

Bewegungssteuerung autonomer Fahrzeuge mit neuronalen Feldern

Uwe Handmann*

Institut für Neuroinformatik, Ruhr Universität Bochum, 44780 Bochum

Zusammenfassung Fahrerassistenzsysteme werden eingesetzt, um dem Fahrer eines Kraftfahrzeugs Handlungsabläufe abzunehmen. Diese Handlungsabläufe werden definiert durch eine Aufgabenstellung, die vom Fahrer an das Fahrerassistenzsystem übergeben oder systembedingt gelöst wird. Bei komplexen Fahrerassistenzsystemen ist an eine autonome Navigation im Straßenverkehr gedacht. Es wird ein neues Verfahren vorgestellt, welches eine Bewegungssteuerung eines autonomen Fahrzeugs durchführen kann. Es werden der Lenkwinkel und die Geschwindigkeit beeinflusst. Für diese Aufgabe wird ein dynamischer Ansatz aus dem Bereich der neuronalen Felder gewählt. Relevante Attribute für den Fahrtverlauf auf unterschiedlichem Abstraktionsniveau können dabei einfach (additiv) verarbeitet werden.

Schlüsselworte Bewegungssteuerung, autonome Fahrzeuge, neuronale Felder

1 Einleitung

Der Zustand eines Kraftfahrzeugs in der Umwelt kann durch die aktuelle Position, die Geschwindigkeit und die Bewegungsrichtung beschrieben werden. Soll ein Fahrzeug durch Einsatz eines Assistenzsystems autonom im Straßenverkehr navigieren, müssen diese Zustandsgrößen durch das System manipulierbar sein. Die Navigation ist dabei abhängig von einer Aufgabenstellung und von Randbedingungen, die durch die Umwelt gegeben sind. Neben sich langsam ändernden Elementen der Umwelt, wie dem Straßentyp und den Sichtverhältnissen, beeinflussen weitere Verkehrsteilnehmer und andere Hindernisse (im folgenden Objekte) das gewünschte Fahrverhalten [9].

Wird die Umgebung eines Fahrzeugs mit einer Kamera observiert, muß das Bilddatenmaterial unter Einsatz von Bildverarbeitungsalgorithmen verarbeitet und eine Extraktion von relevanten Objekten und deren Attributen durchgeführt werden. Ansätze hierfür bieten [8, 3, 10]. Werden verschiedene Sensoren zur Observierung der Umwelt eingesetzt, ist eine Fusion der verarbeiteten Daten notwendig. Das Problem der Datenfusion behandeln [5, 4, 12]. Soll mit Hilfe der extrahierten Daten ein Assistenzsystem realisiert werden, muß aus diesen ein der Aufgabenstellung adäquates Verhalten umgesetzt werden. Verschiedene Architekturansätze werden dafür diskutiert [6, 15, 13, 11].

In dem vorliegenden Artikel wird aufbauend auf die referenzierten Arbeiten ein Verfahren vorgestellt, das die Bewegung eines autonomen Kraftfahrzeugs, über die Steuerung des Lenkwinkels und der Geschwindigkeit (Verhaltensvariablen [14]), beeinflusst. Die Basis für das realisierte Verfahren bilden zwei eindimensionale neuronale Felder [1]. Dieses Vorgehen ist einerseits biologisch motiviert [16]. Andererseits kann durch Einsatz einer nichtlinearen Wechselwirkung bei geeigneter Voraktivierung die Stabilität des Verfahrens auch bei stark differierenden Eingangsdaten garantiert werden [1].

* Uwe.Handmann@neuroinformatik.ruhr-uni-bochum.de

2 Neuronale Felddynamik

Neuronale Felder sind nichtlineare dynamische Systeme. Sie wurden als Verhaltensmodelle für die Neurophysiologie cortikaler Prozesse eingeführt [16, 1]. Neuronale Felder gehören zu der Klasse der Integro-Differentialgleichungen. Eine Realisierung eines neuronalen Feldes ist durch einen Ansatz nach *Amari* [1, 2] gegeben. Dieser Feldansatz hat den Vorteil, daß er mathematisch einfach zu beschreiben ist und eine gute Analyse seiner dynamischen Eigenschaften im Betrachtungsraum Γ über der Zeit und dem Ort zuläßt. Die Dynamik des Feldes (auch Amarifeld) ist gegeben durch die nichtlineare dynamische Integro-Differentialgleichung

$$\begin{aligned} \tau \dot{u}(z, t) = & -u(z, t) + h + S(z, t) \\ & + \int_{\Gamma} w(z, z') \varphi(u(z', t)) dz'. \end{aligned} \quad (1)$$

Die erste Zeile in Gleichung 1 beschreibt die lokale Dynamik der Aktivität des Feldes $u(z, t)$ mit $u(z, t) \in \mathbb{R}$ am Ort z mit $z \in \Gamma$ zum Zeitpunkt t mit $t \geq 0$. Die zeitliche Ableitung von $u(z, t)$ ist durch $\dot{u}(z, t)$ gegeben. Die Aktivität des Feldes ändert sich abhängig von einer Zeitkonstanten τ mit $\tau \in \mathbb{R}^+$. Die Variable h entspricht einer konstanten Voraktivierung mit $h = \text{const}$ und $h \in \mathbb{R}$. Das Eingangssignal $S(z, t)$ (der Stimulus) ist ebenfalls abhängig von z und t mit $S(z, t) \in \mathbb{R}$. Es wird additiv in das Feld eingekoppelt. Ohne Stimulus entspricht die Aktivität $u(z, t)$ aller Feldneurone im eingeschwungenen Zustand einem globalen stationären Feld.

Eine biologisch motivierte Wechselwirkung zwischen den Feldneuronen wird durch das Integral in der zweiten Zeile der Gleichung 1 beschrieben. Dabei führt die Aktivierungsfunktion $\varphi(u(z, t))$ eine nichtlineare Transformation der Aktivität $u(z, t)$ der einzelnen Feldneurone durch. Sie ist eine stetig differenzierbare Funktion, mit

$$\lim_{u \rightarrow -\infty} \varphi(u) = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{u \rightarrow \infty} \varphi(u) = 1.$$

oder eine Sprungfunktion. Das Amarifeld ist homogen [7]. Folglich kann das Integral als Faltung zwischen dem Wechselwirkungskern $w(z, z')$ mit $w(z, z') = w(z - z')$, $(z - z') \in \Gamma$, $w \in \mathbb{R}$ und $\varphi(u(z', t))$ angesehen werden. Durch die Faltung findet eine Interaktion zwischen einzelnen Neuronen statt. Der Wechselwirkungskern w mit $w(z - z') = w(\Delta z)$ ist nicht abhängig von t . Häufig wird für w eine Funktion vom Typ eines *mexican hat* mit der symmetrischen Eigenschaft $w(\Delta z) = w(-\Delta z)$ verwendet:

$$f_{MH}(z) = c_0 \cdot e^{-\frac{z^2}{2\sigma_0^2}} - c_1 \cdot e^{-\frac{z^2}{2\sigma_1^2}}. \quad (2)$$

Die Variablen c_0 , c_1 , σ_0 und σ_1 beschreiben dabei die Breite des Huts sowie die exzitatorischen und inhibitorischen Anteile des Funktionsverlaufs. Mögliche Lösungen des Amarifeldes im eingeschwungenen Zustand sind [1] (Aktivierungsfunktion entspricht dabei einer Sprungfunktion):

1. 0-Lösung, für $u(z, t) \leq 0 \quad \forall z \in \Gamma$
2. ∞ -Lösung, für $u(z, t) > 0 \quad \forall z \in \Gamma$
3. a -Lösung, für eine lokal begrenzte Aktivität $R(u) = (z_1, z_2)$ der Länge $a = z_2 - z_1$.

Um eine einfache Einkopplung der extrahierten Daten zu gewährleisten wird das Datenmaterial in Abhängigkeit der Verhaltensvariablen kodiert.

3 Datenmaterial

Das Verhalten eines Fahrzeugs kann nur in Abhängigkeit der aus der Umgebung extrahierten Daten beeinflusst werden, um einen sicheren und komfortablen Fahrtverlauf zu gewährleisten. Die Daten werden dabei mit Hilfe von Sensoren und einer entsprechenden Sensordatenverarbeitung bereitgestellt, wie beispielsweise in [12, 10, 11] gezeigt. Das autonome Navigieren eines Kraftfahrzeugs im Straßenverkehr bedingt, daß Position, Bewegungsrichtung und Relativgeschwindigkeit anderer Objekte beurteilt werden können, um eine unfallfreie Steuerung des Fahrzeugs zu garantieren. Die Funktionstüchtigkeit des implementierten Verfahrens muß anhand dieser Größen an verschiedenen Verkehrsszenarien getestet werden. Dabei sind kritische Szenen, welche hohe Anforderungen an das Verfahren stellen, von besonderem Interesse. Solche Szenen beinhalten jedoch ein großes Gefahrenpotential für die Verkehrsteilnehmer. Durch die Entwicklung einer Simulationsumgebung, die die Umsetzung kritischer Szenen erlaubt, ist es möglich, die Position, Bewegungsrichtung und Relativgeschwindigkeit von Objekten zu beeinflussen und das realisierte Verfahren ohne Gefahr für andere zu testen. In Abbildung 1 sind Ergebnisbilder der Simulation gegeben.

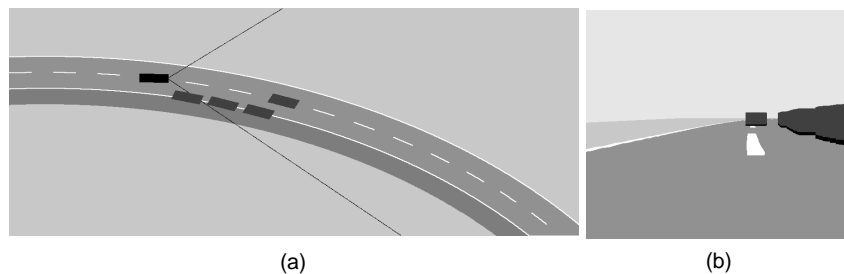


Abbildung 1. Simuliertes Sensordatenmaterial für eine Straßenverkehrsszene bei einer leichten Rechtskurve mit parkenden Autos am rechten Fahrbahnrand. Die Fahrtrichtung des Trägerfahrzeugs (schwarz) ist von links nach rechts. (a) Vogelperspektive und (b) Kamerabild für einen Öffnungswinkel von 90° .

Abbildung 1a stellt ein Bild einer definierten Szene aus der Vogelperspektive dar. In dieser Szene fährt das autonome Trägerfahrzeug (schwarz, mit angedeutetem Kamerasensor) auf einer zweispurigen Straße in einer Rechtskurve an parkenden Fahrzeugen vorbei und folgt einem weiteren Fahrzeug. Abbildung 1b zeigt ein Ergebnisbild des simulierten Kameradatenmaterials für eine Videokamera (technische Daten: Sensorchipfläche: 36mm^2 , Höhe: 1.2m , Öffnungswinkel von 90° und Auslenkung der Kamera aus der Fahrbahnparallelen Ebene: 4° in Richtung Fahrbahn).

Die aus den simulierten Sensordaten berechneten Größen, die dem entwickelten Verfahren der Bewegungssteuerung als Eingangsgrößen zur Verfügung stehen, sind die relative Distanz $d_O(\psi)$ zu den Objekten O , sowie deren Relativgeschwindigkeiten $v_{xO}(\psi)$

und $v_{yO}(\psi)$ in x - und y -Richtung. Dabei bezeichnet die y -Koordinate die Fahrtrichtung und die x -Koordinate die Senkrechte auf y (Abbildung 2).

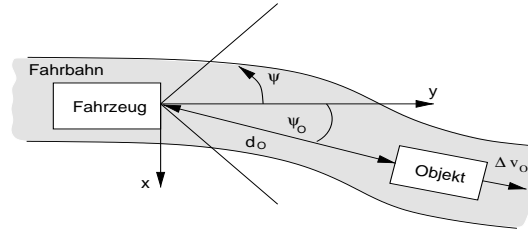


Abbildung 2. Koordinatensystem der betrachteten Zustandsgrößen. Die y -Koordinate bezeichnet die Fahrtrichtung und die x -Koordinate die Senkrechte auf y . Der Winkel ψ bemisst den von dem Sensor abgedeckten Winkelbereich.

In Abbildung 3 sind diese Größen der in Abbildung 1 dargestellten Szene in Abhängigkeit von der Winkelposition ψ aufgetragen. Dabei bemisst der Winkel ψ den von dem Sensor abgedeckten Winkelbereich. Es werden vier Fahrzeuge im Winkelbereich ψ von $\psi \simeq -9^\circ$ bis $\psi \simeq -45^\circ$ bei unterschiedlicher Distanz (Abbildung 3a) erkannt. Drei am rechten Fahrbahnrand parkende Autos werden erkannt. Das vorherfahrende Fahrzeug fährt mit nahezu gleicher Geschwindigkeit wie das Trägerfahrzeug (Abbildung 3b,c).

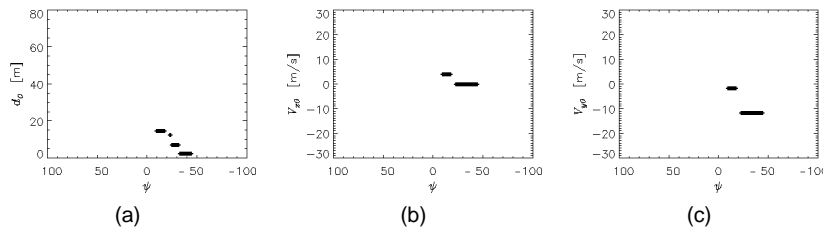


Abbildung 3. Sensordatenmaterial für eine Straßenverkehrsszene bei einer leichten Rechtskurve mit einem führenden Fahrzeug und parkenden Autos am rechten Fahrbahnrand. (a) Distanz der Objekte, (b) Relativgeschwindigkeit in x und (c) Relativgeschwindigkeit in y .

Die von der Simulation bereitgestellten Daten werden für eine neuronale Bewegungssteuerung als Eingangsgrößen genutzt.

4 Felddynamiken

Für die Realisierung des Verfahrens zur Bewegungssteuerung mit einem Amarifeldansatz ist es notwendig, die vorhandenen Attribute der Objekte vorzuverarbeiten, so daß die Ergebnisse additiv über die Stimuli S in die neuronalen Felder für die Lenkwinkel- und Geschwindigkeitssteuerung eingekoppelt werden können. Es stehen dabei die objektbezogenen Attribute der relativen Distanz $d_O(\psi)$ sowie der Relativgeschwindigkeit $v_{xO}(\psi)$ und $v_{yO}(\psi)$ in x - und y -Richtung zur Verfügung. Aus den Objekten kann

ein führendes Fahrzeug mit $v_{xF}(\psi)$, $v_{yF}(\psi)$ und $d_F(\psi)$ extrahiert werden. Weiterhin ist aus dem Kamerabild der Fahrspurverlauf bekannt.

4.1 Lenkwinkel

Aus den gegebenen Daten lassen sich Stimuli berechnen, die additiv in das neuronale Feld der Lenkwinkelsteuerung einkoppeln und damit die gewünschte Lenkwinkeländerung beeinflussen. Diese Stimuli beinhalten:

- Das Gefahrenpotential $O(\psi, t)$ für jedes detektierte Objekt in Abhängigkeit von ψ und t . Dabei wird die Relativgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Distanz berücksichtigt. Der Stimulus des Gefahrenpotentials hat inhibitorischen Charakter um eine Kollisionsvermeidung durchzuführen.
- Den Fahrspurverlauf $L(\psi, t)$, welcher bei einer Referenzdistanz in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ausgewertet wird. Der resultierende Stimulus hat einen exzitatorischen und einen inhibitorischen Anteil, um einen hemmenden Einfluß der Bereiche außerhalb der Fahrbahn zu erreichen.
- Den Einfluß eines führenden Fahrzeugs $\psi D(\psi, t)$, um in Standardsituationen eine Folgefahrt realisieren zu können. Der resultierende Stimulus hat exzitatorischen Charakter.

Die resultierenden Stimuli werden durch eine Faltung

$$S_i(\psi, t) = \int_{-\gamma}^{\gamma} f_{MH,i}(\psi - \psi') \cdot i(\psi', t) d\psi' + \eta_i$$

mit einem *mexican hat* nach Gleichung 2 berechnet, wobei die notwendigen Gewichtsfaktoren entsprechend den beschriebenen Anforderungen gewählt werden. Der Index i beschreibt hierbei die zugehörigen Stimuli der Größen O , L und ψD . Die Variable η definiert einen Offsetparameter. Der resultierende Gesamtstimulus des Feldes mit der Aktivität $u(\psi, t)$ zum Zeitpunkt t folgt aus

$$S_\psi(\psi, t) = -S_O(\psi, t) + S_L(\psi, t) + S_{\psi D}(\psi, t) \quad (3)$$

und die Felddynamik ergibt sich nach Gleichung 1 zu

$$\tau_\psi \dot{u}_\psi(\psi, t) = -u_\psi(\psi, t) + h_\psi + S_\psi(\psi, t) + \int_{\Gamma_\psi} w_\psi(\psi, \psi') \phi_\psi(u(\psi', t)) d\psi' \quad (4)$$

4.2 Geschwindigkeit

Das neuronale Feld, welches die Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs steuert, wird durch die aktuelle Eigengeschwindigkeit, die durch Verkehrsregeln geforderte Geschwindigkeit sowie die Geschwindigkeit des vorherfahrenden Fahrzeugs beeinflusst. Dabei ergeben sich zwei Stimuli:

- Der Stimulus $S_R(\Delta v)$ wird aufgrund von Geschwindigkeitsbeschränkungen, bzw. gewünschter oder geforderter Geschwindigkeit berechnet (z. B. Durchfahrt enger Kurven). Eine Faltung mit einer Funktion nach Gleichung 2 vom Typ eines *mexican hat* bestimmt den Einflußbereich des Stimulus im neuronalen Feld.

- Der Stimulus $S_{vD}(\Delta v)$ berücksichtigt die Relativgeschwindigkeit und die Distanz des führenden Fahrzeugs in Form einer *mexican hat*-Funktion nach Gleichung 2.

Beide Stimuli haben exzitatorische und inhibitorische Eigenschaften, welche abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit, der Distanz und der Relativgeschwindigkeit zum vorherfahrenden Fahrzeug sind. Der Gesamtstimulus des Feldes entspricht dabei der additiven Kopplung der Einzelstimuli, mit

$$S_v(\Delta v, t) = S_R(\Delta v, t) + S_{vD}(\Delta v, t) \quad . \quad (5)$$

Die Geschwindigkeitsänderung des autonomen Fahrzeugs wird aus der Felddynamik des neuronalen Geschwindigkeitsfeldes mit der Aktivität $u(\Delta v, t)$ bestimmt.

Es ergibt sich nach Gleichung 1 eine Felddynamik der Art

$$\tau_v \dot{u}_v(\Delta v, t) = -u_v(\Delta v, t) + h_v + S_v(\Delta v, t) + \int_{\Gamma_v} w_v(\Delta v, \Delta v') \phi_v(u(\Delta v', t)) d\Delta v'. \quad (6)$$

4.3 Feldvariablen und Auswertung

Die Zeitkonstanten τ_ψ und τ_v der Felder nach den Gleichungen 6 und 4 werden in Abhängigkeit der gewünschten Dynamik des zugehörigen Feldes gewählt. Die Voraktivierungen h_ψ und h_v haben für beide Felder den Wert -1 . Als Wechselwirkung wird jeweils ein Wechselwirkungskern von Typ eines *mexican hat* und als Nichtlinearität eine Funktion der Art $\phi(u) = \frac{1}{2}(1 + \tanh(u))$ eingesetzt.

Bei der Auswertung der neuronalen Felder bestimmt die Position der a -Lösung mit der maximalen Feldaktivität mit

$$N_\psi(t) = \arg \max_{\psi} u_\psi(\psi, t) \quad (7)$$

und

$$N_v(t) = \arg \max_v u_v(\Delta v, t) \quad (8)$$

die gewünschte Änderung der Verhaltensvariablen Lenkwinkel und Geschwindigkeit. Dabei werden aus Sicherheits- und physikalischen Randbedingungen maximale Änderungen $N_{\psi, max}$ und $N_{v, max}$ sowie Gewichtungsfaktoren α_{N_ψ} und α_{N_v} berücksichtigt. Es ergibt sich daraus eine Änderung der Verhaltensvariablen ΔW und ΔV zu

$$\Delta W = \text{sign}(N_\psi) \cdot \alpha_{N_\psi} \min(|N_\psi|, N_{\psi, max}) \quad (9)$$

und

$$\Delta V = \text{sign}(N_v) \cdot \alpha_{N_v} \min(|N_v|, N_{v, max}). \quad (10)$$

5 Ergebnisse

Um das Verhalten des vorgestellten Verfahrens zur Bewegungssteuerung zu validieren wurden verschiedene Szenarien getestet. Die ausgewählten Szenarien beinhalten Anforderungen an typische Basisverhalten (z. B. Hindernisvermeidung, Folgefahren und Spurhalten) von Kraftfahrzeugen im Stadtverkehr.

In den Abbildungen 4 und 5 sind Ergebnisse der Lenkwinkelsteuerung und der Geschwindigkeitssteuerung für eine Szene dargestellt. Es sind jeweils die Feldaktivität des zugehörigen Amarifeldes $u(\psi, t_0)$ und $u(\Delta v, t_0)$ zu einem Zeitpunkt t_0 mit den jeweiligen Stimuli $\tilde{S}_O(\psi, t)$, $\tilde{S}_L(\psi, t)$ und $\tilde{S}_{\psi D}(\psi, t)$ sowie $\tilde{S}_R(\Delta v, t)$ und $\tilde{S}_{vD}(\Delta v, t)$ dargestellt (mit verschobener Nulllinie eingezeichnet). Weiterhin ist der zeitliche Verlauf der jeweiligen Feldaktivität $u(\psi)$ und $u(\Delta v)$ sowie die Änderung der zugehörigen Verhaltensvariablen ΔW und V aufgetragen.

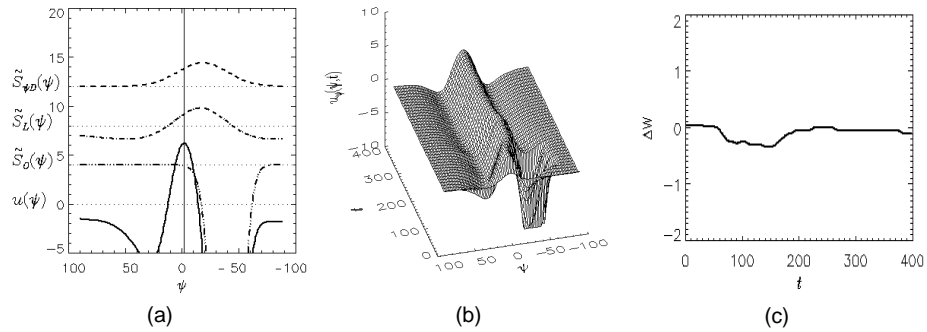


Abbildung4. (a) Aktivität des Lenkwinkelfeldes zu einem Zeitpunkt t_0 mit zugehörigen Stimuli sowie (b) Feldaktivität über der Zeit. (c) durchgeführte Lenkwinkeländerung über der Zeit.

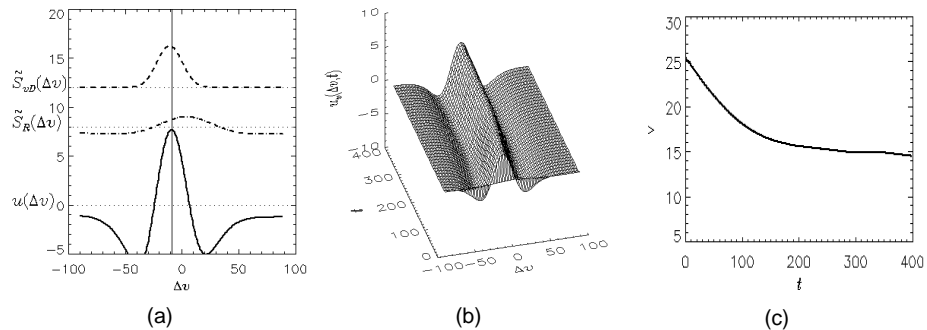


Abbildung5. (a) Aktivität des Geschwindigkeitsfeldes zu einem Zeitpunkt t_0 mit zugehörigen Stimuli sowie (b) Feldaktivität über der Zeit. (c) Geschwindigkeit über der Zeit.

Zum Zeitpunkt t_0 wird von dem realisierten Verfahren eine Lenkwinkeländerung von $\psi \simeq 1^\circ$ und eine Geschwindigkeitsänderung von $\Delta v \simeq -9m/s$ gefordert. Betrachtet man den Verlauf der Felder und der resultierenden Verhaltensvariablen über der Zeit, so ist das Durchfahren einer Rechtskurve, mit einem Ausweichmanöver im Bereich der parkenden Fahrzeuge zu erkennen. Während diesem Vorgang wird die Geschwindigkeit des autonomen Fahrzeugs dem führenden Fahrzeug angepaßt (Bremsvorgang).

6 Zusammenfassung

In diesem Artikel wurde ein Verfahren zur Bewegungssteuerung von autonomen Fahrzeugen vorgestellt. Dabei werden die Verhaltensvariablen Lenkwinkel und Geschwindigkeit mit Hilfe zweier eindimensionaler neuronaler Felder gesteuert. Die Tragfähigkeit des Verfahrens wurde an mehreren typischen Szenen getestet und die Ergebnisse anhand einer Sequenz verdeutlicht.

Literatur

1. S. Amari. Dynamics of pattern formation in lateral-inhibition type neural fields. *Biological Cybernetics*, 27:77–87, 1977.
2. S.-I. Amari. Field Theory of Self-Organizing Neural Nets. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13:741–748, 1983.
3. M. Bertozzi and A. Broggi. GOLD: a Parallel Real-Time Stereo Vision System for Generic Obstacle and Lane Detection. In IEEE, editor, *IEEE Transactions on Image Processing*, volume 7(1), pages 62–81, 1998.
4. R. R. Brooks and S. S. Ivengar. *Multi-Sensor Fusion*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.
5. B. V. Dasarathy. *Decision Fusion*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, 1994.
6. E.D. Dickmanns et al. Vehicles capable of dynamic vision. In *15th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, pages 1–16, Nagoya, Japan, 1997.
7. M.A. Giese. *Dynamic Neural Field Theory for Motion Perception*. Kluwer, Norwell, USA, 1999.
8. S. Goerzig and U. Franke. ANTS - Intelligent Vision in Urban Traffic. In *IV'98, IEEE International Conference on Intelligent Vehicles 1998*, pages 545–549, Stuttgart, Germany, 1998. IEEE.
9. U. Handmann. *Neuronale Informationsverarbeitung für Fahrerassistenzsysteme*. PhD thesis, Institut für Neuroinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Germany, 2000.
10. U. Handmann, T. Kalinke, C. Tzomakas, M. Werner, and W. von Seelen. An Image Processing System for Driver Assistance. *Image and Vision Computing (Elsevier)*, 18(5):367 – 376, 2000.
11. U. Handmann, I. Leefken, C. Tzomakas, and W. von Seelen. A Flexible Architecture for Driver Assistance. In *SPIE's International Symposium on Intelligent Systems and Advanced Manufacturing 1999 (Mobile Robots and Autonomous Systems), Proceedings of SPIE Vol. 3838*, pages 2 – 11, Boston, 1999. SPIE.
12. U. Handmann, G. Lorenz, T. Schnitger, and W. von Seelen. Fusion of Different Sensors and Algorithms for Segmentation. In *IV'98, IEEE International Conference on Intelligent Vehicles 1998*, pages 499 – 504, Stuttgart, Germany, 1998. IEEE.
13. M. Rossi, M. Aste, R. Cattoni, and B. Caprile. The IRST Driver's Assistance System. Technical Report 9611-01, Istituto per la Ricerca Scientifica e Tecnologica, Povo, Trento, Italy, 1996.
14. G. Schönner and J.A.S. Kelso. Dynamic pattern generation in behavioral and neural systems. *Science*, 239:1513–1520, 1988.
15. V. v. Holt and S. Baten. Perceptual architecture for a vision system of autonomous vehicles. In *IV'98, IEEE International Conference on Intelligent Vehicles 1998*, pages 539 – 544, Stuttgart, Germany, 1998. IEEE.
16. H.R. Willson and J.D. Cowan. A mathematical theory of the functional dynamics of cortical and thalamic nervous tissue. *Kybernetik*, 13:55–80, 1973.