

ATZ extra

Wenn Maschinen sehen lernen
Intelligente Assistenten
für unwegsames Gelände

Intelligente Assistenzsysteme für Gelände- und Objekterkennung

© fotolia.com | K. Thalhofer | santiago silver | ufotopixl10

AUTOREN



Dr. Eva Neumann
ist Entwicklungsingenieurin im
Bereich Computer Vision bei der
ITK Engineering GmbH in Lollar.



Kevin Hirsch, M. Sc.
ist Entwicklungsingenieur im
Bereich Computer Vision bei der
ITK Engineering GmbH in Lollar.



Dipl.-Ing. Uwe Westermeier
ist tätig im Business Development
Mobile Arbeitsmaschinen der
ITK Engineering GmbH in Lollar.

Elektronische Assistenzsysteme sind bei Straßenfahrzeugen bereits fest etabliert, können aber für mobile Arbeitsmaschinen nicht unverändert genutzt werden. Denn während die Assistenzsysteme im Straßenverkehr von einem planaren und gestalteten Umfeld ausgehen, werden mobile Arbeitsmaschinen, wie Erdbau-
maschinen, meist auf unebenem und unstrukturiertem Gelände eingesetzt. Für diese Herausforderungen hat ITK Engineering mit einem intelligenten, kamerabasierten Assistenzsystem Technologien und Algorithmen entwickelt, die sich in zukünftige Arbeitsmaschinen integrieren lassen.

SICHERHEITSANFORDERUNGEN FÜR MOBILE ARBEITSMASCHINEN

Genau wie im Straßenverkehr sind auch im Bereich der mobilen Arbeitsmaschinen die meisten Unfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen. Dabei zählen vor allem Sichteinschränkungen als vorrangige Ursache von tödlichen An- und Überfahrnfällen und führten beispielsweise im Bereich der Erdbaumaschinen zu einer Überarbeitung der Sichtfeldanforderungen in den Normen ISO 5006 und EN 474-1. Gefordert wird zukünftig, dass der Maschinenführer ausreichende Sichtverhältnisse über den gesamten Gefahrenbereich der Maschine hat. Unter anderem müssen auch arbeitende Personen in kniender Haltung im unmittelbaren Nahbereich der Maschine sichtbar sein [1]. Zur Erreichung dieses Kriteriums werden derzeit vorrangig Kamera-Monitor-Systeme zur Überwachung aller Gefahrenzonen eingesetzt. Zwar ermöglichen diese eine Kontrolle über den Nahbereich rund um die Maschine, erfordern allerdings auch die ständige Konzentration des Maschinenführers auf den Monitor und gleichzeitig auf alle Bedienelemente der Maschine. Dies kann zu einer Überforderung und damit zu einer Min-

derung der Leistungsfähigkeit des Fahrers führen [2]. Es ist daher sinnvoll, den Maschinenführer bei der Personen- und Objekterkennung in schwer einsehbareren Bereichen zusätzlich mithilfe eines Sensorwarnsystems zu unterstützen und bei Gefahren gegebenenfalls auch in die Aktorik der Maschine einzugreifen. Elementare Voraussetzung hierfür ist eine robuste Erfassung des umgebenden Geländes, die den meist rauen Bedingungen der Einsatzorte mobiler Arbeitsmaschinen gerecht wird.

Die aktuellen Sensor- und Kamertechnologien und die dazu passenden Bildverarbeitungsalgorithmen ermöglichen mittlerweile Assistenzsysteme, die an die jeweiligen Kundenbedürfnisse und den Typ der mobilen Arbeitsmaschine angepasst sind. ITK Engineering hat für Baustellenfahrzeuge auf unebenem Gelände einen Technologiedemonstrator entwickelt, der ein mögliches intelligentes kamerabasiertes Assistenzsystem darstellt [3, 4].

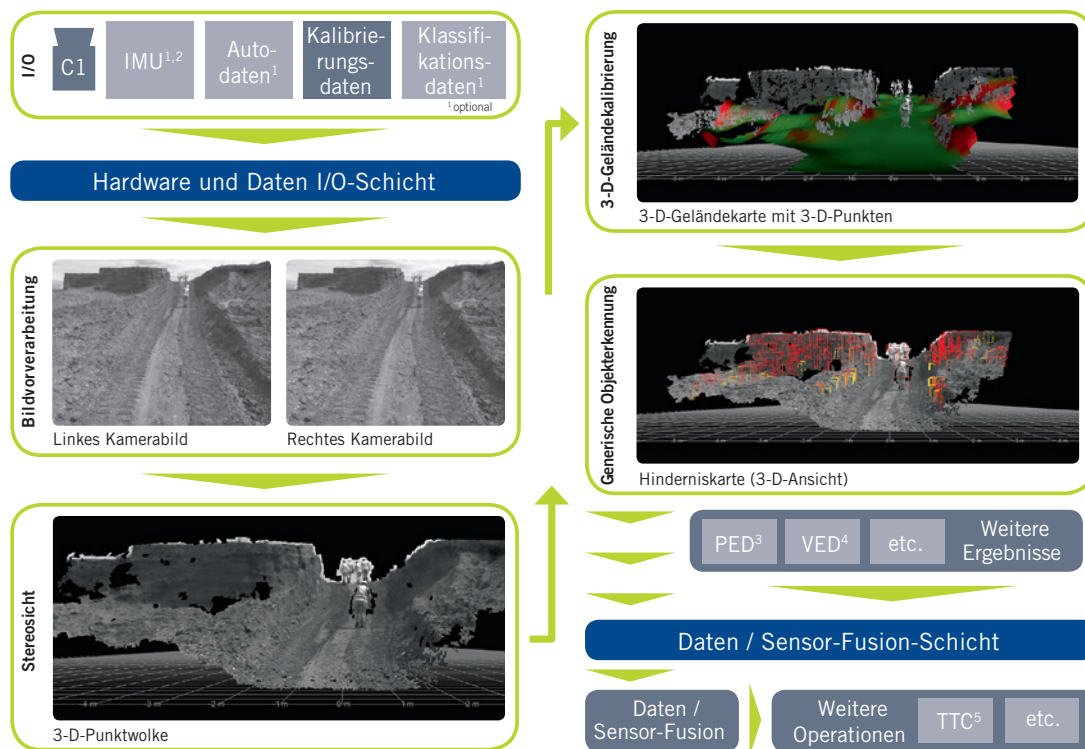
INTELLENTES ASSISTENZSYSTEM FÜR UNEBENES GELÄNDE

Der entwickelte Technologiedemonstrator basiert auf einer robusten Stereokamera und einer Embedded-Plattform mit

einer Vielzahl an Bildverarbeitungsalgorithmen. Die Stereokamera besteht aus zwei gekoppelten Monokameras, die synchron Bilder erfassen. Die auf diese Weise gewonnenen 2-D-Bildpaare erlauben die Ableitung von 3-D-Informationen wie der Distanz von Objekten zur Kamera und ihrer tatsächlichen Größe. Diese Bilder werden in aufeinanderfolgenden Analyseschritten verarbeitet, **BILD 1**, um eine detaillierte 3-D-Umgebungskarte des Geländes und seiner Befahrbarkeit zu berechnen und Personen im Gefahrenbereich der Maschine zu erkennen sowie den Fahrer davor zu warnen. Vor dem Einsatz wird das System einmalig kalibriert. Dabei werden die extrinsischen und intrinsischen Kameraparameter bestimmt, die eine effiziente und genaue Distanzbestimmung ermöglichen.

BILDAUFBEREITUNG

Anfänglich werden bildverbessernde Vorverarbeitungsschritte, wie die Kontrastanpassung und die Rauschunterdrückung auf das Stereobildpaar, angewandt. Zusätzlich werden durch das Kameraobjektiv entstandene Bildverzerrungen entfernt. Aus einem vorprozessierten 2-D-Stereo-



² Inertiale Messeinheit, ³ Fußgängererkennung, ⁴ Fahrzeugerkennung, ⁵ Zeit bis Kollision

BILD 1 Aufbau des intelligenten Assistenzsystems (© ITK Engineering)

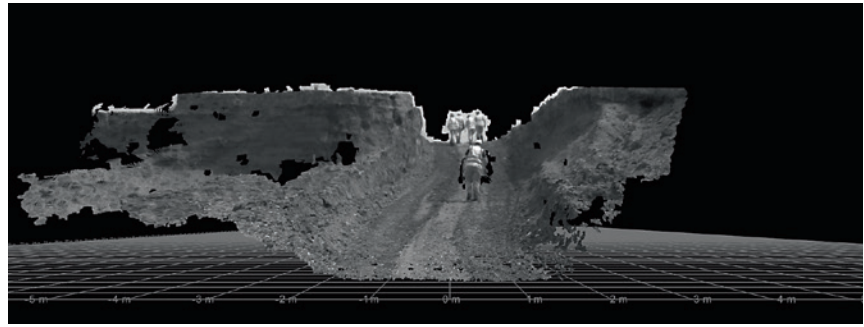


BILD 2 Kamerabild (links), Pixel als Projektion im 3-D-Raum dargestellt – in den schwarzen Bereichen fehlt die Tiefeninformation, weil die Punkte sich außerhalb des Sichtfelds befinden oder durch Objekte verdeckt werden (rechts) (© ITK Engineering)

bildpaar wird in diesem Analyseschritt die Tiefeninformation gewonnen. Ähnlich wie beim menschlichen Sehen erfolgt dies aus dem Abstand von korrespondierenden Merkmalen in den Bildpaaren. Fokussieren wir einen Gegenstand vor uns und halten uns abwechselnd ein Auge zu, dann scheint der Gegenstand abhängig von seinem jeweiligen Abstand zu uns hin und her zu springen. Dieser Abstand zwischen korrespondierenden Bildmerkmalen, genannt Disparität, ist umgekehrt proportional zur Entfernung des Gegenstands von uns. Das menschliche Gehirn gewinnt einen Teil seiner Tiefeninformationen aus den Disparitäten korrespondierender Merkmale in Bildern vom rechten und vom linken Auge.

Ähnlich funktioniert auch der Ansatz beim maschinellen Sehen. Dafür werden zunächst markante Bildpunkte (Key Points) in beiden Kamerabildern erfasst. Anschließend erfolgt die sogenannte Korrespondenzanalyse, das heißt die Zuordnung zusammengehöriger Key Points in beiden Bildern. Um die Korrespondenzanalyse zu beschleunigen, werden die Bildpaare

so ausgerichtet, dass die gleichen Zeilen der linken und der rechten Bilder die korrespondierenden Informationen enthalten. Dafür werden die während der Kalibrierung gewonnenen Kamerainformationen und Eigenschaften der Epipolargeometrie genutzt. Dies erlaubt die effiziente Zuordnung zusammengehöriger Key Points, da sich der Suchraum auf eine Bildzeile beschränkt. Aus den Disparitäten, das heißt den Abständen der Punkte im ersten und im zweiten Bild, werden anschließend die Distanz zur Kamera und die x-, y-, und z-Echtweltkoordinaten der Punkte bestimmt, **BILD 2**.

ERFASSUNG VON UNEBENEM GELÄNDE

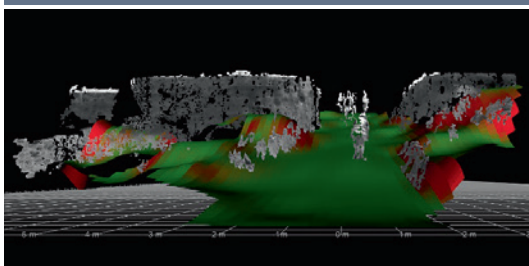
Um die 3-D-Geländekarte zu berechnen, wird zunächst eine Erhebungskarte erzeugt. Zur effizienten Modellierung des Geländes wird dafür eine fixe Gitterstruktur auf der x-y-Ebene genutzt. Jeder 3-D-Punkt wird gemäß seinen Koordinaten einer Zelle im Gitter zugeordnet. Die Nutzung einer Gitterstruktur

bietet nicht nur einen Effizienzvorteil, denn die Höhenverteilung der Punkte innerhalb einer Gitterzelle erlaubt auch Rückschlüsse darüber, ob ein einzelner Punkt zum Gelände oder zu einem Objekt gehört. Anschließend wird eine erste grobe Modellierung des Geländes durch eine Spline-Approximation mit einer geringen Anzahl an Freiheitsgraden durchgeführt. Hieraus lässt sich ein grobes Verständnis für das vorausliegende Gelände gewinnen, zum Beispiel Abhänge, Erhebungen oder abschüssiges Gelände. Auf dieser groben Approximation aufbauend, wird eine zweite, feinere Spline-Approximation mit einer größeren Anzahl an Freiheitsgraden berechnet. Durch den zweiten Schritt bleiben auch feinere Geländedetails erhalten, **BILD 3**.

ERKENNUNG VON KOMPLEXEN OBJEKTEN

Aus dem modellierten Gelände kann anhand der vorhandenen Steigungsinformationen die Befahrbarkeit bestimmt werden, **BILD 3**. Darüber hinaus wird die

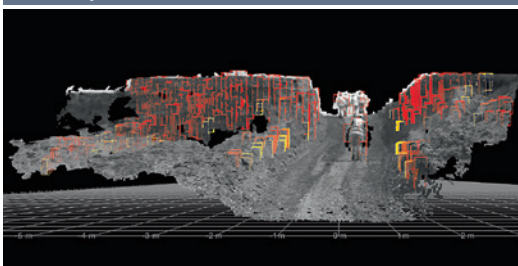
3-D-Geländekarte



3-D-Gelände

- Grün: befahrbar
- Rot: nicht befahrbar

3-D-Objektdetektion



3-D-Objekte inklusive Metadaten

- Absolute Entfernung
- Größe
- Bewegungsrichtung

BILD 3 Objekterkennung (links sind das aus den 3-D-Daten berechnete Gelände (bedingt durch die lokale Steigung farblich kodiert) sowie alle 3-D-Daten (grau), die sich auf dem Gelände befinden, dargestellt – Rot symbolisiert eine hohe lokale Steigung; rechts sind die 3-D-Daten mit erkannten Hindernissen visualisiert) (© ITK Engineering)

Geländekarte zur Identifikation von Hindernissen herangezogen, indem man die Höhe einer Zelle mit dem errechneten Gelände vergleicht und statistische Größen der Punkteverteilung innerhalb der Zelle berücksichtigt. Die entstandenen einzelnen, als Hindernis markierten Zellen werden mithilfe eines Algorithmus zur Berechnung von Zusammenhangskomponenten zu ganzen Objekten zusammengefasst und deren minimale Entfernung zum Fahrzeug errechnet, **BILD 3**. Jedes dieser einzelnen Objekte wird zusätzlich mit einem Kalmanfilter getrackt, wodurch Rauschen und einzelne Fehldetektionen eliminiert werden können und somit die Objekterkennung stabilisiert wird. Darüber hinaus wird auch die Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Objekts bestimmt. Die Geländekarte in **BILD 3** zeigt, dass Erhebungen und Senken zwar erhalten bleiben, Objekte wie Bagger, Steine und Personen sich jedoch korrekt herausrechnen lassen.

ERKENNUNG VON PERSONEN IM GEFAHRENBEREICH

Die zuvor ermittelten Objekte auf dem Gelände werden in diesem Analyseschritt mithilfe von Deep-Learning-Methoden näher klassifiziert, das heißt, das System entscheidet automatisch, ob es sich bei einem Objekt im Umfeld der Maschine um eine Person handelt oder nicht, **BILD 4**. Bei Deep-Learning-Methoden handelt es sich um statistische Datenanalysealgorithmen aus dem Bereich des maschinellen Lernens, die sich in den letzten Jahren besonders wegen ihrer Erkennungsgenauigkeit zu einem wichtigen Werkzeug des maschinellen Sehens etabliert haben.

Bevor ein Deep-Learning-Algorithmus zwischen einer Person und einem anderen Objekt unterscheiden kann, muss der Algorithmus trainiert werden. In diesem initialen Schritt lernt er, basierend auf einer großen Menge an unterschiedlichen Bildern von Personen, ein Erkennungsmuster. Nach dem Trainingsprozess kann dann der Algorithmus im fortlaufenden Betrieb des Assistenzsystems selbstständig Personen von anderen Objekten in den Stereobildern unterscheiden.

Der Einsatz von Deep-Learning-Methoden ermöglicht nicht nur die Erkennung von Personen, vielmehr können auch eine große Bandbreite anderer Objektklassen, wie Schilder oder Tiere,



BILD 4 Erkennung von Personen (erkannte Hindernisse sind entsprechend ihrer Abstände zur Kamera farblich markiert (grün: weit entfernt; rot: im Nahbereich); Fußgänger werden zusätzlich durch einen Rahmen gekennzeichnet) (© ITK Engineering)

antrainiert werden. Es ist zudem möglich, den Algorithmus auf die Klassifikation mehrerer unterschiedlicher Objektklassen gleichzeitig zu trainieren.

ABSICHERUNG UND SYSTEMINTEGRATION

Die ausgewählten, zuvor beschriebenen Algorithmen müssen zusammen mit einer Vielzahl anderer Softwaremodule auf einer geeigneten Hardware-Plattform integriert und getestet werden. Gerade die Absicherung von kamerabasierter Personen- und

Objekterkennung erfordert die Bereitstellung großer Mengen gesicherter Testbilder oder virtueller Testumgebungen mit relevanten Szenen aus der Arbeitswelt mobiler Maschinen. Nach erfolgreicher Verifikation von Hardware und Software auf einem maschinentauglichen elektronischen Steuergerät muss dieses in die jeweilige Arbeitsmaschine sicher integriert werden. Der inverkehrbringende Maschinenhersteller ist an viele normative Regelungen gebunden und muss die funktionale Sicherheit seiner Maschine gewährleisten [5]. Dieser Prozess ist in **BILD 5** dar-

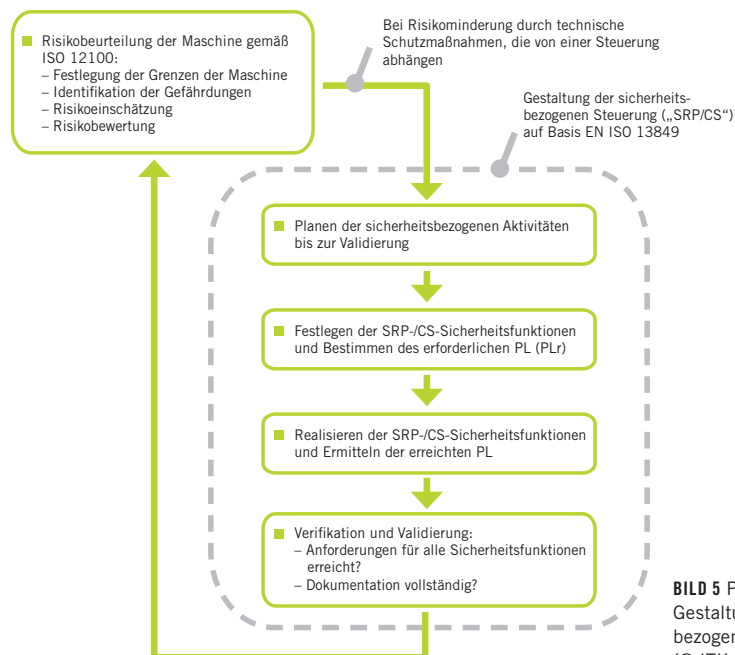


BILD 5 Prozess zur Gestaltung sicherheitsbezogener Steuerungen (© ITK Engineering)

gestellt. Neben Aspekten der funktionalen Sicherheit (Safety) haben im Zeitalter der Digitalisierung und Vernetzung mobiler Arbeitsmaschinen zusätzlich Aspekte der Cyber-Sicherheit (Cyber Security) an Bedeutung gewonnen. Beide Themen sollen an dieser Stelle nicht weiter vertieft werden. Die Erfahrung aus dem Bereich der Entwicklung solcher Lösungen für Straßenfahrzeuge hat jedoch gezeigt, dass hiermit ein erheblicher Entwicklungsaufwand verbunden ist.

ZUSAMMENFASSUNG

Wo schwere Nutzfahrzeuge, Landmaschinen oder mobile Arbeitsmaschinen zum Einsatz kommen, um viele Tonnen Baumaterial zu bewegen, spielt die Arbeitssicherheit eine zentrale Rolle. Dabei stellen der unebene und teilweise nicht befahrbare Untergrund, komplexe

Hindernisse sowie schwierige Umgebungsbedingungen mit starker Erschütterung und Verschmutzung neue Anforderungen an die Systementwickler und Nutzer der Maschinen. Intelligente Assistenzsysteme, die sich bereits im Straßenverkehr bewährt haben, können auch bei mobilen Arbeitsmaschinen zu einer Steigerung der Arbeitssicherheit und Produktivität beitragen. Die Grundlage dazu liefern komplexe Algorithmen und die zu ihrer Ausführung notwendigen elektronischen Steuergeräte mit Hochleistungsprozessoren. Zusammen mit robuster Sensorik und Aktorik müssen diese Hardware-/Software-Lösungen sicher in mobile Arbeitsmaschinen integriert werden. Bei der Systemintegration rücken sowohl Anforderungen an die funktionale Sicherheit als auch an die Cyber-Sicherheit immer mehr in den Vordergrund. Ein modularer Ansatz auf

Software- und Hardware-Ebene sowie die normengerechte Systementwicklung sind wichtige Voraussetzung für die Realisierung leistungsfähiger, kostengünstiger und integrierbarer Lösungen.

LITERATURHINWEISE

- [1] N. N.: Empfehlung Sicht beim Einsatz von Erdbaumaschinen und Walzen. Online: www.bgbau.de/praev/fachinformationen/arbeitsmittel/sichtfeld-von-erdbaumaschinen/downloads/empfehlung-sicht-beim-einsatz-von-erdbaumaschinen-und-walzen, aufgerufen am 20.11.2017
- [2] Rinneberg, S.: Assistenzfunktionen für Erdbaumaschinen mittels Identifikationstechnologie. München, Technische Hochschule, Dissertation, 2016
- [3] Kramarczyk, P.: Assistenzsysteme für die Baustelle. In: CVC News (2017), Nr. 1, S. 25–27
- [4] N. N.: When machines learn to see. Online: www.youtube.com/watch?v=wy34QtmslgM, aufgerufen am 20.11.2017
- [5] N. N.: Funktionale Sicherheit. www.netzwerk-baumaschinen.de/material/download/nwBMA_FuSi.pdf, aufgerufen am 20.11.2017

Impressum: Sonderausgabe 2018 in Kooperation mit
ITK Engineering GmbH, Im Speyerer Tal 6, 76761 Rülzheim;
Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH,
Postfach 1546, 65173 Wiesbaden,
Amtsgericht Wiesbaden, HRB 9754, USt-IdNr. DE81148419

Geschäftsführer: Stefanie Burgmaier, Joachim Krieger, Juliane Ritt
Verkaufsleitung (verantwortlich für den Anzeigenteil):
Volker Hesedenz
Chefredakteur: Dr. Alexander Heintzel

Projektmanagement: Anja Trabusch
Druck: PRINT PRODUKTION-SERVICE, W. Hiese GmbH,
Tilsiter Weg 9, 61273 Wehrheim
Titelbild: © iStockphoto LP




ITK Engineering

Seit der Firmengründung 1994 stehen wir für Stabilität, Sicherheit und Methodenexpertise. Damals wie heute bildet branchenübergreifendes Spezialwissen insbesondere im Bereich der Regelungstechnik und der modellbasierten Entwicklung die Basis, um unsere Kunden von der Idee bis zur Serienproduktion durchgängig zu begleiten.

Unsere Kompetenzen umfassen u.a.:

- Elektrik/Elektronik
- Systemintegration
- System- und Softwareentwicklung
- Qualitätssicherung
- Hardwareentwicklung

Die Zufriedenheit all unserer Partner und ein respektvolles Miteinander prägen unsere Unternehmensphilosophie, in der vier Werte fest verankert sind: Lesen Sie gerne mehr darüber im Web.

ITK Engineering GmbH
Hauptsitz Rülzheim
Im Speyerer Tal 6
76761 Rülzheim
Tel.: +49 (0)7272 7703-0
Fax: +49 (0)7272 7703-100
info@itk-engineering.de

Gründet 1994 –
heute hat ITK deutschlandweit Niederlassungen und ist international vertreten.

Folgen Sie uns auch auf:





www.itk-engineering.de
www.itk-karriere.de