

Automatisierte Unkrauterkenkung auf dem Acker – Möglichkeiten und Grenzen

Automated weed detection in the field - possibilities and limits

Michael Pflanz*, Henning Nordmeyer

Julius Kühn-Institut (JKI), Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland,
Messeweg 11-12, 38104 Braunschweig

*Korrespondierender Autor, michael.pflanz@jki.bund.de



DOI 10.5073/jka.2016.452.033

Zusammenfassung

Unbemannte Fluggeräte, unmanned aerial vehicles (UAV), sind inzwischen allgegenwärtig genutzte Werkzeuge, um hochauflösende räumliche Informationen landwirtschaftlicher Kulturflächen zu generieren. Ihr Einsatz zur Vegetations-Naherkundung eröffnet dabei eine Reihe an Möglichkeiten, die im Bereich des teilflächenspezifischen Pflanzenschutzes künftig eine wesentliche Rolle spielen werden. In einer zunehmend präzisierten Landwirtschaft steigt zudem das Interesse an innovativen Technologien und es ist erkennbar, dass sich der Fokus von der landwirtschaftlichen Forschung allmählich in die praktische Anwendung verschiebt. Dies erfordert eine rasche und intensive Beurteilung von Möglichkeiten und Grenzen von UAV-gestützten Verfahren.

Während spektral auflösende Sensoren an UAV zur Kartierung des Nährstoff- oder Wasserbedarfs einer Kultur pro Flächeneinheit bereits eingesetzt werden, ist die bildgebende Erkennung von Unkräutern aus der Luft ungleich komplexer und daher bisher nicht praxisrelevant. Zum einen sind die spektralen Unterschiede zwischen Unkräutern und Kulturpflanzen zu gering für eine sichere Unterscheidung und objektbasierte Ansätze separieren Pflanzen bisher weder artspezifisch noch sind sie ausreichend an morphologische Veränderungen innerhalb der Entwicklungsstadien angepasst. Zum anderen fehlen verlässliche Lösungen für eine stabile Kleinraumnavigation, wie sie für eine optisch hinreichende Abbildungsleistung in konstanter niedriger Flughöhe bei unterschiedlichen Geländeprofilen erforderlich ist.

Zur Abschätzung der Möglichkeiten und Grenzen einer automatisierten Unkrauterkenkung, hinsichtlich der notwendigen Abbildungsleistung als Voraussetzung für eine automatisierte Unkrauterkenkung, erfolgten Messflüge mit einem Hexakopter in 5 m Flughöhe über unterschiedlich verunkrauteten Ackerflächen. Die Flughöhe wurde mittels GPS-gesteuerten Autopiloten gehalten. Luftbildaufnahmen erfolgten über georeferenzierten Punkten an denen zeitgleich manuell bonitiert wurde. Die erforderliche optische Auflösung am Boden (mm/Pixel) wurde durch manuelle Auszählung der Unkräuter am PC und Vergleich mit den Boniturdaten abgeschätzt.

Stichwörter: Hexakopter, Präzisionslandwirtschaft, teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung, UAV, Unkräuter, Unkrautverteilung

Abstract

Unmanned Aerial Vehicles (UAV) have become omnipresent and adequate tools to generate high-resolution spatial data of agricultural cropland. Their implementation into remote sensing approaches of weeds provides suitable applications for a site-specific herbicide management. In general, an increasingly use of innovative technologies gradually leads from agricultural research into the practical application. This requires an evaluation of possibilities and limits of UAV-based remote sensing procedures.

While spectrals from UAVs are being used already for mapping needs of nutrient or water, the image supported weed detection is much more complex and at the moment not relevant in practice.

In this regard, there is a lack of weed and crop differentiation through spectral analyses and object-based approaches separate different plants not species-specific or are not adapted to morphologic changes of the growth. Moreover, there is a need for alternative positioning techniques without GPS, as it is required for a precise optical imaging analysis at low altitudes.

To evaluate the possibilities and limitations of automated weed identification regarding the optical and sampling requirements, flights were carried out with a hexacopter at an altitude of 5 m over agricultural crop land with variable weed patches. The altitude was controlled by the GPS-autopilot. Images were captured at geo-referenced points and the number of different weed species was simultaneously determined by manually counting. The required optical resolution on the ground was estimated by comparing the number of weeds between image analysis on the PC and with the field rating data.

Keywords: Herbicide application, hexacopter, precision farming, UAV, site-specific weed management, weed distribution, weeds

Einleitung

Für eine teilflächenspezifische Unkrautbekämpfung ist die Erfassung und Analyse raumbezogener Unkrautinformationen erforderlich. Dazu gehören die Erkennung spezifischer Unkrautarten sowie die Erfassung ihrer Dichte und der räumlichen Verteilung auf einer Fläche (HÄUSLER et al., 1999; NORDMEYER, 2006; LOPEZ-GRANADOS, 2011). Während manuelle und zufällige Stichproben oder Rasterbonituren sehr aufwendig und teuer sind (WILES und SCHWEIZER, 1999), kann der Einsatz von UAVs dazu beitragen, Einzelpflanzen mit Hilfe bildgebender Sensorik und photogrammetrischer Analyse zu erfassen. Ziel ist es, verschiedene Unkrautarten auf einer Kulturfläche hochauflösend zu kartographieren und Applikationskarten für eine präzise Herbizidanwendung bereitzustellen. Auf diese Weise können Pflanzenschutzmaßnahmen auf das notwendige Maß reduziert werden.

Aufgrund der geringen Anschaffungskosten sind inzwischen zahlreiche Sensorplattformen auf UAV-Basis verfügbar, die auch in der landwirtschaftlichen Praxis Anwendung finden (LELONG et al., 2008; SCHMALE et al., 2008; XIANG und TIAN, 2011; LEBOURGEOIS et al., 2012; RASMUSSEN et al., 2013). Solche Plattformen können auch auf sehr kleinen Flächen ökonomisch sinnvoll eingesetzt werden. Die photogrammetrische Flächenleistung ist zunächst abhängig von der Konstruktion (Multirotorsystem bzw. Starrflügler) sowie von der operativen Flughöhe, und gegenüber einer satellitengestützten Fernerkundung vergleichsweise gering (PFLANZ et al., 2014).

Die Navigation von Multirotorsystemen in geringen Flughöhen ermöglicht eine Erfassung hochauflösender räumlicher Daten (DUNFORD et al., 2009). Die geringe Tragkraft der Fluggeräte erfordert jedoch einen Kompromiss zwischen Sensorqualität (handelsübliche Kameras mit kleinen Chips oder Objektiven von geringer optischer Güte – Tabelle 1), Kosten und Gewicht. Da die räumliche Auflösung (*Ground sample distance* – GSD) die projizierte Größe eines einzelnen Pixels auf ein Objekt am Boden ist (Abb. 1), ist sie abhängig von der Flughöhe, der Sensorgröße/-auflösung und der Brennweite (KECLEY, 2014). Die operative Flughöhe der Fernerkundungsplattform hat hierbei den größten Einfluss auf Bildstruktur und -größe, wobei mit größeren Flughöhen der Bildausschnitt zunimmt, damit die Flächenleistung steigt, die GSD und damit der Detailgrad in der Abbildung sinkt (MARCEAU und HAY, 1999).

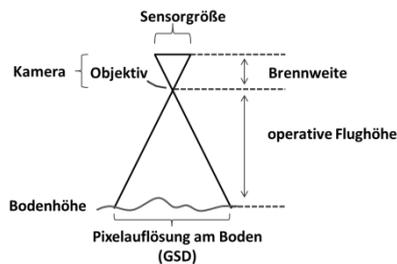


Abb. 1 Einfluss von Kamerasensor, Brennweite und Flughöhe auf die Pixelauflösung am Boden.

Fig. 1 Effect of camera sensor, focal length and operative altitude on the ground sample distance.

Je nach Anwendung wird der Pflanzendeckungsgrad, die Biomasse sowie der Wasser- und Nährstoffbedarf zwischen den Flächengrenzen mit Hilfe der spektralen Signatur des Pflanzenbestandes aus großen Flughöhen (>50 m) bestimmt (ZHANG et al., 2006; LELONG et al., 2008; RAMA RAO et al., 2008).

Die Vegetationsnaherkundung in geringer Aufnahmehöhe führt dagegen zu einer geringeren GSD und damit zu einem erhöhten Detailgrad in den Luftbildern, was eine Klassifizierung von Pflanzenarten als Basis für den teilflächenspezifischen Herbizideinsatz ermöglicht (LAMB und

BROWN, 2001; SOGAARD, 2005; RAO et al., 2007; RASMUSSEN et al., 2007; GUTIÉRREZ et al., 2008; LAN et al., 2009; GÓMEZ-CASERO et al., 2010; GOMEZ-CANDON et al., 2011). Davon ausgehend wurden für eine automatisierte Identifikation und Kartierung von Unkrautarten verschiedene Methoden und Systeme der Bildverarbeitung erprobt. Mit Hilfe von Texturmodellen (linear-mixture models) wurde die Artzusammensetzung am Boden bestimmt (SILVESTRI et al., 2003; SOGAARD, 2005). MANH et al. (2001) separierte individuelle Unkräuter auf der Basis von parametrisierbarer Formvektoren einzelner Laubblätter.

Allerdings stützen sich diese Studien auf eine geringe Anzahl Spezies zur Unterscheidung. Mit Hilfe blattkonturbezogener Fourierdeskriptoren wurden dagegen mehr als 20 Unkrautarten bei einer Erkennungsrate von etwa 70 % (für Einzelpflanzen) identifiziert (SÖKEFELD und GERHARDS, 2004). Die Aufnahmehöhe betrug hier 1,5 m und die Bodenauflösung in etwa 1,4 Pixel/mm. Mit Hilfe von aktiven Konturmodellen wurden nicht nur einzelne Pflanzenteile identifiziert, sondern die gesamte Pflanzengeometrie in die Modellierung einbezogen. Hier erfolgten Messungen aus 10 m Höhe bei einer Bodenauflösung von 100 Pixel/mm (SOGAARD, 2005). Validiert wurden die Modelle auf drei Unkrautarten mit Erkennungsraten zwischen 65 und 93 %.

Die inzwischen verfügbaren, hoch auflösenden Daten aus Befliegungen mittels UAV ermöglichen räumliche Analysen von Merkmalen und Eigenschaften, für die der Detailgrad in bisherigen Aufnahmen zu gering war. Dies führt zu einer erhöhten räumlichen Komplexität, die durch Texturmodelle und räumlich-objektbasierte Bildanalyse verallgemeinert werden kann (HAY und CASTILLA, 2008; KIM et al., 2009).

Material und Methoden

UAV

Die Befliegung der Versuchsfläche des Julius Kühn-Instituts (Standort Sickte, N 52.217281, O 10.627062 UTM) erfolgte mit einem Multirotorsystem (Hexakopter, Hexa XL, HiSystems GmbH Moormerland, Deutschland) und modifizierter Flugsteuerung (CIS GmbH, Rostock-Bentwisch, Deutschland). Die maximale Nutzlast beträgt etwa 1,5 kg. In Abhängigkeit zur Nutzlast kann eine Flugzeit von 10-15 Minuten erreicht werden (3,2 kg Gesamtgewicht, 6600 mAh elektrische Kapazität). Weitere Details sind bei PFLANZ et al. (2014) beschrieben.

Kamera

Die Aufnahme von Einzelbildern erfolgte an georeferenzierten Punkten (n=108) in einer Flughöhe von 5 m mit einer modifizierten RGB Kompaktkamera (NEX 5N, Sony, Japan). Die maximale Kameraauflösung beträgt 4912 x 3264 Bildpunkte (23,7 x 15,8 mm APS-C Sensor). Verwendet wurde ein Objektiv mit einer Brennweite von 60 mm (Sigma 2.8 DN, Sigma Corp., Japan), wodurch eine Bodenauflösung von 2,5 Pixel/mm erreicht wurde ().

Bildanalyse und manuelle Feldbonitur

Zur Bestimmung verschiedener Unkrautarten wurde eine Bonitur am PC (Abb. 2) in n=52 Luftbildaufnahmen durchgeführt. Das entwickelte Skript (HerbCountGUI, Ver. 0.1, Matlab 8.1, The Mathworks, USA) ermöglicht eine manuelle Identifizierung und automatische Zählung von Unkräutern der Arten *Matricaria recutita* (MATCH), *Veronica hederifolia* (VERHE), *Papaver rhoeas* (PAPRH) und *Viola arvensis* (VIOAR). Trifft keine der verfügbaren Optionen zu, kann zwischen *Monokotyle* und *Dikotyle* unterschieden werden. Zur Errechnung der GSD und der Flughöhe können in HerbCountGUI bei Fehlen einer Kalibriertafel Marker für definierte Abstände im Luftbild (z.B. Pflanz- oder Reihenabstände) gesetzt werden. Zeitgleich erfolgte die Feldbonitur der Unkräuter in Winterweizen (ab BBCH 13) auf Teilflächen von 0,1 m² (Göttinger Zählrahmen). Gedrillt wurde in einem Reihenabstand von 12,5 cm. Die Ergebnisse der Zählungen wurden schließlich in eine georeferenzierte Unkrautkarte des Versuchsfeldes überführt (QGIS 2.6, QGIS Development Team, 2014).

Tab. 1 Zusammenhang zwischen Sensorgröße, Brennweite und Öffnungswinkel bei handelsüblichen Kameras im Vergleich zum Kleinbildformat (KB) von 24 x 36 mm.

Tab. 1 Relation between sensor size, focal length and angular aperture in contrast to analog film size shown for standard consumer cameras.

Sensortyp	Sensorgröße in mm	Brennweite in mm	Öffnungswinkel (x)	Öffnungswinkel (y)
1,4"	3,20 x 2,13	10	18,2	12,2
		16	11,4	7,6
		35	5,2	3,5
		50	3,7	2,4
		60	3,1	2,0
		100	1,8	1,2
2/3"	8,80 x 5,87	10	47,5	32,7
		16	30,8	20,8
		35	14,3	9,6
		50	10,1	6,7
		60	8,4	5,6
		100	5,0	3,4
APS-C ¹	23,70 x 15,80	10	99,7	76,1
		16	73,0	52,2
		35	37,4	25,2
		50	26,7	17,8
		60	22,3	14,9
		100	13,5	9,0
KB	36,00 x 24,00	10	121,9	100,4
		16	96,7	73,7
		35	54,4	37,8
		50	39,6	27,0
		60	33,4	22,6
		100	20,4	13,7

¹ Advanced Photo System (Canon, Sony)

Ergebnisse

GPS-Navigation

Um die Möglichkeiten und Grenzen einer automatisierten Unkrauterkenennung hinsichtlich der notwendigen Abbildungsleistung abschätzen zu können, wurde der Zusammenhang zwischen der Sensorgröße der Kamera, der Brennweite und der Bodenauflösung theoretisch erarbeitet und durch Daten einer Feldbefliegung mit anschließender Freiland- und PC-Bonitur evaluiert.

Zunächst zeigte sich, dass die mittels GPS-Autopiloten angestrebte Flughöhe des Hexakopters von 5 m nicht exakt gehalten wurde. Die aus den Luftbildaufnahmen errechnete Bodenauflösung variierte zwischen 2,8 und 5,2 Pixel/mm (3,54 Pixel/mm für die Aufnahme in Abb. 2). Mit Hilfe der erarbeiteten Zusammenhänge zwischen Sensorgröße, Brennweite und Bodenauflösung (Tab. 2) kann aus dem Reihenabstand von 12,5 cm die Flughöhe annähernd genau bestimmt werden. Bei den untersuchten Luftbildaufnahmen variierte die Flughöhe folglich zwischen 2,4 und 4,5 m, was einer Abweichung zur operativen Flughöhe von bis zu 52 % entspricht. Die dabei entstehenden Skalierungsunterschiede in den Bilddaten sind bei einer automatischen Unkrauterkenennung durch objektbasierte Ansätze zu berücksichtigen.

Tab. 2 Flächenleistung bzw. Bodenauflösung in Abhängigkeit zur Brennweite, Sensorgröße (APS-C) und Flughöhe. Die Kameraauflösung beträgt 4912 x 3264 Pixel.

Tab. 2 *Ground sample distance and resolution related to focal length, sensor size (APS-C) and altitude. The chip resolution was 4912 x 3264 pixel.*

Brennweite	Flughöhe in m	Bildaus- schnitt (x)	Bildaus- schnitt (y)	Grund- fläche in m ²	Pixel/mm	Pixel / m ²	mm ² / Pixel
16	1	1,5	1,0	1,4	3,3	11148180,9	0,1
	3,5	5,1	3,4	17,6	1,0	910055,6	19,4
	5	7,3	4,9	36,0	0,7	445927,2	80,6
	10	14,7	9,8	143,8	0,3	111481,8	1290,0
	20	29,4	19,6	575,3	0,2	27870,5	20640,5
	50	73,4	49,0	3595,4	0,1	4459,3	806270,0
	100	146,9	97,9	14381,5	< 0,1	1114,8	12900320,3
35	1	0,7	0,4	0,3	7,3	53345787,6	< 0,1
	3,5	2,4	1,6	3,7	2,1	4354758,2	0,9
	5	3,4	2,2	7,5	1,5	2133831,5	3,5
	10	6,7	4,5	30,1	0,7	533457,9	56,3
	20	13,4	9,0	120,2	0,4	133364,5	901,4
	50	33,6	22,4	751,4	0,1	21338,3	35211,8
	100	67,1	44,8	3005,4	0,1	5334,6	563388,8
60	1	0,4	0,3	0,1	12,5	156771294,2	< 0,1
	3,5	1,4	0,9	1,3	3,6	12797656,7	0,1
	5	2,0	1,3	2,6	2,5	6270851,8	0,4
	10	3,9	2,6	10,2	1,3	1567712,9	6,5
	20	7,8	5,2	40,9	0,6	391928,2	104,4
	50	19,6	13,1	255,7	0,3	62708,5	4077,1
	100	39,2	26,1	1022,7	0,1	15677,1	65234,2
100	1	0,2	0,2	0,0	20,9	435475817,1	< 0,1
	3,5	0,8	0,5	0,5	6,0	35549046,3	< 0,1
	5	1,2	0,8	0,9	4,2	17419032,7	0,1
	10	2,4	1,6	3,7	2,1	4354758,2	0,8
	20	4,7	3,1	14,7	1,0	1088689,5	13,5
	50	11,8	7,8	92,0	0,4	174190,3	528,4
	100	23,5	15,7	368,2	0,2	43547,6	8454,4

Unkrautererkennung

Abbildung 2 zeigt die für die manuelle Unkrautbonitur am PC entwickelte grafische Benutzeroberfläche HerbCountGUI. Dargestellt ist ein mit dem UAV aufgenommenes Bild aus 3,55 m Flughöhe (vgl. Tab. 2) sowie der Ausschnittsrahmen, der für die PC-Bonitur verwendet wurde. Die Erfassung der Verunkrautung erfolgte artspezifisch. Die Fläche des grünen Auswertungsrahmens beträgt in allen Aufnahmen 1958 x 1958 Pixel. Die reelle Fläche am Boden variiert in Abhängigkeit zur Flughöhe. Die im Bild vorkommenden Unkrautarten sind farblich markiert. In anderen Bildausschnitten wurden weitere Unkrautarten bonitiert.

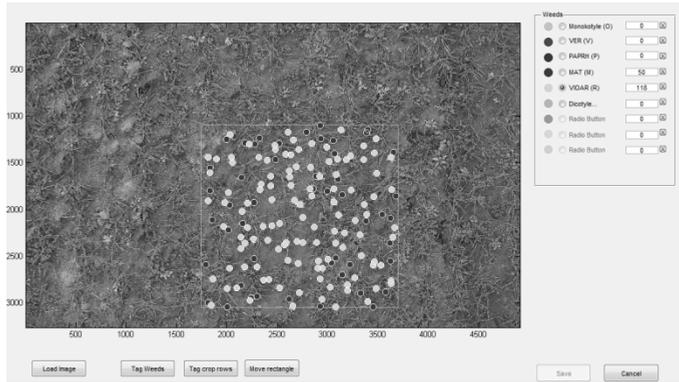


Abb. 2 Grafische Benutzeroberfläche für die manuelle Unkrautbonitur (HerbCountGUI Ver. 0.1). Die reelle Fläche des grünen Ausschnitts beträgt 0,32 m².

Fig. 2 Graphical user interface for manual weed counting (HerbCountGUI Ver. 0.1). The green coloured sample area is about 0.32 m².

Zwischen der durch Feldbonitur bestimmten Anzahl artspezifischer Unkräuter und der Bonitur am PC konnte eine zunächst gute Übereinstimmung für eine Unkrautart erzielt werden (Abb. 3). Der erklärte Zusammenhang für MATCH korreliert mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,70$. Für VIOAR lag die Korrelation dagegen unter $R^2 = 0,1$. Insgesamt waren die Pflanzendichten bei MATCH höher (bis 500 Pflanzen/m²) als bei VIOAR. Bei VIOAR lagen die erfassten Dichten überwiegend im Bereich < 100 Pflanzen/m².

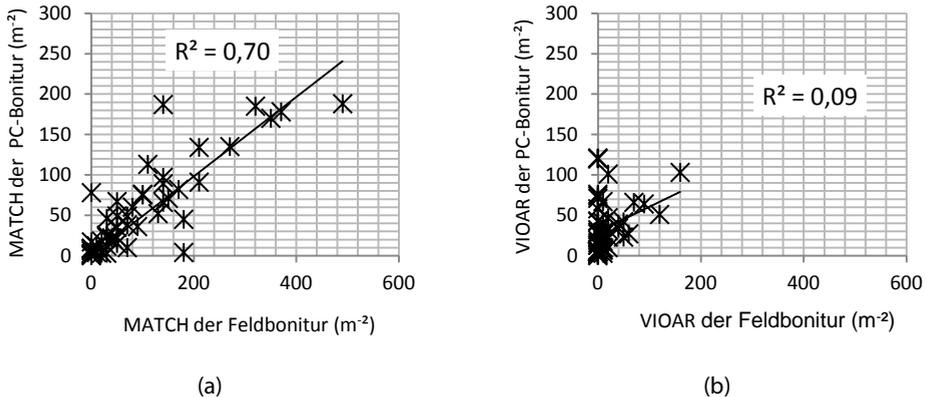


Abb. 3 Zusammenhang zwischen Felddaten und manueller Unkrautbonitur mittels HerbCountGUI.

Fig. 3 Relation between field data and manual counting by using the HerbCountGUI-Tool.

Aus den Ergebnissen der Feld- und PC-Bonitur wurden georeferenzierte Unkrautverteilungskarten erstellt. Dazu wurden die Rasterpunktdaten (64 bis 105) in Verteilungskarten überführt. Abbildung 4 zeigt die Ergebnisse für MATCH. Die Bonitur mit Hilfe von HerbCountGUI liefert lokal zum Teil höhere Unkrautdichten (Abb. 4b).

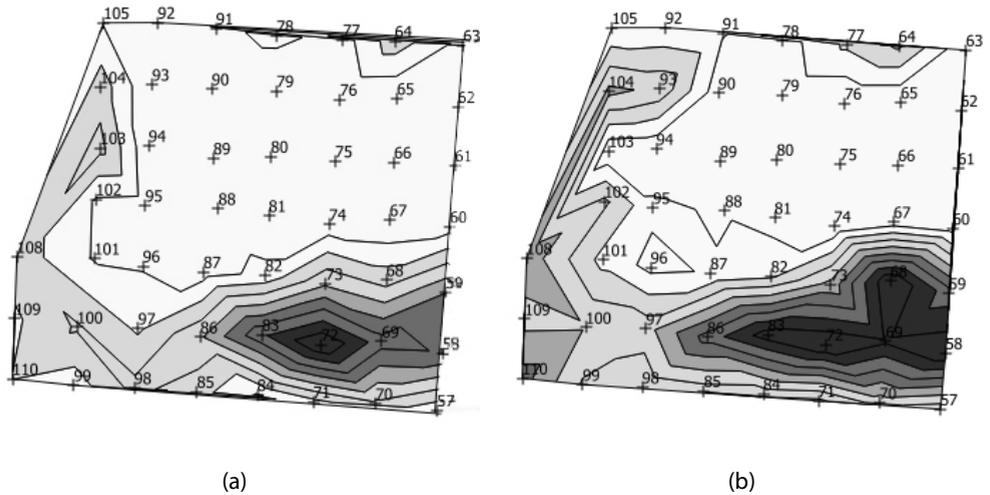


Abb. 4 Georeferenzierte Unkrautkarten des Versuchsfeldes (Sicke, Schlag 9) mit Verteilung von MATCH. (a) Ergebnis der manuelle Feldbonitur, (b) Ergebnis der Bonitur mit Hilfe von HerbCountGUI.

Fig. 4 Georeferenced weed map (Sicke, field 9) and the spatial distribution of MATCH. (a) Result of the manual field sampling, (b) result of sampling by HerbCountGUI.

Fazit

Neben neuen Herausforderungen bezüglich rechtlicher Rahmenbedingungen für den Flugbetrieb, sind künftig erhöhte Anforderungen für eine präzise Kleinraumnavigation von UAV-Plattformen in geringen Flughöhen zu bewältigen. Neue Ansätze für eine Vegetationsnaherkundung als Voraussetzung für eine bildgebende Unkrauterkenntung werden darüber hinaus autonome Sensorplattformen erfordern, die hochauflösende georeferenzierte Luftbildaufnahmen einer fein skalierten Verteilung von Pflanzenarten erstellen können. Hierzu sind aus gegenwärtiger Sicht eine möglichst geringe Flughöhe oder hochwertige Kameraoptiken maßgeblich. Die gestiegene räumliche Komplexität extrem fein aufgelöster Bilddaten, und deren Analyse wird damit zu einem Kernproblem von UAV-gewonnenen Daten. Hierfür sind neue Analysemethoden erforderlich (z.B. räumliche Generalisierung). Die Verwendung von Bildtexturmodellen und eine objekt-basierte Bildanalyse werden dazu in der Literatur bereits diskutiert.

Für die hier beschriebenen Anforderungen einer präzisen Kleinraumnavigation sollten künftig RTK-basierte Lösungen eingesetzt werden. Langfristiges Ziel ist es, die manuelle PC-Bonitur zu automatisieren.

Literatur

- DUNFORD, R., K. MICHEL, M. GAGNAGE, H. PIÉGAY und M.-L. TRÉMELO, 2009: Potential and constraints of Unmanned Aerial Vehicle technology for the characterization of Mediterranean riparian forest. *Int. J. Remote Sens.* **30** (19), 4915-4935.
- GOMEZ-CANDON, D., F. LOPEZ-GRANADOS, J.J. CABALLERO-NOVELLA, M. GOMEZ-CASERO, M. JURADO-EXPOSITO und L. GARCIA-TORRES, 2011: Geo-referencing remote images for precision agriculture using artificial terrestrial targets. *Precis. Agric.* **12** (6), 876-891.
- GÓMEZ-CASERO, M.T., I. CASTILLEJO-GONZÁLEZ, A. GARCÍA-FERRER, J.M. PEÑA-BARRAGÁN, M. JURADO-EXPOSITO, L. GARCÍA-TORRES und F. LÓPEZ-GRANADOS, 2010: Spectral discrimination of wild oat and canary grass in wheat fields for less herbicide application. *Agronomy for Sustainable Development* **30** (3), 689-699.
- GUTIÉRREZ, P., F. LÓPEZ-GRANADOS, J. PEÑA-BARRAGÁN, M. JURADO-EXPOSITO und C. HERVÁS-MARTÍNEZ, 2008: Logistic regression product-unit neural networks for mapping *Ridolfia segetum* infestations in sunflower crop using multitemporal remote sensed data. *Comput. Electron. Agr.* **64** (2), 293-306.
- HÄUSLER, A., H. NORDMEYER und J.STAFFORD, 1999: Characterizing spatial and temporal dynamics of weed seedling populations. Precision agriculture'99, Part 1. Papers presented at the 2nd European Conference on Precision Agriculture, Odense, Denmark, 11-15 July 1999., Sheffield Academic Press.

27. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 23.-25. Februar 2016 in Braunschweig

- HAY, G.J. und G. CASTILLA, 2008: Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA): A new name for a new discipline. In: *Object-based image analysis*. Springer, S. 75-89 %@ 3540770577.
- KECKLEY, J., 2014: Object-based image analysis of ultra-fine spatial resolution imagery acquired over a saltmarsh environment by an Unmanned Aircraft System (UAS). University of Tasmania.
- KIM, M., M. MADDEN und T.A. WARNER, 2009: Forest Type Mapping using Object-specific Texture Measures from Multispectral Ikonos Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **75** (7), 819-829.
- LAMB, D. und R.B. BROWN, 2001: Pa—precision agriculture: Remote-sensing and mapping of weeds in crops. *J. Agr. Eng. Res.* **78** (2), 117-125.
- LAN, Y., Y. HUANG, D. MARTIN und W. HOFFMANN, 2009: Development of an airborne remote sensing system for crop pest management: system integration and verification. *Trans ASABE* **25** (4), 607-615.
- LEBOURGEOIS, V., A. BEGUE, S. LABBE, M. HOULES und J.F. MARTINE, 2012: A light-weight multi-spectral aerial imaging system for nitrogen crop monitoring. *Precis. Agric.* **13** (5), 525-541.
- LELONG, C.C.D., P. BURGER, G. JUBELIN, B. ROUX, S. LABBE und F. BARET, 2008: Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. *Sensors-Basel* **8** (5), 3557-3585.
- LOPEZ-GRANADOS, F., 2011: Weed detection for site-specific weed management: mapping and real-time approaches. *Weed Research* **51** (1), 1-11.
- MANH, A.G., G. RABATEL, L. ASSEMAT und M.J. ALDON, 2001: Weed leaf image segmentation by deformable templates. *J. Agr. Eng. Res.* **80** (2), 139-146.
- MARCEAU, D.J. und G.J. HAY, 1999: Remote sensing contributions to the scale issue. *Canadian journal of remote sensing* **25** (4), 357-366.
- NORDMEYER, H., 2006: Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. *Precis. Agric.* **7** (3), 219-231.
- PFLANZ, M., D. FEISTKORN und H. NORDMEYER, 2014: Unkrautererkennung mit Hilfe unbemannter Luftfahrzeuge. *Julius-Kühn-Archiv* **443**, 396.
- RAMA RAO, N., P. GARG, S. GHOSH und V. DADHWAL, 2008: Estimation of leaf total chlorophyll and nitrogen concentrations using hyperspectral satellite imagery. *The Journal of Agricultural Science* **146** (01), 65-75.
- RAO, N.R., P. GARG und S. GHOSH, 2007: Development of an agricultural crops spectral library and classification of crops at cultivar level using hyperspectral data. *Precis. Agric.* **8** (4-5), 173-185.
- RASMUSSEN, J., J. NIELSEN, F. GARCIA-RUIZ, S. CHRISTENSEN und J.C. STREIBIG, 2013: Potential uses of small unmanned aircraft systems (UAS) in weed research. *Weed Research* **53** (4), 242-248.
- RASMUSSEN, J., M. NØRREMARK und B.M. BIBBY, 2007: Assessment of leaf cover and crop soil cover in weed harrowing research using digital images. *Weed Research* **47** (4), 299-310.
- SCHMALE, D.G., B.R. DINGUS und C. REINHOLTZ, 2008: Development and application of an autonomous unmanned aerial vehicle for precise aerobiological sampling above agricultural fields. *J. Field Robot* **25** (3), 133-147.
- SILVESTRI, S., M. MARANI und A. MARANI, 2003: Hyperspectral remote sensing of salt marsh vegetation, morphology and soil topography. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **28** (1), 15-25.
- SOGGAARD, H.T., 2005: Weed classification by active shape models. *Biosyst Eng* **91** (3), 271-281.
- SÖKEFELD, M. und R. GERHARDS, 2004: Automatische Unkrautkartierung mit digitaler Bildverarbeitung. *Landtechnik* **59** (3), 154-155.
- WILES, L.J. und E.E. SCHWEIZER, 1999: The cost of counting and identifying weed seeds and seedlings. *Weed Science* **47**, 667-673.
- XIANG, H.T. und L. TIAN, 2011: Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosyst. Eng.* **108** (2), 174-190.
- ZHANG, J.-H., W. KE, J. BAILEY und W. REN-CHAO, 2006: Predicting nitrogen status of rice using multispectral data at canopy scale. *Pedosphere* **16** (1), 108-117.