen können. Im Zuge der Vorverarbeitung des Originalbildes wird versucht die Aufnahmen zu normieren, Kontrastverbesserung durchzuführen und etwaiges Rauschen zu unterdrücken.

1.2 Index-basierte Trennung von Boden und Vegetation

Zur Berechnung des FVC bzw. der Trennung von Boden und Pflanzen aus RGB-Aufnahmen sind in der Literatur mehrere Strategien zu finden. Im Allgemeinen werden dafür ein oder mehrere Ratios verwendet. Der bekannteste, bzw. am häufigsten verwendete Ratio ist dabei der Excess green vegetation index (ExG) (Woebbecke et al., 1995). Er berechnet sich wie folgt:

$$ExG = 2g - r - b \quad (1)$$

Dabei werden die Farbwerte in zwei Vorverarbeitungsschritten normiert:

$$r = \frac{R^*}{R^*+G^*+B^*}, g = \frac{G^*}{R^*+G^*+B^*}, b = \frac{B^*}{R^*+G^*+B^*}, \text{ wobei} \\ R^* = \frac{R}{R_{max}}, G^* = \frac{G}{G_{max}}, B^* = \frac{B}{B_{max}} \quad (2)$$

Die Trennung zwischen grüner Vegetation und Boden, d.h. die Binarisierung erfolgt üblicherweise mittels eines statistischen Schwellwerts, der auf dem Otsu-Verfahren basiert (Otsu, 1979).

Meyer & Neto, (2008) haben den Ansatz von (Woebbecke et al., 1995) weiter entwickelt und ihn um eine Komponente ergänzt, in dem sie zusätzlich des *ExR* berechnet und von dem *ExG* abgezogen haben. Der *ExR* berechnet sich wie folgt:

$$ExR = 1.4 R - G \quad (3)$$

Die Trennung grüner Vegetation von anderen Bildinhalten ergibt sich bei positiven Werten, d.h.

$$\text{Grüne Vegetation} = ExG - ExR > 0 \quad (4)$$

Alternativ dazu haben Patrignani & Ochsner (2015) ein Verfahren entwickelt, dass die Vorteile mehrerer Ratios in einer Formel vereinigt. Die Differenzierung von Grün und Boden, geschieht demnach über folgende Formel:

$$\frac{G}{R} > P_1 \text{ und } \frac{G}{B} > P_2 \text{ und } 2 * G < P_3 + R + B \quad (5)$$

In der von Patrignani & Ochsner (2015) entwickelten Software „Canopeo“ liegen die Defaultwerte von P_1 und P_2 bei 0.95 und der Schwellwert des ExG (P_3) bei 20.

Im Ansatz von Gée et al. (2021) werden sogar sechs verschiedene Vegetationsindices verwendet, auf die hier aber nicht näher eingegangen wird.

Ziel dieses Beitrages ist es nicht, einen einzigartigen und „neuen“ Ansatz zur Berechnung des FVC aus sehr hochauflösenden Drohnenbildern zu präsentieren, vielmehr sollen mehrere bereits erprobte Algorithmen zur Trennung von Boden und grüner Vegetation verwendet werden und auf ihre Anwendbarkeit für Drohnenaufnahmen, die mit unterschiedlichen Bodenaufösungen und Kameras aufgenommen wurden zu testen. Kurzum, in dem Beitrag soll schwerpunktmäßig untersucht und dargestellt werden, inwieweit sich die räumliche Auflösung und die Vorverarbeitung auf die Berechnung des FVC auswirken.

1.3 Blattebene vs. Bestandesebene

Wie eingangs erwähnt wird der FVC in der Regel mittels bodennah aufgenommenen und damit hochaufgelösten Bildern aufgenommen. Man spricht auch von der so genannten Blattebene. Das bedeutet, auf den Bildern sind die einzelnen Blätter und deren Zwischenräume eindeutig zu erkennen und der FVC kann mit hoher Zuverlässigkeit berechnet werden. Bei Aufnahmen aus größerer Höhe, z.B. von einer Drohne oder einem Flugzeug aus, ist die Bodenauflösung geringer, so dass die einzelnen Blätter nicht mehr differenziert werden können. Bei Aufnahmen aus der so genannten Bestandesebene setzen sich die Bildpixel anteilig aus mehreren Komponenten zusammen: Blätter, Stängel, Boden, Schatten, ... Hinzu kommt, dass das Reflexionssignal von der Ausrichtung der Blätter und der Größe der Pflanzen, der Bestandesdichte und der vertikalen Gliederung eines Bestandes beeinflusst wird. Zusammengefasst, das Reflexionssignal ist komplex und nicht immer eindeutig. Natürlich ist der Übergang zwischen der Blattebene und der Bestandesebene fließend und es stellt sich die Frage, bei welcher Bodenauflösung, bzw. bei welchen Pflanzen sind die Ergebnisse terrestrischer Messungen, mit drohnenbasierten Messungen vergleichbar. Diese Frage ist sehr relevant, denn die automatische Aufnahme mittels einer Drohne hat mehrere Vorteile gegenüber der bisherigen terrestrischen Methode:

1. Effizienz, die Datenerhebung mit der Drohne dauert pro Bild nur wenige Sekunden, was wesentlich schneller ist als die manuelle Herangehensweise. Die Bilder sind zudem genau georeferenziert und enthalten in den Metadaten weitere wichtige Informationen.

2. Flächendeckung, systematisch aufgenommene Drohendaten lassen sich zu einem Orthophoto kombinieren, welches anschließend in wenigen Arbeitsschritten ausgewertet werden kann.
3. Automation und Wiederholbarkeit, die Bilder können bei wiederholten Messungen automatisiert aus der exakt gleichen Position aufgenommen werden. Damit sind der Bildausschnitt und der Maßstab immer identisch.
4. Keine Beeinträchtigung des Versuchs, da die Aufnahmen berührungslos erfolgen.

2 Methoden

2.1 Testfeld und Versuchsaufbau

Die Untersuchung findet auf dem Versuchsfeld „Stover Acker“ der Universität Rostock statt. Hintergrund der experimentellen Untersuchungen ist ein Versuch, der sich mit der Unterdrückung von Unkräutern durch Winterweizenpflanzen beschäftigt. Die Arbeitshypothese des Versuchs lautet: „Winterweizensorten, die im Herbst einen hohen Bodenbedeckungsgrad erzeugen, reduzieren damit das Aufkommen von Unkräutern im Frühjahr und reduzieren somit den potentiellen Herbizidaufwand.“ Um dieser Fragestellung beantworten zu können, wurden drei verschiedene Sorten in zwei verschiedenen Varianten getestet. Der Versuch ist mit 9 Wiederholungen angelegt, so dass der Versuch insgesamt 54 Parzellen in sechs Reihen umfasst. Die einzelnen Parzellen sind ca. 12 m lang und jeweils 1.2 m breit. Um Randeffekte zu vermeiden ist eine weitere Reihe an allen Seiten mit angelegt worden.

Der Versuch umfasst eine Gesamtfläche von ca. 12 x 100 m, bzw. 1.200 m². Die Parzellen sind nahezu in nord-südlicher Richtung orientiert. Die Vergleichspunkte zur manuellen Erfassung des FVC mittels einer Kamera, drei pro Parzelle, sind am 4.12.2024 auf den Parzellen mit blauen ca. 10 x 1.8 cm großen Markierungen ausgelegt worden. Die Referenzpunkte liegen zwischen 1.7 – 2.4 m auseinander. Die 3D-Koordinaten der Markierungen wurden manuell aus dem Orthomosaik vom 5.12.2024 abgegriffen.

2.2 Getestete Drohnen im Vergleich

Insgesamt wurden vier verschiedene marktgängige Drohnen, die im professionellen Bereich eingesetzt werden, in den Test mit einbezogen. Davon sind drei Multicopter, mit dem Ziel mit deren Aufnahmen den FVC direkt zu messen. Zusätzlich wurde ein Flächenflügler mit einer Multispektralkamera, der für große Flächenleistungen optimiert ist, in den Test mit einbezogen. Dieser soll als Referenz dienen, und

die Möglichkeiten zur Bestimmung des FVC mittels von Vegetationsindices zu untersuchen. Das wiederum kann für ein Upscaling zur Satellitenebene hin genutzt werden. Alle Drohnen sind mit RTK-fähigen GNSS-Empfängern ausgestattet, was eine automatisierte und cm-genaue Georeferenzierung der Bilddaten ermöglicht.

Im Einzelnen handelt es sich um zwei Drohnen mit RGB-Kameras, eine DJI Mavic 3E (M3E) und eine DJI Matrice 300 (M300) mit der P1-Kamera und einem 35 mm Objektiv als Nutzlast. Die beiden anderen Drohnen sind mit Multispektralkameras ausgestattet. Die DJI Phantom 4 Multispektral (P4MS) ist in der Lage hoch aufgelöste Multispektralaufnahmen in der Blattebene zu liefern. Die Nutzlast der Trinity F90+ der Firma Quantum Systems besteht aus zwei Kameras, die synchron ausgelöst werden. Zum einen eine RGB-Kamera Sony UMC-R 10C und zum anderen eine Rededge MX Multispektralkamera der Firma MicaSense. Aufgrund der minimalen Bildfolgezeit von einer Sekunde der Kameras liegt bei einer Längsüberlappung von 80 % die minimale Flughöhe bei 80 m, was in einer Bodenauflösung von 5.5 cm für die Multispektralkamera und 2.1 cm für die RGB-Aufnahmen resultiert.

Tabelle 1 Übersicht der in den Tests verwendeten Drohnen und Kameras

Drohne	Kamera (Mpix)	Äquivalente Brennweite [mm]	Min. Flughöhe [m]	GSD [mm]
Mavic 3 E	RGB / 20	24	12	3.2
	RGB Tele / 12	162	8	0.4
Matrice 300	RGB / 45	35	12	1.6
Phantom 4 MS	MS / 2.08	40	12	6
Trinity F90+	RGB / 20	24	80	21
	MS / 1.23	39	80	55

Softwarebedingt beträgt die minimale Flughöhe für systematische Flugmissionen bei der DJI Mavic 3 und der DJI Matrice 300 bei 12 m. Daraus resultierend ergeben sich minimale Bodenauflösungen von 0.16 cm bei der P1 Kamera, bzw. 0.32 cm bei der Verwendung der DJI Mavic 3E Weitwinkelkamera. Bei der M3E Telekamera, die nicht überlappende Aufnahmen erzeugt, gibt es bei einem vorprogrammierten Waypoint-Flug keine minimalen Flughöhen. Bei einer Flughöhe von 8 m liegt die Bodenauflösung bei 0.4 mm.

Die einzelnen Aufnahmen decken eine Fläche von 1.6 × 1.2 m ab. Die DJI P4 MS wird ebenfalls in einer minimalen Flughöhe von 12 m betrieben, was zu einer Bodenauflösung von 0.6 cm pro Pixel führt.

Einige technische Daten der in dem Vergleich verwendeten Drohnen bzw. der verbauten Kameras sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Um die Brennweiten der verschiedenen Kameras miteinander vergleichen zu können, wird die äquivalente Brennweite zu einer Kleinbildkamera angegeben.

2.3 Drohnenbefliegungen

Die systematischen Tests und Befliegungen wurden im Winter 2024 / 2025 durchführt. Das hat einen entscheidenden Vorteil. Die Pflanzen wachsen zwischen November und Februar so gut wie gar nicht. D.h. es können über einen längeren Zeitraum mehrere Tests mit unterschiedlichen Kameras und verschiedenen Einstellungen durchgeführt und im Hinblick auf den FVC ausgewertet und verglichen werden. Gleichwohl ändern sich die äußeren Einflüsse zu den Befliegungszeitpunkten, was z.B. zu unterschiedlich hellen oder dunklen Böden führen kann. Die Pflanzenvitalität ändert sich im Winter ebenfalls, was zu Verfärbungen der Blätter bzw. Blattspitzen führen kann. Nicht zuletzt sind die Lichtverhältnisse immer ein klein wenig anders. Generell steht während des Winters nur wenig Licht zur Verfügung, das kaum ausreichend ist, um die geforderten kurzen Belichtungszeiten der Telekamera der M3E einzuhalten.

Aufbauend auf den praktischen Erfahrungen wurde im Frühjahr und Sommer 2025 weitere Befliegungen durchgeführt, um das entwickelte Verfahren während der Wachstumsperiode für verschiedene Kulturen zu testen und weitere Erkenntnisse zu gewinnen. Insgesamt sind an 11 Terminen und in unterschiedlichen Flughöhen von 12 – 80 m Aufnahmen verschiedener landwirtschaftlicher Kulturen (Winterweizen, Hafer, Mais) erstellt worden.

2.4 M3E - Telekamera

Die Telekamera der M3E-Drohne ist für Inspektionsaufgaben konzipiert worden und weniger für systematische Bildflüge oder gar photogrammetrische Anwendungen. Die Kamera wird über die Fernsteuerung ausgewählt und eingestellt. Die Kamera kann nur über eine Wegpunktplanung automatisch ausgelöst werden. Die Koordinaten der Auslösung, werden ähnlich wie Weitwinkelkamera hochpräzise erfasst und in den Metadaten gespeichert. Damit ist diese Kamera für die gezielte Erfassung des FVC prinzipiell geeignet und ist es notwendig sich ein wenig mit dieser Kamera, bzw. Telekameras im Allgemeinen zu beschäftigen,

wenn diese für Aufnahmen aus einer geringen Entfernung von 5 – 20 m genutzt werden sollen.

In der Telekamera der M3E ist ein 1/2“ großer CMOS Sensor ($\approx 6.4 \times 4.8$ mm) mit einer Pixelanzahl von 12 MPix. Demzufolge hat ein Pixel eine Größe ca. $1.6 \mu\text{m}$. Die Brennweite der Kamera beträgt 29.85 mm was zu einem Öffnungswinkel von 15° führt. Damit wird gegenüber dem Weitwinkelobjektiv ein optischer Zoom-Faktor von 1:7 erreicht.

Das hat für die Erfassung des FVC mehrere Vorteile. Die Bodenauflösung ist gegenüber dem Weitwinkelobjektiv bei gleicher Flughöhe 7-fach größer und erreicht bei einer Flughöhe von ca. 8 m vergleichbare Auflösungen, wie eine terrestrische handgehaltene Kamera, die aus ca. 1.5 m den Pflanzenbestand erfasst. Zusätzlich verringert der kleine Öffnungswinkel der Kamera den Reliefversatz, der sich aus der Zentralprojektion des Bildes ergibt erheblich. Dieser Effekt macht sich vor allem bei höherem Pflanzenbestand bemerkbar, da dann der Reliefversatz bei weitwinkligen Aufnahmen zu sichtbaren Bereichen führt und den ermittelten FVC erheblich beeinflussen kann. Nicht zuletzt bedeutet ein geringer Öffnungswinkel auch weniger Auswirkungen der Bidirektionalen Reflektionsfunktion (BRDF) des Pflanzenbestands, die zu Änderungen der Reflexionseigenschaften und damit zur Farbe führen.

Das Objektiv der M3E Telekamera ist relativ lichtschwach. Die Lichtstärke eines Objektivs wird durch die minimale Blendenzahl angegeben. Diese beträgt bei dem Teleobjektiv $f/4,4$. Um diese Zahl in Relation zu dem Weitwinkelobjektiv der DJI M3E mit einer minimalen Blendenzahl von $f/2,8$ zu setzen, ist bei dem Teleobjektiv etwa die dreifache Menge an Licht erforderlich, um ein gleich helles Bild zu erzeugen. Die Schärfentiefe ist eines der wichtigsten Merkmale einer Aufnahme. Dabei wird eine Ebene im Bildmotiv scharf abgebildet. Motivteile außerhalb dieser Ebene werden mit wachsendem Abstand unscharf abgebildet. Generell gilt, bei kurzen Brennweiten (Weitwinkelobjektive) ist die Schärfentiefe bedeutend größer als bei hohen Brennweiten (Teleobjektive). Eine Möglichkeit, die Schärfentiefe zu erhöhen, ist die Blende weiter zu schließen, was ausreichend Licht voraussetzt.

Bei einer Flugdistanz von < 12 m ist die Hyperfokaldistanz noch nicht erreicht und eine Unendlich Einstellung führt bei offener Blende zu unscharfen Aufnahmen. D.h. die Aufnahmen müssen automatisch über den Autofokus oder manuell scharf gestellt werden. Das wiederum ist relativ schwierig, da das kleine Display der Fernbedingungen die Bewertung der Bildschärfe nicht erleichtert. Eine Scharfstellung über den Autofokus ist bei systematischen Bildflügen

nicht sinnvoll, da dies unkalkulierbar viel Zeit vor einer Auslösung benötigt, was zu verzögerten Aufnahmen an einem nicht gewünschten Ort führt, vgl. Kap 3.2

2.5 Bildflugplanung und Bildwanderung der M3E Telekamera

Um auch bei maximaler Bodenauflösung im Millimeterbereich scharfe Aufnahmen zu bekommen, muss die Bildwanderung, die durch die Vorwärtsbewegung der Drohne während der Aufnahme entsteht, berücksichtigt werden (6).

$$u = \frac{c \cdot \omega \cdot \Delta t}{CCD} \quad (6)$$

u = Bildwanderung in μm

c = Brennweite der Kamera in m

ω = Drehgeschwindigkeit in m/s

Δt = Belichtungszeit in s

CCD = Größe eines Pixels in μm

Anhand der Parameter wird deutlich, dass die Bewegungsunschärfe bei langen Belichtungszeiten, Aufnahmen mit einer höheren Bodenauflösung bzw. längerer Brennweite und einer höheren Geschwindigkeit der Drohne zunimmt. Damit die Bildinhalte scharf abgebildet werden, ist bei einfachen Schlitzobjektiven eine Bewegungsunschärfe $< 0,5$ Pixel erforderlich. Bei einem Zentralverschluss, der bei photogrammetrischen Drohnenkameras üblich ist, kann eine etwas größere Bewegungsunschärfe toleriert werden.

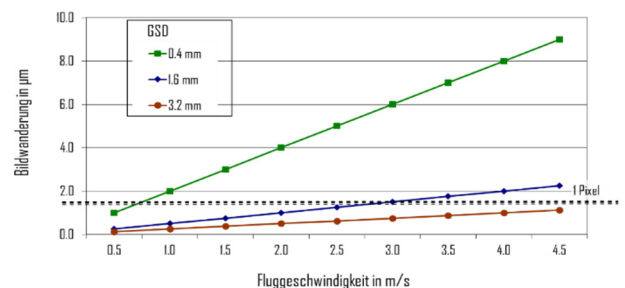


Abbildung 1 Praktische Bewegungsunschärfe bei Aufnahmen mit einer Verschlusszeit von $1/1000$ s, in Abhängigkeit der Fluggeschwindigkeit und der Bodenauflösung für eine Kamera mit einer Pixelgröße von $1.6 \mu\text{m}$

Wenn man die maximale Bodenauflösung der im Test verwendeten Drohnen zugrunde legt, ergeben sich einer Belichtungszeit von $1/1000$ s folgende Bewegungsunschärfen (siehe Abb. 1). Wie aus der Abbildung rasch deutlich wird, ist für die Aufnahme mit dem Teleobjektiv der M3E Drohne aus einer Entfernung von 8 m selbst bei einer Fluggeschwindigkeit von 1 m/s eine Belichtungszeit von $1/1000$ s oder

kürzer optimal, um scharfe Aufnahmen zu erhalten (siehe Abb. 1). Falls dies, z.B. bei wenig Licht im Winter oder in den Morgen- oder Abendstunden nicht möglich ist, sollte die Drohne für die Aufnahmen kurz anhalten, die Aufnahme machen und anschließend zum nächsten Punkt weiterfliegen. Bei Verwendung der weitwinkeligen M3E-Kamera sind höhere Fluggeschwindigkeiten von bis zu 5 m/s möglich, um bei entsprechenden Lichtverhältnissen noch scharfe Bilder zu erhalten.

2.6 Digitale "True" Orthophotos

Das Ergebnis der photogrammetrischen Datenprozessierung von systematisch aufgenommenen Drohnen-Aufnahmen ist im Allgemeinen ein so genanntes „True“ Orthophoto. D.h. es wird versucht, alle reliefbedingten Lageversätze zu kompensieren und die verschatteten Bereiche aus den umgebenden Bildern zu entnehmen. Bei der Orthoprojektion in Form eines True Orthophotos kommt es immer auf die Qualität des zugrundeliegenden digitalen Oberflächenmodells (DOM) an, was ebenfalls aus den Bilddaten abgeleitet wird. Vereinfacht gesprochen muss die Oberfläche des 3D-Modells der Vegetationsoberfläche entsprechen, um dann lage-richtig dargestellt zu werden. Das ist bei Drohnenbefliegungen von Ackerkulturen mit einer homogenen Oberfläche (z.B. Getreide) aus Flughöhen von 50 bis 120 m normalerweise auch kein Problem. Bei Befliegungen von hochwachsenden Ackerkulturen, wie z.B. Mais oder bei Flügen aus sehr geringer Höhe, entspricht das digitale Oberflächenmodell nicht mehr der Vegetationsoberfläche und es kann zu ungewollten Abbildungsfehlern kommen, die im Endeffekt auch zu falschen FVC-Werten führen können. Um Fehler die durch Artefakte des DOMs entstehen können zu minimieren, empfiehlt es sich das DOM zu glätten. Das führt zwar zu einer geringeren Lagegenauigkeit, auf die es aber hier auch nicht ankommt.

3 Ergebnisse

Bei den Flächenbefliegungen erfolgte die photogrammetrische Prozessierung der Daten zur Erzeugung eines digitalen Orthophotomosaiks und der Ableitung eines digitalen Oberflächenmodells mit der Software Metashape Professional 2.1.3. Die Georeferenzierung der Bildverbände erfolgte grundsätzlich passpunktlos, da eine Lagegenauigkeit von wenigen cm für die Fragestellung ausreichend ist. Gleichwohl wurde die äußere Genauigkeit bei dem Bildflug vom 13.12.2024 anhand von 4 mit einem RTK-GNSS-Empfänger (Leica GS07) validiert. Die Residuen an den vier Passpunkten im Rahmen der Georeferenzierung betrug 0.7 cm in der

Lage und 2.0 cm in der Höhe. D.h. die Genauigkeit des GNSS-Empfängers ist - wie zu erwarten war - der limitierende Faktor der äußeren Genauigkeit.

Die Drohnenbefliegung mit der DJI M3 Telekamera entlang der vordefinierten Route mit 162 Einzelaufnahmen, die auf einer Strecke von ca. 440 m verteilt sind, dauert inkl. Start und Landung (ca. 200 m Flugstrecke) ca. 10 Minuten, bzw. 4 Sekunden pro Punkt.

3.1 Tests zur Positionsgenauigkeit der Telekamera

Um die individuell ausgelösten Drohnenaufnahmen einzelner Parzellen für weitere Untersuchungen nutzen zu können, ist es wichtig die Positionierungsgenauigkeit der Kamera genauer zu untersuchen. Dazu wurden in einem ersten Test der auf die Drohne übertragene Flugplan umgesetzt. Die Drohne soll dabei 162 Bilder aufzeichnen an den Positionen der Referenzmarkierungen aufnehmen. In dem Test sind zwei Varianten untersucht worden. Zum einen mit Autofokus drei Streifen mit jeweils 27 Bildauslösungen und zum anderen drei Streifen mit manuellem Fokus. D.h. jeweils 81 Bilder. Um die Genauigkeit der und Zuverlässigkeit der Auslösepunkte festzustellen, werden die Soll-Koordinaten mit den Ist-Koordinaten die als Metadaten in den EXIF-Headerdaten gespeichert sind, verglichen

Dabei zeigte sich, dass die Kamera einige Zeit benötigte, um scharf zu stellen und das Bild auszulösen (siehe Abb. 2). Die Abweichungen von der Sollposition betrug in Flugrichtung im Mittel 70.8 cm mit einer Standardabweichung von 37 cm. D.h. bei einer Fluggeschwindigkeit von 1 m/s benötigte die Kamera im Schnitt 0.7 Sekunden (± 0.37 s), um die Kamera scharf zu stellen und ein Bild zu machen. Interessanterweise betrug die Abweichung in der Y-Achse 11.7 cm mit einer Standardabweichung von 23.6 cm. D.h. die Bildmittelpunkte lagen im Schnitt ca. 12 cm links von der geplanten Position. Bei den ersten und letzten Aufnahmen eines Streifens dreht sich die Drohne und mit ihr die Kamera, d.h. bezogen auf die Ausrichtung der Parzellen, können Aufnahmen an ganz falschen Orten liegen.

Ohne Autofokus (siehe Abb. 3.) ist die Abweichung der ausgelösten Aufnahmen von der Soll-Position deutlich niedriger. Sie liegt in Flugrichtung im Mittel bei nur 13,6 cm mit einer Standardabweichung von 8,2 cm. In der Y-Achse beträgt die Abweichung 19,9 cm mit einer Standardabweichung von 14,8cm.

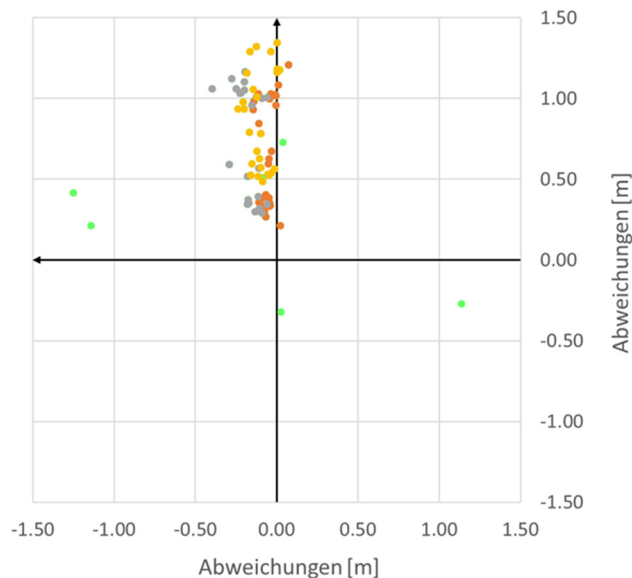


Abbildung 2 Abweichungen der tatsächlichen Bildmittelpunkte von den geplanten Auslösepunkten für drei Reihen mit jeweils 27 Auslösepunkten, **mit Autofokus** am 20.1.2025 mit dem Teleobjektiv der DJI M3E. Darstellung der Abweichungen in Flugrichtung.

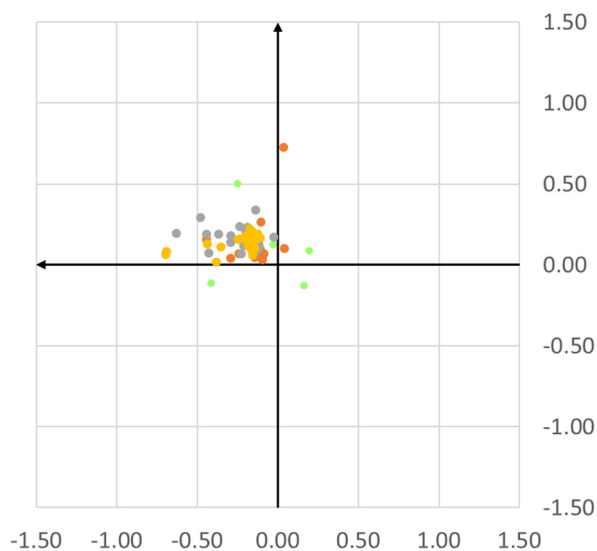


Abbildung 3 Abweichungen der tatsächlichen Bildmittelpunkte von den geplanten Auslösepunkten für drei Reihen mit jeweils 27 Auslösepunkten **ohne Autofokus (rechts)** am 20.1.2025 mit dem Teleobjektiv der DJI M3E. Darstellung der Abweichungen in Flugrichtung.

In einem zweiten Test am 4.2.2025 wurde der Fokus und die Belichtungszeit manuell eingestellt und ein Streifen mit 27 Aufnahmen in drei verschiedenen Konfigurationen geflogen:

1. die Drohne soll für jede Aufnahme kurz anhalten, eine Aufnahme machen und anschließend weiterfliegen,
2. die Drohne soll kontinuierlich mit 1 m/s durchfliegen, an jedem Wegpunkt seine Richtung zum nächsten Wegpunkt hin ändern und während des Fluges die Aufnahmen machen
3. Die Drohne soll die Drohne soll kontinuierlich mit 1 m/s auf einer optimierten Route durchfliegen und während des Fluges die Aufnahmen machen.

Im Ergebnis (Abb 4.) zeigte sich, dass bei den Auslösungen der kontinuierlichen Flugplanungen, wie bei dem ersten Testflug, generell etwas nach der geplanten Auslösung erfolgte. Im Mittel der beiden Tests waren das 15.5 cm. Da der Flug mit einer Geschwindigkeit von 1 m/s geplant war, entspricht die verzögerte Auslösung etwa 150 ms. Die Bildmittelpunkte lagen erneut um 3 bzw. 15 cm links, bzw. westlich der geplanten Koordinate. Im Gegensatz dazu werden die Aufnahmen bei einem Stopp der Drohne immer etwas vor der Zielkoordinate ausgelöst. Im Mittel sind das 10 cm. Interessanter Weise lagen die Bildmittelpunkte ebenfalls im Durchschnitt 12 cm in Flugrichtung links versetzt

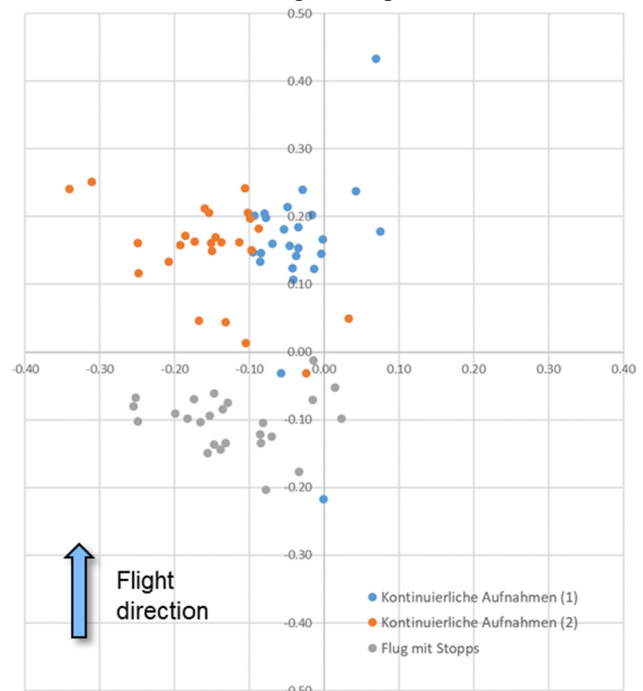


Abbildung 4 Abweichungen der tatsächlichen Bildmittelpunkte von den geplanten Auslösepunkten für drei Drohnenflüge mit jeweils 26 Auslösepunkten am 04.2.2025 mit dem Teleobjektiv der DJI M3E. Darstellung der Abweichungen in Flugrichtung.

3.2 FVC in Abhängigkeit der Befliegungsbedingungen

Die äußeren Bedingungen können die Index-basierte Ableitung des FVC in erheblichem Maße beeinflussen. Auch verschiedene Kameras können zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Unter der Annahme, dass sich der FVC in einem milden Winter nicht, oder nur minimal verändert, sind fünf Flüge im Zeitraum vom 3.12.2024 – 4.2.2025 ausgewählt worden. Während die ersten drei Aufnahmezeitpunkte (5.12., 13.2. und 17.12.) war der Himmel mehr oder weniger bedeckt. Am 20.1. und am 4.2. schien hingegen die Sonne. Die DJI-M3E Drohne kam bei allen Zeitpunkten zum Einsatz. Aufnahmen mit der P1-Kamera, die an der DJI M300 montiert war, standen nur für drei Zeitpunkte zur Verfügung. Der Vergleich des mittleren FVC der Versuchspartzen, der mittels des ExG und dem Otsu-Schwellwert ermittelt wurde, ist in Abb. 5 dargestellt.

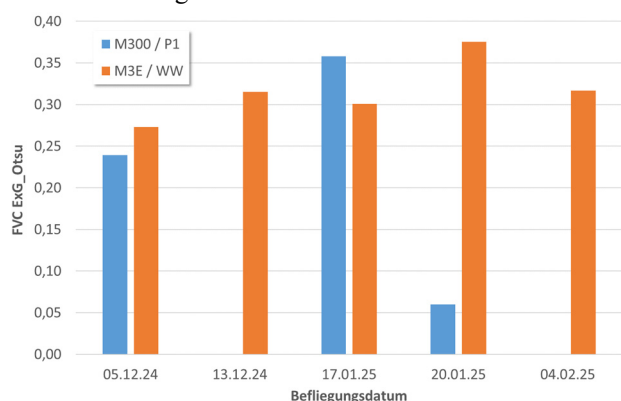


Abbildung 5 Vergleich des mittleren FVC der Versuchspartzen im Zeitraum vom 3.12.2024 – 4.2.2025 berechnet auf der Grundlage des ExG-Index und dem Otsu-Schwellwert. Vergleich der Orthomosaik der M300 / P1 -Kamera und der M3E / Weitwinkelkamera

Die Abbildung verdeutlicht, dass der berechnete FVC um einige Prozentpunkte schwanken kann, je nach den äußeren Bedingungen. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Drohnen/Kameras sind, zumindest im vorliegenden Fall, größer, als der Witterungseinfluss. Besonders auffällig ist der Unterschied zwischen den beiden Drohnen am 20.01.2025. Das sonnige Wetter hat nämlich dazu geführt, dass die Weizenblätter bei der P1-Kamera zu hell abgebildet wurden.

3.3 FVC in Abhängigkeit der Flughöhe

Um den Einfluss der Flughöhe auf die Berechnung des FVC näher zu untersuchen wurden drei Flüge mit der DJI-M3E Drohne, die bei sonnigem Wetter am 4.2.2025 nacheinander

in 12m, 24m und 36m das Versuchsfeld überflogen haben, mit einander verglichen. Zusätzlich wurde in den Vergleich eine Aufnahme aus 80 m mit integriert, die am 25.1.25, ebenfalls bei sonnigem Wetter mit der Trinity F90+ aufgenommen wurde. Der FVC wurde mittels zwei verschiedenen Verfahren (*ExG-Otsu* und *ExG-ExR*), die in Kapitel 1.2 vorgestellt worden sind, berechnet. Der FVC wurde für jede Parzelle berechnet und anschließend gemittelt (siehe Abb. 6).

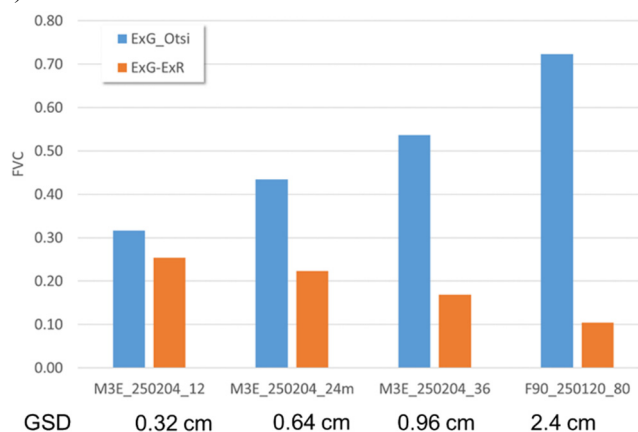


Abbildung 6 Vergleich des mittleren FVC der Versuchspartzen in Abhängigkeit der Flughöhe und des Indexes zur Trennung von Boden und Pflanze (*ExG-ExR*-Index vs. *ExG-Otsu*-Index). Die Befliegungen in 12m, 24m und 36m mit der M3E / Weitwinkelkamera erfolgte am 4.2.2025

Interessanter Weise ähneln sich die beiden Indices bei der geringsten Flughöhe. Mit zunehmender Flughöhe allerdings divergieren die beiden Werte ganz erheblich.

4 Diskussion

Bei der Verwendung der M3E-Telekamera aus geringen Flughöhen kann bei systematischen Bildflügen leider nicht kontinuierlich durchgeflogen werden, sondern es sollte für jede Aufnahme abgestoppt werden. Bei manuellem Fokus löst die M3E-Telekamera mit einer systematischen Abweichung von ca. 10 cm – 15 cm vom geplanten Bildmittelpunkt aus. Der systematische Teil der Abweichung kann über die Flugplanung kompensiert werden.

Der berechnete FVC ist stark von der Flughöhe abhängig. Je nach Berechnungsverfahren kann er zu- oder abnehmen. Die äußeren Bedingungen bei einer Befliegung beeinflussen den abgeleiteten Index-Wert. Dieser ist aber kleiner als die Verwendung anderer Kameras. Aufnahmen mit der gleichen Kamera führen zu ähnlichen Ergebnissen

5 Fazit & Ausblick

Die Telekamera der DJI Mavic 3 bietet eine spannende Möglichkeit sehr hochauflösende Detailaufnahmen zu machen, die vergleichbaren terrestrischen Fotos aufgrund ihrer Bildgeometrie bzw. der langen Brennweite deutlich überlegen ist und eine präzise Auslösung, die unter Berücksichtigung des systematischen Anteils ca. 10 - 15 cm von der Soll-lage abweichen kann, realisieren kann.

Als Zwischenfazit der bisherigen Untersuchungen kann festgehalten werden, dass die Flughöhe bzw. Bodenauflösung einen entscheidenden Einfluss auf den berechneten FVC, der anhand eines RGB-Indices ermittelt wird, hat. In Abhängigkeit des verwendeten Index kann dieser entweder mit der Flughöhe größer oder kleiner werden. Für allgemeingültige Aussagen nach dem „besten“ Index für Drohnenaufnahmen, bzw. der idealen Flughöhe sind allerdings noch weitere Untersuchungen und Auswertungen erforderlich.

Literaturverzeichnis

- Baret, F., Weiss, M., Lacaze, R., Camacho, F., Makhmara, H., Pacholczyk, P., & Smets, B. (2013). GEOV1: LAI and FAPAR essential climate variables and FCOVER global time series capitalizing over existing products. Part1: Principles of development and production. *Remote Sensing of Environment*, 137, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.12.027>
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Gée, C., Denimal, E., Merienne, J., & Larmure, A. (2021). Evaluation of weed impact on wheat biomass by combining visible imagery with a plant growth model: towards new non-destructive indicators for weed competition. *Precision Agriculture*, 22(2), 550–568. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09776-6>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science (New York, N.Y.)*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- He, Y., Dosanjh, M., Shang, J., Liu, J., Drury, C. F., Yang, X., Yang, J., Dao, P. D., Axiotis, A., & Proctor, C. (2021). Mapping crop fractional green canopy cover using high spatial resolution thermal and optical remote sensing in southern Ontario, Canada. *Geomatica*, 75(3), 116–129. <https://doi.org/10.1139/geo-mat-2021-0008>
- Heinonen, R., & Mattila, T. J. (2021). Smartphone-based estimation of green cover depends on the camera used. *Agronomy Journal*, 113(6), 5597–5601. <https://doi.org/10.1002/agj2.20752>
- Helguera, M. P. G., Lollato, R., & Patrignani, A. (2022). Winter wheat light interception measured with a quantum sensor and images. *Agronomy Journal*, 114(4), 2334–2341. <https://doi.org/10.1002/agj2.21125>
- Imukova, K., Ingwersen, J., & Streck, T. (2015). Determining the spatial and temporal dynamics of the green vegetation fraction of croplands using high-resolution RapidEye satellite images. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 113–123. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.003>
- Kim, J., Kang, S., Seo, B., Narantsetseg, A., & Han, Y. (2020). Estimating fractional green vegetation cover of Mongolian grasslands using digital camera images and MODIS satellite vegetation indices. *GIScience & Remote Sensing*, 57(1), 49–59. <https://doi.org/10.1080/15481603.2019.1662166>
- Meyer, G. E., & Neto, J. C. (2008). Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2), 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.03.009>
- Niu, R., Du, B., Wang, Y., Zhang, L., & Chen, T. (2014). Impact of fractional vegetation cover change on soil erosion in Miyun reservoir basin, China. *Environmental Earth Sciences*, 72(8), 2741–2749. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3179-8>
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Patrignani, A., & Ochsner, T. E. (2015). Canopeo: A Powerful New Tool for Measuring Fractional Green Canopy Cover. *Agronomy Journal*, 107(6), 2312–2320. <https://doi.org/10.2134/agronj15.0150>
- Riehle, D., Reiser, D., & Griepentrog, H. W. (2020). Robust index-based semantic plant/background segmentation for RGB- images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, 105201. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105201>
- Song, W., Mu, X., Yan, G., & Huang, S. (2015). Extracting the Green Fractional Vegetation Cover from Digital Images Using a Shadow-Resistant Algorithm (SHAR-LABFVC). *Remote Sensing*, 7(8), 10425–10443. <https://doi.org/10.3390/rs70810425>
- Woebbecke, D. M., Meyer, G. E., Bargen, K. V., & Mortensen, D. A. (1995). Shape Features for Identifying Young Weeds Using Image Analysis. *Transactions of the ASAE*, 38(1), 271–281. <https://doi.org/10.13031/2013.27839>