

Optische Umgebungserfassung in Automobilen

C. Stiller

Durch maschinelle optische Wahrnehmung der Fahrumgebung erhalten Automobile neuartige Fähigkeiten, die mittelfristig zu einer qualitativen Verbesserung der Fahrzeugsicherheit und –effizienz führen. Dieser Beitrag beschreibt die aktuelle und mögliche langfristige Entwicklung dieser Technologien. Ausgehend von Punktkorrespondenzen in Bildfolgen ermöglicht die Kenntnis der Kamerakalibrierung eine Rekonstruktion der 3d Geometrie. Multifokale aktive Kamerasysteme mit selbstkalibrierendem Stereo zeigen attraktive Parallelen zum menschlichen Sehsystem. Für die praktische Realisierung und Erprobung erster einfacher und bereits zuverlässig beherrschter Funktionen bilden die von der US DARPA veranstalteten *Challenges* eine Erprobungsplattform. Langfristig ausgerichtete Methodenerforschung für die Situationswahrnehmung, Verhaltensentscheidung und -ausführung bildet den Fokus des SFB Tr. *Kognitive Automobile*.

1. Einführung

Einer der faszinierendsten Trends in der Entwicklung moderner Automobile besteht in deren zunehmender Fähigkeit, selbst ihre Umgebung durch Umfeldsensorik wahrzunehmen, diese Information zu strukturieren und den Fahrer mit der so gewonnenen Information in seiner Fahraufgabe zu unterstützen. Diese Unterstützung wird in mehreren Zwischenstufen langfristig bis hin zur eigenständigen automatischen Ausführung von Fahrmanövern reichen. Bereits unter laborvergleichbaren Erprobungsbedingungen absolvierte autonome Fahrmanöver indizieren das Potenzial wahrnehmender und autonom handelnder Automobile zur qualitativen Beeinflussung unserer Mobilität.

Eine Reihe der in Abbildung 1 dargestellten Fahrzeugumfeldsensoren und Fahrerassistenzsysteme befindet sich bereits im Markt. Um die Jahrtausendwende wurde zunächst ACC¹ in einigen Oberklasseautomobilen eingeführt. Dabei werden durch einen Lidar- oder Radarsensor die Entfernung, der Azimut und die Relativgeschwindigkeit zu anderen Fahrzeugen bestimmt. Diese Information wird zur Längsregelung des Fahrzeuges verwendet. Im Falle einer freien Fahrbahn wird eine voreingestellte Sollgeschwindigkeit eingeregelt. Sobald ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug detektiert wird, schaltet ACC auf eine Abstandsregelung um, bis dieses Fahrzeug – z.B. nach einem Spurwechsel – nicht mehr auf der eigenen Fahrbahn fährt. Das System wurde als Komfortsystem eingeführt und die derzeit realisierbaren Wahrnehmungsfähigkeiten

¹ Adaptive Cruise Control, herstellerabhängig auch als *Distronic* bezeichnet

sind für eine sichere autonome Längsführung unter allgemeinen Bedingungen auch unzureichend, d.h. die Verantwortung für die Fahrzeugführung liegt weiterhin beim Fahrer und muss beim derzeitigen Stand der Technik auch dort liegen. Entsprechend wurden die Eingriffsmöglichkeiten beschränkt. So entspricht etwa die maximale Bremsverzögerung des Systems typischerweise nur etwa 25% der Verzögerung einer Vollbremsung.

Besonders im Nutzfahrzeugbereich finden Spurverlassenswarner Verbreitung, die den Fahrer haptisch oder akustisch bei Überfahren von Spurmarkierungen alarmieren. Diese Systeme bestimmen die Position von Spurmarkierungen in der Regel durch Auswertung von Bildern einer Kamera, die hinter der Windschutzscheibe angebracht ist. Eine zunehmende Ausweitung auf Personenwagen wird erwartet.

Nachtsichtsysteme seien als drittes Beispiel heutiger umgebungserfassender Systeme im Automobil aufgeführt. Nachtsichtsysteme verwenden entweder passive FIR²-Kameras oder setzen NIR³-Kameras mit entsprechenden Scheinwerfern ein. Im fernen Infrarotbereich sind viele Körper aufgrund ihres thermischen Kontrasts gegenüber ihrer Umgebung wahrnehmbar. Durch Einsatz eines Fernlichts im für das menschliche Auge nicht blendenden nahen Infrarotbereich wird dagegen die Umgebung für übliche Bildaufnehmer auf Siliziumbasis ausgeleuchtet, so dass weitestgehend zum sichtbaren Bereich vergleichbare Bilder entstehen. Beide Technologien stellen in heutigen Nachtsichtsystemen dem Fahrer ein Bild dar, durch das er eine im Vergleich zur gewöhnlichen Scheinwerferausleuchtung erhöhte Sichtweite erhält. Es ist zu erwarten, dass derartige Systeme künftig zusätzlich über eine maschinelle Bildauswertung verfügen und die Fahrzeugführung durch Warnung oder Eingriff unterstützen werden.

Obige Beispiele verdeutlichen, dass es zwar bereits erste realisierte Funktionen gibt, die optische Erfassung und Interpretation der Umgebung von Automobilen aber hinsichtlich der erzielten Sicherheit und Zuverlässigkeit noch erheblichen Forschungsbedarf aufweist, bevor derartige Systeme umfassend die Fahrzeugsicherheit verbessern werden. In der nahen Zukunft sind entsprechend zunächst weitere Warnfunktionen, etwa vor drohenden Kollisionen mit dem vorauswärtigen Verkehr oder im Kreuzungsbereich zu erwarten. In speziellen Situationen werden automatische Fahrmanöver folgen. Diese umfassen etwa Einparkmanöver oder Staufolgefahren. Gleichzeitig werden Anwendungen zunehmend dort ansetzen, wo der Fahrer am dringendsten Unterstützung benötigt. So werden etwa in kritischen Fahrsituationen geeignete Notmanöver eingeleitet oder der Fahrer in deren Ausführung unterstützt.

² Fernes Infrarotlicht

³ Nahes Infrarotlicht

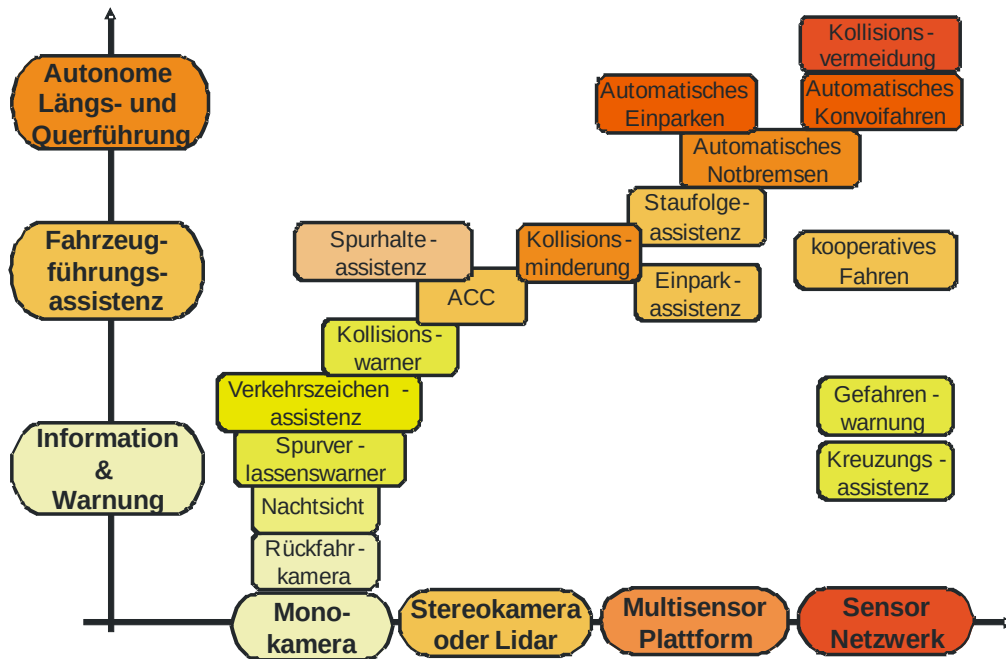


Abb. 1: Fahrerassistenzfunktionen und erforderliche Umfellsensoren

2. Korrespondenzen in monoskopischen und stereoskopischen Bildfolgen

Die Kenntnis der korrespondierenden Bildpunkte, d.h. der Bildpositionen verschiedener Bilder, auf die der selbe reale Punkt der Welt projiziert wird, erlaubt in einer kalibrierten Kameraanordnung die Rekonstruktion dessen Position im 3d Raum mittels Triangulation. Für die Bestimmung von Korrespondenzen sind in der Literatur eine Vielzahl an Verfahren bekannt, s. z.B. [3], [9], [12], [13], [16].

Im einfachsten Fall einer rektifizierten Stereoanordnung erhält man die 3d Position $\mathbf{X}$ im Kamerakoordinatensystem der linken Kamera gemäß

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \frac{fb}{d} \begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

worin $(x_l \ y_l)^T, (x_r \ y_r)^T$ die Bildkoordinaten der linken bzw. rechten Kamera, f die Brennweite, b die Basisbreite (d.h. den Abstand der beiden optischen Zentren) der Stereokamera und $d = x_l - x_r$ die Disparität zwischen den Korrespondenzen bezeich-

nen. Bei gegebener Unsicherheit des Disparitätsschätzers nimmt die Standardunsicherheit der Entfernung Z entsprechend quadratisch mit der Entfernung zu. Deshalb ist die stereoskopische 3d Rekonstruktion nur im Nahbereich sinnvoll nutzbar, der je nach Konfiguration bis etwa 70 m reichen mag.

Ist die translatorische und rotatorische Bewegung der Kamera relativ zum betrachteten Objekt bekannt, lässt sich die Triangulation in zeitlich aufeinander folgenden Punktkorrespondenzen vornehmen. Wie in Abbildung 2 illustriert ist, profitiert man bei diesem als *Bewegungs-Stereo* bezeichneten Verfahren von der mit wachsender Zeit anwachsenden Basisbreite. Dadurch nimmt die Reichweite der Sensoranordnung mit wachsender Messdauer zu.

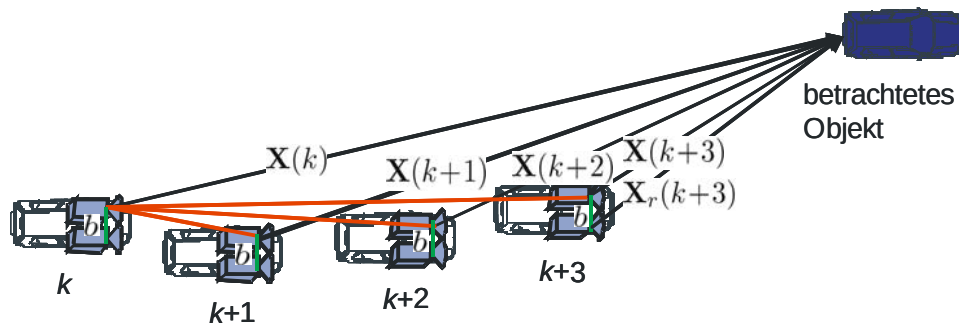


Abb. 2: Objektdetektion mittels Stereokamera und Bewegungs-Stereo

Bewegungs-Stereo ist gegenüber einer stereoskopischen Kameraanordnung darüber hinaus attraktiv, weil nur ein einziger Kamerakopf benötigt wird. Für Anwendungen, die 3d Umgebungsinformation mit hoher Messsicherheit erfordern, sind allerdings Stereokameras – oder zumindest die Kombination einer Kamera mit weiteren Sensoren – unverzichtbar. Die Ursache hierfür liegt in der fundamentalen Eigenschaft von Bewegungs-Stereo, nach der die Position und Geschwindigkeit eigenbewegter Objekte ohne zusätzliches Vorwissen nur bis auf eine Mehrdeutigkeit mit einem Freiheitsgrad bestimmt werden kann. Aufgrund dieser unter dem Begriff *Bearings-only-Tracking* in der Literatur bekannten Eigenschaft sind monoskopische Kameras für die Mehrzahl sicherheitskritischer Anwendungen unzureichend [2]. Bei Verwendung einer Stereokamera bietet die gleichzeitige Nutzung von Disparität und Verschiebung eine redundante 3d Vermessung, die aus einem einzigen Stereobildpaar eine instantane Wahrnehmung im Nahbereich erlaubt, welche durch zeitliche Verfolgung verbessert wird und durch die anwachsende Bewegungs-Stereobasis eine zeitlich zunehmende Reichweite aufweist [5].

3. Kamerakalibrierung

Zur Rekonstruktion der 3d Geometrie aus Punktkorrespondenzen einer Stereokameraanordnung ist eine Kalibrierung erforderlich. Die bei der Kalibrierung zu bestimmenden Parameter umfassen die intrinsischen Parameter, d.h. Brennweite, Hauptpunkt und Linsenverzerrung, sowie die extrinsischen Parameter, die durch die Basisbreite b und die Rotationswinkel der Kameras um jeweils drei Achsen $(\Phi_l \ \Psi_l \ \Theta_l)^T$, $(\Phi_r \ \Psi_r \ \Theta_r)^T$ gegeben sind, s. Abb. 3.

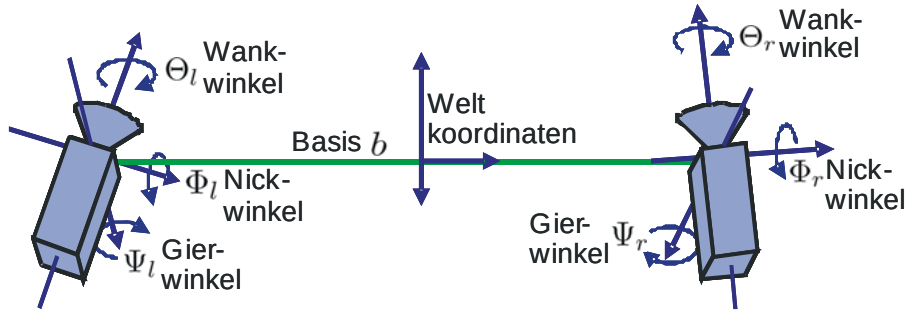


Abb. 3: Extrinsische Kameraparameter einer Stereoanordnung

Während es ausreicht, die intrinsischen Parameter einmalig vor Auslieferung eines Fahrzeugs zu bestimmen und spätere Veränderungen vernachlässigbar sind, ist eine ausreichende Konstanz der extrinsischen Parameter über der Lebenszeit eines Automobils mechanisch kaum zu gewährleisten. In typischen Konfigurationen wäre hierfür eine mechanische Steifigkeit und Robustheit gegenüber thermischen Einflüssen bis auf Rotationswinkel im Bereich von hundertstel Grad erforderlich.

Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit gegenüber Rotation eignen sich Kameras hervorragend zur Messung ihrer eigenen Orientierung. Diese Eigenschaft wird in Selbstkalibrierungsverfahren genutzt. Arbeiten zur Selbstkalibrierung einer bewegten monokularen Kamera [1] wurden auf bewegte und aktive Stereoanordnungen erweitert [4]. Dabei werden unterschiedliche Korrespondenzbeziehungen als Beobachtungsgleichungen eingesetzt. Korrespondenzen zwischen gleichzeitig aufgenommenen Bildern der linken und rechten Kamera einer Stereoanordnung erlauben die Nutzung der Epipolarbedingung

$$\begin{pmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{pmatrix}^T \mathbf{E} \begin{pmatrix} x_r \\ y_r \\ 1 \end{pmatrix} = 0 \quad \text{mit } \mathbf{E} = \mathbf{R}_l \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -b \\ 0 & b & 0 \end{bmatrix} \mathbf{R}_r^T \quad (2)$$

worin $\mathbf{R}_l, \mathbf{R}_r$ die Rotationsmatrizen der linken und rechten Kamera gegenüber dem basisfesten Weltkoordinatensystem bezeichnen und die entsprechenden Rotationswinkel aus Abb. 3 beinhalten [11]. Für eine hinreichende Menge an Korrespondenzen erlaubt die Epipolarbedingung die Bestimmung der extrinsischen Parameter bis auf einen Maßstab b und einen frei wählbaren Nickwinkel. Ein wesentlicher Vorteil der Anwendung dieser Bedingung liegt in der Entkopplung der Kalibrierung von der 3d Rekonstruktion. Außerdem garantiert die zeitgleiche Aufnahme der beiden Bilder die identische Weltposition auch bewegter Objektpunkte. In der Praxis ist das Gleichungssystem jedoch meist schlecht konditioniert, so dass weitere Bedingungen erforderlich sind. Diese können in Form von Korrespondenzen in zeitlicher Richtung als Trifokaltensor [6], [9] oder durch Bündelausgleich eingeführt werden. Dabei ist zu beachten, dass zusätzlich zu den oben genannten Parametern der extrinsischen Orientierung die rotatorische und translatorische Bewegung des eigenen Fahrzeugs $\mathbf{R}(k), \mathbf{t}(k)$ mit sechs weiteren Freiheitsgraden je Bildpaar zu bestimmen ist (Abb. 4).

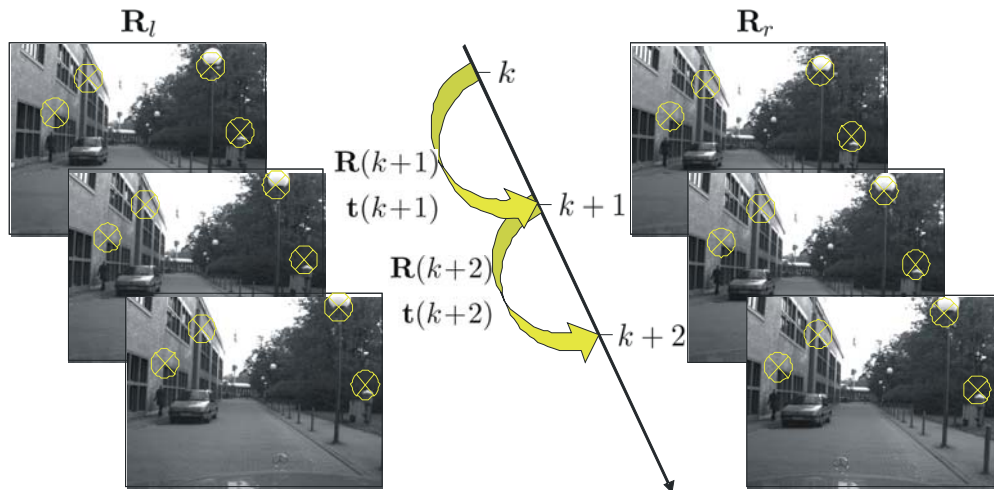


Abb. 4: Korrespondenzen zur Selbstkalibrierung

Darüber hinaus lässt sich die Kalibrierung von der 3d Rekonstruktion nicht länger entkoppeln, so dass für jeden Punkt der realen Welt ein zusätzlicher Tiefenparameter zu schätzen ist. Schließlich beruhen sämtliche Beobachtungsgleichungen auf der Annahme, dass die beobachtete Welt ein starrer Körper ist. Durch in der statischen Umgebung unabhängig bewegte Bildinhalte entstehen Korrespondenzen in aufeinanderfolgenden Aufnahmen, die dieser Annahme nicht genügen und die entsprechend durch robuste Schätzverfahren zu eliminieren sind. Durch gleichzeitige Verwendung der Epipolarbedingung und Bündelausgleich über längere Sequenzen lässt sich eine Selbstkalibrierung erreichen, welche eine 3d Tiefenrekonstruktion mit einer relativen Standardunsicherheit kleiner als 2,5% erzielt [4].

Neben der Kompensation der Orientierungsdrift ermöglicht die beschriebene Selbstkalibrierung die Verwendung der in Abb. 5 dargestellten aktiven Kameraplattform. Durch individuelle motorische Drehung der außen montierten Stereokameraköpfe lässt sich ein Erfassungswinkel von nahezu 180° überblicken. Dabei kann in unterschiedlichen Fahrsituationen zwischen einer selbstkalibrierenden stereoskopischen Wahrnehmung mit einem Erfassungswinkel von 45° und einer monoskopischen Wahrnehmung mit entsprechend größerem Erfassungswinkel variiert werden.

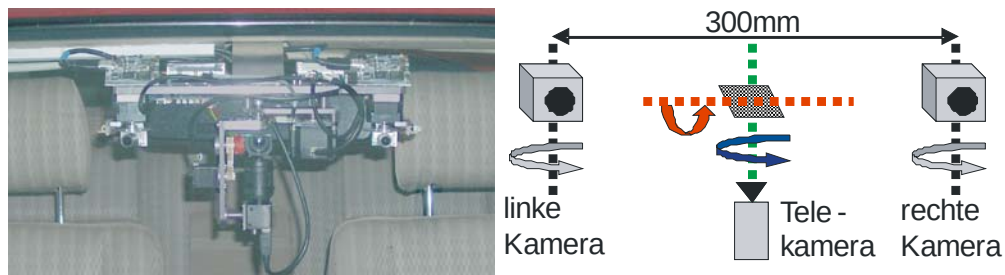


Abb. 5: Aktive Kameraplattform

4. Urban Challenge

Seit 2004 treibt die Darpa universitäre und industrielle amerikanische Forschung im Bereich autonomer Automobile durch Wettbewerbe voran. Während in der 2004 und 2005 ausgetragenen *Grand Challenge* statische Umgebungen autonom zu befahren waren [17], leistete der am 3. November 2007 in Victorville, CA, USA ausgetragene *Urban Challenge* Wettbewerb einen Schritt hin zu dynamischen Verkehrsumgebungen. Dazu wurden im Finale alle Teilnehmer gleichzeitig miteinander und mit Stuntfahrern in ein Vororten nachempfundenes Straßennetz geschickt. Oberste Priorität kam der Vermeidung von Kollisionen während der Ausführung verschiedener Fahraufgaben zu. Die auszuführenden Manöver beinhalteten Überholen, Einfädeln in den fließenden Verkehr, 180° -Wende und Einparken. Dabei waren Verkehrsregeln zu befolgen, wie z. B. die Vorfahrtbeachtung an Kreuzungen.

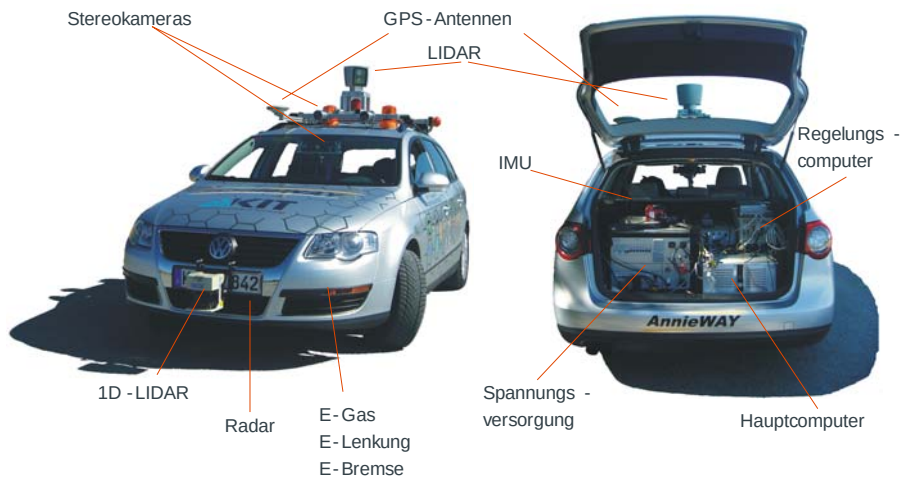


Abb. 6: Hardware Aufbau des autonomen Automobils *AnnieWAY*

Abb. 6 zeigt den Aufbau des von der Universität und dem Forschungszentrum Karlsruhe mit der Technischen Universität und der Universität der Bundeswehr München eingebrachten Fahrzeugs *AnnieWAY* [8]. Der auf dem Dach angebrachte Lidarsensor erzielt mit 64 übereinander liegenden Sichtstrahlen, die 10 mal je Sekunde vollständig rotieren, eine Rundumsicht des Fahrzeugumfeldes mit über einer Million 3d Punkte je Sekunde. Abb. 7 zeigt beispielhaft Lidardaten aus denen eine Objektarte extrahiert wird, welche Information über die befahrbaren Bereiche der Umgebung bereitstellt. Zusätzlich zur beschriebenen aktiven Kameraplattform wurde eine starre Stereoanordnung auf dem Dach montiert. Wie beim menschlichen Vorbild kommt optischen Sensoren damit eine maßgebliche Rolle in der Umgebungserfassung zu.



Abb. 7: Laserdaten zur Bestimmung der Objektkarte

Als weitere Sensorik ist ein DGPS-Empfänger eingebaut, der durch Fusion mit der Information der Inertialsensorik die Position des Fahrzeugs mit Genauigkeiten im Zentimeterbereich bestimmt. Als Datenbasis ist eine digitale Straßenkarte vorhanden.

Durch Datenfusion wird diese Informationsfülle ganzheitlich analysiert und zunächst ein mentales dreidimensionales geometrisches Modell der Fahrumgebung erstellt. Dieses Modell wird laufend in einer Wissensdatenbasis aktualisiert aus der dann durch einen Zustandsautomaten unter Berücksichtigung der aktuellen Fahraufgabe kollisionsfreies Verhalten generiert wird.

Neben sieben vom Veranstalter geförderten Teams gelang zwei weiteren amerikanischen Universitäten, sowie mit der Technischen Universität Braunschweig und AnnieWAY zwei deutschen Teams der Einzug ins Finale. In Abb. 8 sind einige Situationen dargestellt, die AnnieWAY im Finale zu bewältigen hatte.



Abb. 8: Verschiedene Situationen, aus dem Finale der Urban Challenge: Linksabbiegen, Spurwechsel, Kreuzung

Die superponierten dunklen Linien zeigen vom Veranstalter gegebene digitale Karten. Die hellen Linien zeigen die Trajektorie des Fahrzeugs. Das Fahrzeug blieb im Finale kollisionsfrei, der Rechner verfiel jedoch in einer Softwareschleife, so dass das Fahrzeug innerhalb einer Mission stehen blieb und aus dem Rennen genommen wurde. Der Wettbewerb wurde von geförderten amerikanischen Universitätsteams gewonnen, geführt von der CMU und gefolgt von Stanford und Virginia Tech. Der Wettbewerb hat vornehmlich in den USA die universitäre Forschung, deren industrielle Förderung und die öffentliche Wahrnehmung im Bereich Autonomes Fahren in vorbildlicher Weise gefördert.

5. Kognitive Automobile

Im Sonderforschungsbereich (SFB) Transregio *Kognitive Automobile* haben sich Wissenschaftler der Universität, des Forschungszentrums und des Fraunhofer IITB in Karlsruhe sowie der Technischen Universität und der Universität der Bundeswehr in München miteinander vernetzt. Übergeordnete Themenstellungen sind die systematische und interdisziplinäre Erforschung der maschinellen Kognition mobiler Systeme als Grundlage maschinellen Handelns und die Entwicklung einer wissenschaftlichen Theorie maschineller Kognition. Dabei werden die Schwerpunkte in die Bereiche *Wissensrepräsentation*, *Sensorielle Wahrnehmung*, *Situationsinterpretation*, *maschinelle Inferenz*, *Verifikation* und *Lernen* gelegt. Die Tragfähigkeit entwickelter Verfahren wird exemplarisch dadurch aufgezeigt, dass das Verhalten von Automobilen im Straßenverkehr erfasst, verstanden und automatisch generiert wird. Das Kognitive Automobil ist dabei sowohl zu individuellem als auch zu kooperativem Wahrnehmen und Handeln fähig.

Abb. 9 zeigt exemplarisch das Nutzenpotenzial durch maschinelle Wahrnehmung und Kommunikation für den Straßenverkehr. Über eine Erweiterung des eigenen Sichthorizonts hinaus bildet eine abgestimmte Wahrnehmung der aktuellen Verkehrssituation die Grundlage kooperativen Fahrverhaltens [7], [14]. Mit Hilfe von sechs industriell unterstützten Erprobungsfahrzeugen (darunter das oben beschriebene AnnieWAY)

können die theoretisch abgeleiteten Erkenntnisse nach simulativer Verifikation experimentell unterfüttert und validiert werden.

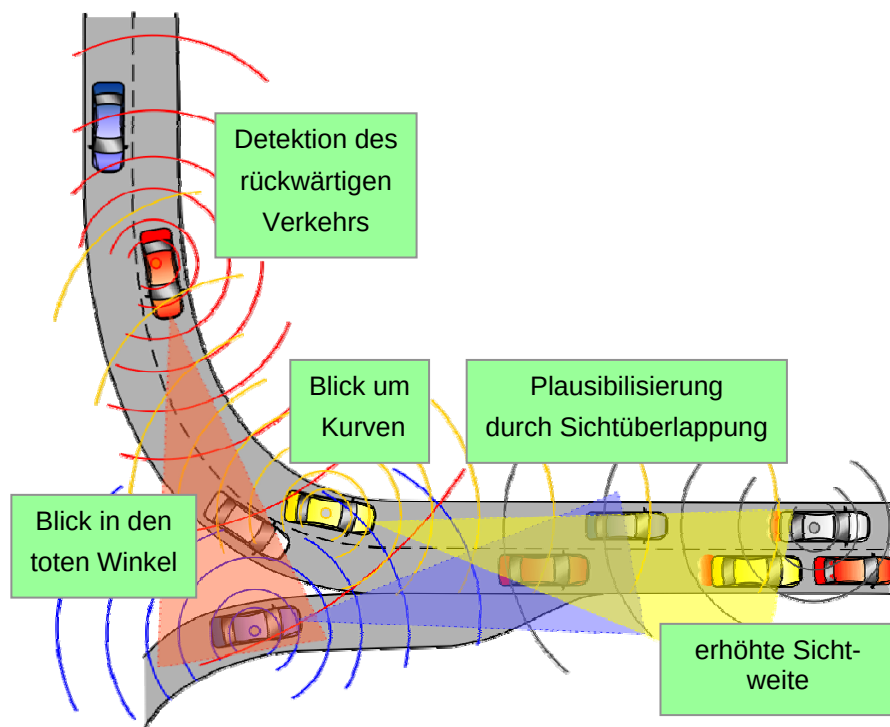


Abb. 9: Die Kombination von Umfeldwahrnehmung und Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation erschließt Kognitiven Automobilen das Potenzial kooperativer Wahrnehmung und kooperativen Verhaltens

Neben der bereits im vorherigen Abschnitt skizzierten Ermittlung geometrischer Fahrumgebungsinformation werden Möglichkeiten zur Interpretation der Fahrumgebung und der Verkehrssituation untersucht. Die so entstehende Wissensrepräsentation umfasst neben metrischer Information auch durch Schlussfolgern gewonnene begriffliche Information, wie z. B. „Das Fahrzeug rechts vor mir möchte auf meine Spur einscheren“. Aus der aktuellen Verkehrssituation wird schließlich ein geeignetes Fahrverhalten in Form eines räumlich-zeitlichen Soll-Korridors für das Kognitive Automobil abgeleitet. Die Verhaltensentscheidung orientiert sich dabei an explizit vorgegebenen Zielen, Werten (einschl. Verkehrsregeln) und Gütemaßen, sowie am Missionsplan, den eigenen dynamischen Fähigkeiten des Fahrzeugs und der durch das jeweilige Verhalten erwarteten Sicherheit [15].

6. Zusammenfassung und Ausblick

Optische Umgebungserfassung bildet einen Schlüssel zur erfolgreichen Realisierung von Fahrerassistenzfunktionen, mit denen Automobile neuartige Fähigkeiten erhalten. Mittelfristiges Ziel ist dabei eine qualitative Verbesserung der Fahrzeugsicherheit und der Effizienz des Straßenverkehrs. Am Anfang der Verarbeitungskette steht die Rekonstruktion der 3d Geometrie der Fahrumgebung durch Analyse von Punktkorrespondenzen einer selbstkalibrierenden Kameraplattform. Daneben bieten rundum scannde Lasersensoren durch die direkte Messung der 3d Geometrie attraktive Möglichkeiten, so dass eine diversitäre Wahrnehmung entsteht. Mit der Ausrichtung mehrerer *Challenges* hat die US Darpa erfolgreich universitäre Ressourcen und industrielles Sponsoring auf automatisches Fahren gelenkt und die Selektion ausgereifter Verfahren vorangetrieben. Dabei gelang mehreren Teams das unbemannte Befahren erster Vorstädten nachempfundenen Straßennetzen im gemischten Verkehr. Der SFB Transreigo *Kognitive Automobile* widmet sich langfristig ausgerichteter Methodenerforschung für die Situationswahrnehmung, Verhaltensentscheidung und –ausführung. Dabei werden Wahrnehmung und Verhaltensgenerierung kooperativ mit anderen Verkehrsteilnehmern abgestimmt.

Danksagung

Teile der berichteten Arbeiten werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG unterstützt. Mein Dank gilt der DFG sowie den beteiligten Partnern für die fruchtbare Zusammenarbeit im Rahmen des SFB Transreigo 28 *Kognitive Automobile* und des Urban Challenge Teams *AnnieWAY*.

Literatur

- [1] Abraham, S.: *Kamera-Kalibrierung und metrische Auswertung monokularer Bildfolgen*. Shaker Verlag Aachen, 2000, Dissertation, Universität Bonn.
- [2] Bähring, D.; Simon, S.; Niehsen, W.; Stiller, C.: *Detection of close cut-in and overtaking vehicles for driver assistance based on planar parallax*. In: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Las Vegas, NV, USA, Juni 2005, S. 289–294
- [3] Bay H.; Tuytelaars T.; van Gool L.: *SURF: Speeded up robust Features*. In: Proc. European Conference on Computer Vision, 2006
- [4] Dang, T.: *Kontinuierliche Selbstkalibrierung von Stereokameras*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2007, Schriftenreihe Institut für Mess- und Regelungstechnik, Nr. 8, Dissertation, Universität Karlsruhe (TH).
- [5] Dang, T.; Hoffmann, C.; Stiller, C.: *Visuelle mobile Wahrnehmung durch Fusion von Disparität und Verschiebung*. In: Maurer, M.; Stiller, C. (Hrsg.): *Fahrerassistenzsysteme mit maschineller Wahrnehmung*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2005, Kapitel 2, S. 21–42

- [6] Förstner, W.: *On weighting and choosing constraints for optimally reconstructing the geometry of image triplets*. In Proc. ECCV, Bd. 2, 2000, S. 669–684
- [7] Frese, C.; Beyerer, J.; Zimmer, P.: *Cooperation of cars and formation of cooperative groups*. In: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Juni 2007, S. 227–232
- [8] Goebel, M.; Färber, G.: *A real-time-capable hard- and software architecture for joint image and knowledge processing in cognitive automobiles*. In: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Juni 2007, S. 734–739.
- [9] Hartley, R.; Zisserman, A.: *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press, 2002.
- [10] Jähne, B.: *Digitale Bildverarbeitung*, Springer-Verlag, 1997
- [11] Longuet-Higgins, H.C.: *A computer algorithm for reconstructing a scene from two projections*. Nature 293, 1981, Sep., S. 133–135
- [12] Lowe D.G.: *Object Recognition from Local Scale-Invariant Features*. In: Proc. Intl. Conference on Computer Vision, Corfu, 1999, S. 1150–1157
- [13] Lucas B.D.; Kanade T.: *An iterative image registration technique with an application to stereo vision*. In: Proc. Imaging understanding workshop, 1981, S. 121–130
- [14] Nagel, R.; Eichler, S.; Eberspächer, J.: *Intelligent wireless communication for future autonomous and cognitive automobiles*. In: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Juni 2007, S. 716–721
- [15] Stiller, C.; Färber, G.; Kammel, S.: *Cooperative Cognitive Automobiles*. In: Proc. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Istanbul, Juni 2007, S. 215–220
- [16] Stiller, C.; Konrad, J.: *Estimating Motion in Image Sequences - A tutorial on modeling and computation in 2D motion*. IEEE Signal Processing Magazine, 1999, 7 & 9, S. 70–91 & 116–117
- [17] Thrun, S.; Montemerlo, M.; Dahlkamp, H.; Stavens, D.; Aron, A.; Diebel, J.; Fong, P.; Gale, J.; Halpenny, M.; Hoffmann G. K.; Lau, G.K.; Oakley, C.; Palatucci, M.; Pratt, V.; Stang, P.; Strohband, S.; Dupont, C.; Jendrossek, L.-E.; Koenen, C.; Markey, C.; Rummel, C.; Niekerk, J.v.; Jensen, E.; Alessandrini, P.; Bradski, G.; Davies, B.; Ettinger, S.; Kaehler, A.; Nefian, A.; Mahoney, P.: *Stanley: The robot that won the DARPA Grand Challenge*. Journal of Field Robotics, 23(9), 2006, S. 661–692

Anschrift des Verfassers:

C. STILLER

Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

76131 Karlsruhe, stiller@mrt.uka.de, Telefon +49 721 6082325