

## „Digitale Zwillinge“ als Werkzeug für die Entwicklung von Feldrobotern in landwirtschaftlichen Prozessen

Andreas Linz<sup>1</sup>, Joachim Hertzberg<sup>2</sup>, Jan Roters<sup>1</sup> und Arno Ruckelshausen<sup>1</sup>

**Abstract:** Die hohe Komplexität von feldbasierten Prozessen im landwirtschaftlichen Pflanzenbau stellt hinsichtlich der Variabilität der Pflanzen, des Bodens, der Technologien, des Umfeldes und zahlreicher Störgrößen erhebliche Anforderungen an die Entwicklung robuster Technologien. Simulationen spezifischer Aspekte unterstützen diese Entwicklungen seit vielen Jahren. Eine ganzheitliche Simulation des landwirtschaftlichen Prozesses – sozusagen ein „Digitaler Zwilling“ – unter Integration möglichst vieler der aufgeführten Einflussgrößen birgt dabei ein erhebliches Potenzial, insbesondere kann der Einfluss einzelner Größen auf den Gesamtprozess für die Fehleranalyse, den Service oder Neuentwicklungen verwendet werden. Weiterhin stellt die Kopplung der Simulationen mit den realen Systemen eine wichtige Schnittstelle für kurze Entwicklungszyklen und den Transfer von Forschungsergebnissen in die Praxis dar. In dieser Arbeit werden drei Beispiele „Digitaler Zwillinge“ im landwirtschaftlichen Kontext vorgestellt.

**Keywords:** Digitaler Zwilling, Feldroboter, Simulation, Gazebo, ROS.

### 1 Einleitung

Ein „Digitaler Zwilling“ stellt die Repräsentation eines realen Objektes in der digitalen Welt dar, wobei es unerheblich ist, ob dieses tatsächlich schon existiert. Folglich kann das Objekt immateriell sein und schon vor dem Aufbau in einer simulierten Umgebung entwickelt und getestet werden. Der Begriff „Digitaler Zwilling“ wurde stark durch „Industrie 4.0“ geprägt und wird in erster Linie mit Digitalisierung und Prozessoptimierungen der Wertschöpfungskette meist großer Unternehmen in Verbindung gebracht [Br18]. Hier können Gesamtprozesse bis zur SPS-Ebene simuliert und konzipiert werden, und das, wie oben schon erwähnt, ohne eine bereits existierende Anlage. In der Industrie, im täglichen Leben und in vielen anderen Bereichen, wie z. B. Automotive, werden KI (Künstliche Intelligenz) und vollautonome Vorgänge in naher Zukunft eine immer größere Rolle spielen. An dieser Stelle kann der „Digitale Zwilling“ sein volles Potenzial entfalten. Autonome Prozesse, die man aus Sicherheitsgründen in einer realen Umgebung nicht testen kann, werden in eine Simulation ausgelagert. Hierbei ist es möglich, materielle und digitalisierte Objekte zu mischen. Als Beispiel kann eine reale Kamera Bilder liefern, die

---

<sup>1</sup> Hochschule Osnabrück, Competence Center of Applied Agricultural Engineering COALA, 49076 Osnabrück, a.linz@hs-osnabrueck.de, jan.roters@hs-osnabrueck.de, a.ruckelshausen@hs-osnabrueck.de

<sup>2</sup> Universität Osnabrück und DFKI Robotics Innovation Center, Außenstelle Osnabrück, 49076 Osnabrück, joachim.hertzberg@uos.de

dann bei einem auf dem Computer simulierten Fahrzeug mit Hilfe einer Objekterkennung eine Aktion auslöst.

Auch im landwirtschaftlichen Kontext liegen die Vorteile auf der Hand. Es können nicht nur autonome Prozesse im Sinne einer Navigation schon im Voraus auf dem Computer ausgeführt werden, vielmehr ist es auch möglich, das Verhalten von Sensoren und deren Signale in der Simulation auszuwerten [Re18], um somit bestimmte Sensortechnologien für spezielle Einsatzbereiche besser bewerten zu können. Des Weiteren können landwirtschaftliche Prozesse, wie z. B. der Pflanzenschutz [Li17] oder die Phänotypisierung [TKR12] ohne aufwändige Feldversuche getestet und beurteilt werden.

Das Konzept ist nicht neu, konnte aber erst in den letzten Jahren dank höherer Rechnerleistungen und schnellerer Grafikkarten wirkungsvoll umgesetzt werden. Da in vielen Fällen eine 3D-Simulation erwünscht ist, bedienen sich einige Projekte bei der Spieleindustrie, die schon früh 3D-Umgebungen entwickelt hat. Eine beliebte Umgebung ist die „Unreal Engine“, die eine offene Schnittstelle besitzt und eigenen Bedürfnissen angepasst werden kann [CS16]. Gazebo [KH04] ist ebenfalls eine 3D-Simulationsumgebung inklusive „Physical Engines“, die auf Open-Source-Lizenzen basiert und speziell für den Robotikbereich entwickelt wurde. Einen hohen Beliebtheitsgrad erfährt der Simulator unter anderem durch die Möglichkeit, ihn direkt über eine definierte Schnittstelle in das Robotik-Framework ROS (**R**obot **O**perating **S**ystem) einzubinden. An der Hochschule und der Universität Osnabrück wird diese Kombination intensiv im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte und Studentenwettbewerbe genutzt. Beispiele hierfür sind ein Feldroboter zur Phänotypisierung (BoniRob [Ru09]), ein Roboter für Pflegemaßnahmen im Obst- und Weinbau (elWObot [Li14]) sowie Roboter für die Studentenwettbewerbe „Field Robot Event“ [Wa18] und „SICK Robot Day“.

## 2 Material und Methoden

### 2.1 3D-Simulationsumgebung Gazebo

Die 3D-Simulationsumgebung Gazebo ist aktuell (Oktober 2018) in der Version 9.0 erhältlich und wird standardmäßig mit der „Physical Engine“ ODE (**O**pen **D**ynamics **E**ngine) kompiliert. Falls diese für die eigenen Bedürfnisse nicht ausreicht, können alternativ die Open Source Engines „Bullet“, „Simbody“ oder „DART“ in Form von Plugins geladen werden. Das XML-Beschreibungsformat „SDF“ bietet die Möglichkeit, mit Hilfe von „Links“ und „Joints“ nahezu jedes Robotermodell zu kreieren. Für alle drei der hier beschriebenen Modelle wird der Verbindungstyp (Joint) „continuous“ genutzt, um Räder zu modellieren. Dieser Typ rotiert ohne Limit um eine Achse. Bei den Fahrzeugmodellen mit Lenkung werden zusätzliche rotierende Verbindungen mit Limit (revolute) verwendet. Das Beschreibungsformat erlaubt es auch, Reibungsfaktoren anzugeben, die für eine realitätsnahe Simulation unter Einbeziehung des Schlupfes

unentbehrlich sind. Zum Robotermodell kann dann noch eine entsprechende Umgebung mit Objekten, wie z. B. Straßen, Bäumen oder Gebäuden, erstellt werden. Was aus Gazebo ein wirklich schlagkräftiges Werkzeug macht, ist die Option, diverse Sensortypen von Laserscannern über Kameras bis zu 3D-Sensoren zu modellieren. Um die erzeugten Sensordaten weiterzuverarbeiten und Steuerbefehle an die Modelle zu senden, wird das Framework ROS über eine Plug-in Schnittstelle angebunden.

## 2.2 Framework ROS und OpenCV

**ROS** ist, wie der Name eigentlich vermuten lässt, kein Betriebssystem. Vielmehr handelt es sich um eine Middleware und eine große Sammlung von Software-Tools speziell für den Robotikbereich. Aktuell wird das Framework von der OSRF (**O**pen **S**ource **R**obotics **F**oundation) gepflegt und unter Open-Source-Lizenzen veröffentlicht. Das Grundgerüst stellt eine standardisierte Kommunikationsebene zum Austausch von Daten verteilter Systeme dar. Genau dieser Punkt macht das Framework extrem flexibel und bietet einer großen Community die Möglichkeit, Software zu veröffentlichen und auszutauschen. Auch die Industrie (z. B. Bosch, siehe [Ru09]) hat diese Plattform für sich entdeckt und steuert eigene Tools dazu bei. Die Kommunikation wird über einen „Master“ abgewickelt, der den Datenaustausch in Form von Nachrichten (Messages) unter verschiedenen Prozessen (Nodes) organisiert. Es spielt also keine Rolle, ob die Daten aus einer Simulationsumgebung oder einer realen Umgebung, z. B. einem Laserscanner, stammen. Somit können in der Simulationsumgebung Gazebo entwickelte Algorithmen direkt auf einer Hardware implementiert werden und vice versa.

**OpenCV** ist eine Open-Source-Programmbibliothek (BSD-Lizenz) für die Bildverarbeitung. Die ursprünglich von Intel veröffentlichte Software wurde lange Zeit von der *Willow Garage* gepflegt, welche unter anderem das an der Stanford-University entstandene ROS bis 2009 weiterentwickelt hat. Aus diesem Grund ist OpenCV im Framework ROS sehr gut integriert. Die Integration ist naheliegend, da ein großer Teil der erzeugten Sensordaten bildgebend ist [Ku17]. Die Bibliothek ist indirekt wieder in der Hand von Intel und wird stetig weiterentwickelt und optimiert. Die bildgebenden Daten müssen nicht zwangsweise von einer Kamera stammen, sie können auch von einem Laserscanner erzeugt werden, der keine Pixelintensitäten liefert, sondern Abstände und deren Positionen in einer Ebene. Da immer mehr Sensoren 3D-Informationen erzeugen, wurde unabhängig von OpenCV die Programmbibliothek PCL (**P**oint **C**loud **L**ibrary) [Wi13] speziell für die Verarbeitung von 3D-Punktwolken entwickelt. Auch diese ist sehr gut in ROS integriert.

## 3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden drei Feldroboter für unterschiedliche landwirtschaftliche Anwendungen vorgestellt. Jede Plattform ist materiell vorhanden und besitzt einen „Digitalen Zwilling“. Der Fokus liegt hierbei auf der Entwicklung und Optimierung einer

sensorbasierten autonomen Navigation. Mit entsprechendem Aufwand lassen sich aber auch viele auf dem Feld auszuführende Prozesse zusätzlich abbilden. Beispiele hierfür sind, wie oben schon erwähnt, die Phänotypisierung und der Pflanzenschutz.

### 3.1 BoniRob (Bonitur-Roboter)

Die Feldroboterplattform BoniRob (Abb. 1a. u. 1b.) wurde von der Hochschule Osnabrück mit den Projektpartnern „Amazonen-Werke H. Dreyer GmbH & Co. KG“ und der „Robert Bosch GmbH“ für die Pflanzenbonitur in Mais entwickelt. Da das Konzept modular gehalten ist, können unterschiedliche „Apps“ eingesetzt werden. Die Steuerungssoftware wurde größtenteils von Bosch entwickelt und basiert auf ROS. In einer Masterarbeit [Ro18] konnten erstmals kooperative Prozesse zweier Plattformen in der Simulation und auf dem Feld dargestellt werden. BoniRob Nr. 1 misst in Mais unter Verwendung eines „Hyperspectral Imaging Systems“ nicht-invasiv den Wassergehalt der Pflanzen und gibt diese Information inklusive der Position an BoniRob Nr. 2 weiter, der die Pflanzen dann analog dazu bewässert.

### 3.2 The Great Cornholio

Der Feldroboter Cornholio (Abb. 2c. u. 2d.) wurde von Studierenden für den Studentenwettbewerb „Field Robot Event“ entwickelt und basiert auf der vom Fraunhofer-Institut IAI konzipierten Plattform VolksBot. Vorrangige Aufgabe beim „Field Robot Event“ ist das autonome Navigieren durch Mais, inklusive der Wende am Ende der Reihe.

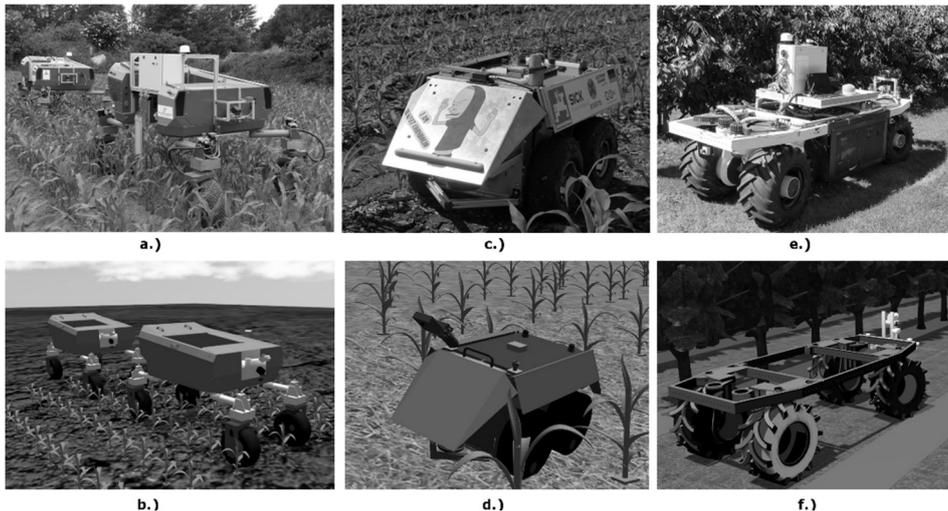


Abb. 1: a.) BoniRob 1 u. 2 b.) BoniRob 1 u. 2 – Digitale Zwillinge c.) Cornholio d.) Cornholio – Digitaler Zwilling e.) elWobot f.) elWobot – Digitaler Zwilling

Da der Boden auf dem Feld in der Regel nicht eben ist, und das Fahrzeug entsprechend nicken kann, geben Sensoren wie z. B. Laserscanner Signale zurück, die dann falsch interpretiert werden. Genau diese Effekte wurden mit dem „Digitalen Zwilling“ in der Simulation ausgiebig getestet, um dann die Algorithmen entsprechend anzupassen. Die Herausforderung ist hier, einen realitätsnahen Untergrund in der Simulation zu erzeugen.

### 3.3 elWObot (elektrisch angetriebener Wein- und Obstbau Roboter)

elWObot (Abb. 1e. u. 1f.) wurde zusammen mit Partnern aus Hochschule und Industrie entwickelt. Die Applikation „Pflanzenschutz im Obst- und Weinbau“ beinhaltet die autonome Navigation der Plattform sowie das Abtasten der Laubwand und die gezielte Ansteuerung der Spritzvorrichtung. Da die Plattform und die Spritze an unterschiedlichen Orten entwickelt und erst am Ende des Projektes zusammengefügt wurden, konnten die Navigation, die Laubwandabtastung und die Planung nur in einer Simulation als Gesamtprozess getestet werden. Im Speziellen das Erfassen der Laubwand mit einem vertikal ausgerichteten Laserscanner wurde komplett in der Simulation erstellt und dann erst auf einer Obstplantage erprobt.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

Das Konzept des digitalen Zwillings wurde im Bereich der Feldrobotik für verschiedene Anwendungsfälle mit unterschiedlichen Systemen umgesetzt. Die entsprechenden Softwareumgebungen werden sowohl in Forschungs- und Entwicklungsprojekten als auch in studentischen Projekten genutzt. Die durchaus aufwändige Einarbeitung in die komplexen Softwareumgebungen wird durch eine Reihe von Vorteilen belohnt. Die Simulationsumgebungen haben sich zu einer der am stärksten praxisorientierten Technologien entwickelt, da die Software direkt auf die Hardware umgesetzt werden kann. Angesichts einer Vielzahl variabler Feldsituationen können durch die Simulationen erhebliche Erfahrungen zur Vorbereitung selektiver Feldexperimente gewonnen werden. Beispiele sind die Auswahl und Positionierung von Sensorsystemen, und der Einfluss von Störgrößen oder Latenzzeiten. Darüber hinaus bieten sich durch die Nutzung des digitalen Zwillings mit seinem modularen Charakter sehr gute Möglichkeiten zur gemeinsamen Entwicklung von Technologien in Forschungsnetzwerken von Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen an.

**Danksagung:** Die Förderung der Vorhaben „BoniRob“ und „elWObot“ erfolgte aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestages. Die Projektträgerschaft erfolgte über die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) im Rahmen der Innovationsförderung.

## Literaturverzeichnis

- [Br18] Bracht, U.: Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, 2018.
- [CS16] Collins, T.; Shen, W.-M.: Rebots. A drag-and-drop high-performance simulator for modular and self-reconfigurable robots, ISI Technical Reports, 2016.
- [KH04] Koenig, N.; Howard, A.: Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566), Sendai, Japan, 2149-2154, 2004.
- [Ku17] Kubinger, W.; Peschak, B.; Wöber, W.; and Sulz, C.: Bildgebende Sensorsysteme für robotische Systeme in der Agrar- und Landtechnik. Elektrotech. Inftech. 6, 3, 5; 2017.
- [Li14] Linz, A.; Hertzberg, J.; Ruckelshausen, A.; Wunder, E.: Autonomous Service Robots For Orchards And Vineyards: 3D Simulation Environment Of Multi Sensor-Based Navigation And Applications, In 12th International Conference on Precision Agriculture, Sacramento, CA, USA, 2014.
- [Li17] Linz, A.; Brunner, D.; Fehrman, J.; Herlitzius, T.; Keicher, R.; Ruckelshausen, A.; Schwarz, H.-P.: Modelling environment for an electrical driven selective sprayer robot in orchards, In Proceedings of the 11th European Conference on Precision Agriculture. Advances in Animal Bioscience 8(2), S. 848-853, 2017.
- [Re18] Redenius, J.; Dingwerth, M.; Hertzberg, J.; Ruckelshausen, A.: Simulation von Laserscannern in Pflanzenbeständen für die Entwicklung umfeldbasierter Funktionen. In Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft. Fokus: Digitale Marktplätze und Plattformen: Referate der 38. GIL-Jahrestagung, 26.-27. Februar 2018 in Kiel, Germany, A. Ruckelshausen and A. Meyer-Aurich, Eds. Gesellschaft für Informatik e.V. (GI), Bonn, S. 195-198, 2018.
- [Ro18] Roters, J.: Kooperative Prozesse mit dem autonomen Feldroboter BoniRob am Beispiel der selektiven Bewässerung von Mais, Masterarbeit, Hochschule Osnabrück, 2018.
- [Ru09] Ruckelshausen, A.; Biber, P.; Dorna, M.; Gremmes, H.; Klose, R.; Linz, A.; Rahe, F.; Resch, R.; Thiel, M.; Trautz, D.; Weiss, U.: BoniRob – an autonomous field robot platform for individual plant phenotyping. In Proceedings of the 7th European Conference on Precision Agriculture (ECPA), Wageningen Academic Publishers, S. 317-318, 2009.
- [TKR12] Tsukor, V.; Klose, R.; Ruckelshausen, A.: Multi-sensor simulation method for outdoor plant phenotyping based on autonomous field robots, In Proceedings International Conference of Agricultural Engineering-CIGR-AgEng 2012, Valencia, S. 55-60, 2012.
- [Wa18] Waghorn Christopher: FIELD ROBOT EVENT PROCEEDINGS 2017 15th Ed. Proceeding, Harper Adams University, 2018.
- [Wi13] Wiemann, T.; Annuth, H.; Lingemann, K.; Hertzberg, J.: An evaluation of open source surface reconstruction software for robotic applications. In 16th International Conference on Advanced Robotics (ICAR), 25-29, Montevideo, Uruguay. IEEE, Piscataway, NJ, 1-7, 2013