Entwurf und Implementierung einer kognitiven Steuereinheit für ein Echtzeit-MIMO-SONAR-System

Bastian Kaulen[1], Alexej Namenas[1], Gerhard Schmidt[1]

[1] *Digitale Signalverarbeitung und Systemtheorie, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Email: {bk, aln, gus}@tf.uni-kiel.de*

Kurzfassung

Kognition ist ein weiterer großer Schritt in modernen RADAR- und SONAR-Systemen. Da das Hauptaugenmerk an Veröffentlichungen der letzten Jahre in diesem Gebiet auf RADAR-Systemen lag, ist die Anwendung in SONAR-Systemen noch relativ selten. Außerdem sind viele der Veröffentlichungen rein theoretischer Natur und motivieren lediglich die Kognition in solchen Systemen. Ziel dieser Arbeit ist daher die konkrete Implementierung einer kognitiven Steuereinheit in ein Echtzeit-MIMO-SONAR-System. Zuerst wird der Begriff der Kognition erläutert und anschließend auf die verschiedenen Anforderungen eines modernen SONAR-Systems bezogen. Anschließend wird ein vorhandenes Echtzeit-MIMO-SONAR-System vorgestellt und um eine kognitive Steuereinheit erweitert. Umgesetzt wurde der kognitive Entscheidungsprozess durch eine Steuereinheit, welche die Sendesignalverarbeitung an die Umwelt anpasst. Basis dieser Anpassung sind Rückschlüsse auf der Basis der empfangenen Signale. Dazu wurden als Eingangsparameter die Position der Ziele, die entfernungsabhängige Richtung und die zuvor ausgewählten Gebiete gewählt. Diese Informationsquellen werden auf eine einheitliche und vergleichbare Darstellung abstrahiert, anschließend gewichtet und addiert. Anhand dieser Darstellung wird dann eine Entscheidung getroffen, welches Gebiet im nächsten Ping illuminiert werden soll. Als letzten Schritt werden dann die Parameter des SONAR-Systems auf das neue Gebiet angepasst.

Kognition

Kognition ist ein Begriff aus der Biologie und beschäftigt sich mit der Theorie wie Menschen und Tiere ihre Umwelt wahrnehmen, erkennen und dementsprechend interagieren. Nach [1] wird Kognition durch die Abbildung 1 beschrieben.

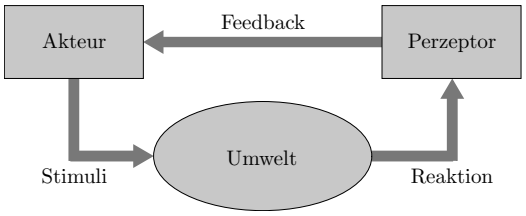

Abbildung 1: Kognition als Begriff der Biologie nach [1].

Ein Akteur sendet bekannte Stimuli in die Außenwelt, die mit der Umwelt interagieren. Die Reaktion wird vom Perzeptor wahrgenommen und erlaubt, mit Vergleich zwischen dem gesendeten Stimuli und der empfangenen Reflexion, Rückschlüsse auf die Umwelt. Durch das Feedback zwischen Perzeptor und Akteur werden die nächsten auszusendenden Stimuli von neuem an die gewonnen Umgebungsinformationen angepasst.

Entwurf einer kognitiven Steuereinheit

Die Idee einer kognitiven Steuereinheit wurde maßgeblich im Bereich von RADAR vorangetrieben [2][3]. Aufgrund der Parallelen zwischen RADAR und SONAR können diese allerdings auch ohne große Anpassungen auf SONAR-Systeme angewendet werden [4].
Die Steuereinheit eines kognitiven Systems wird zwischen Akteur und Perzeptor im Feedback-Kanal eingebettet (Abb. 2). Sie nutzt Informationen aus der Empfangssignalverarbeitung und entscheidet basierend darauf. Diese Entscheidungen münden in der Adaption der Sendesignalverarbeitung für den nachfolgenden Ping.

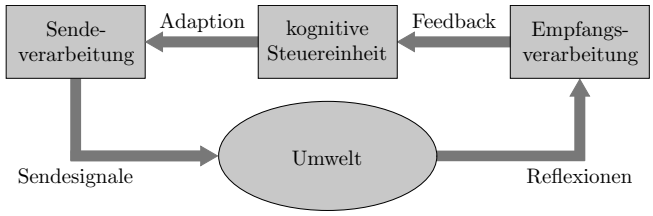

Abbildung 2: Kognitive Steuereinheit als Bindeglied zwischen Empfangs- und Sendesignalverarbeitung.

Die Umgebung des SONAR-Systems wird pingweise bewertet und der Bereich mit dem größten Informationspotential ausgewertet. Anschließend wird dieses Areal explizit durch konventionelles Sende- und Empfangsbeamforming illuminiert. Auf diese Art und Weise wird ein hoher Informationsgehalt über dieses Gebiet gesammelt und ausgewertet.
Die kognitive Steuereinheit stellt in einem SONAR-System sowohl den Anfang als auch das Ende des Signalflusses dar. Dies ist in der Abbildung 3 dargestellt.

Entscheidungskarte

Die sogenannte Entscheidungskarte $\boldsymbol{E}^{(p)}$ bildet ein zentrales Element der entworfenen kognitiven Steuereinheit. Motiviert ist diese durch das Problem der unterschiedlichen Arten an Informationsquellen eines SONAR-Systems. Sie beschreibt den physischen Raum um das SONAR-System zum Ping p und weist jedem Punkt einen Wert zu, der den potentiellen Informationsgehalt dieses Ortes repräsentiert. Auf diese Art und Weise können für das SONAR-System interessante Gebiete bewertet und verglichen werden.
Das Gebiet um das SONAR-System wird dabei in Ku-

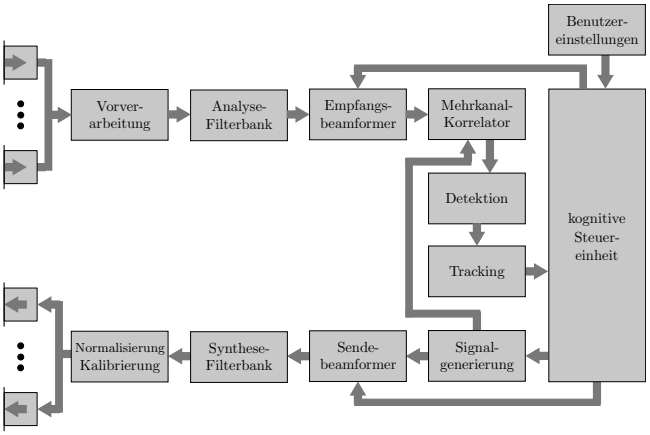

Abbildung 3: Kognitive Steuereinheit in einem SONAR-System.

gelkoordinaten beschrieben, welche durch die Variablen r als Entfernung, φ als Azimutwinkel und θ als Polarwinkel definiert und in $\boldsymbol{r} = [r, \varphi, \theta]^{\mathrm{T}}$ zusammengefasst sind. Aufgrund der vereinfachten Darstellung sind die nachfolgenden Abbildungen lediglich für den zweidimensionalen Fall von $\theta = 90°$ visualisiert.

Implementierung der kognitiven Steuereinheit

Die kognitive Steuereinheit ist in drei Module aufgeteilt: das Extraktionsmodul, das Entscheidungsmodul und das Parameteranpassungsmodul (Abb. 4).
Die Steuereinheit zieht Schlüsse auf der Basis von einem internen und zwei externen Eingängen. Zu den externen Informationsquellen gehören zum einen die möglichen Zielpositionen eines Trackers und zum anderen vom Benutzer vorgegebene Parameter. Innerhalb der Steuereinheit gibt es einen Feedback-Kanal, der sicherstellt, dass vorangegangene Entscheidungen mit in den nächsten Entscheidungsprozess einfließen. Alle diese Eingänge werden im Extraktionsmodul zu einer Entscheidungskarte zusammengefasst. Anschließend wird eine Entscheidung getroffen und alle Einstellungen des SONAR-Systems an diese adaptiert.

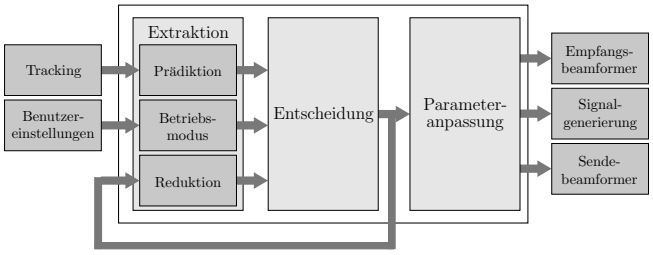

Abbildung 4: Aufbau der kognitiven Steuereinheit.

Extraktion wichtiger Parameter

Das erste Modul der Steuereinheit ist das Extraktionsmodul, in dem die verschiedenen Eingangsquellen auf Entscheidungskarten abbildet werden. Da diese Abbildung für jede Eingangsquelle individuell ist, existiert für jede ein eigenes Submodul. Jedes dieser Submodule generiert eine Entscheidungskarte, die anschließend gewichtet und summiert werden. Auf diese Art lässt sich die kognitive Steuereinheit leicht um neue Informationsquellen erweitern.

Prädiktion

Das Prädiktionsmodul basiert direkt auf Daten eines Trackers des SONAR-Systems. Aus diesem werden mit der Hilfe eines linearen Kalman-Filters die potenziellen Positionen der N Ziele prädiziert. Als Bewegungsmodell ist das Nearly-Constant-Velocity-Modell aus [5] gewählt. Neben der geschätzten Position im nächsten Ping $\hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{pos},k}^{(p+1)}$ lassen sich aus den Kovarianzmatrizen $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{pred},k}$ des linearen Kalman-Filters für jeden Track k Normalverteilungen erzeugen, die mit in die Entscheidungskarte $E_{\mathrm{pred}}^{(p)}(\boldsymbol{r})$ des Prädiktionsmoduls einbezogen werden. Diese können vom Benutzer mit einem Faktor $0 \leq \alpha_{\mathrm{pred},k} \leq 1$ gewichtet werden, wenn ein Ziel von besonderem Interesse ist oder ausgeblendet werden soll.

$$E_{\mathrm{pred}}^{(p)}(\boldsymbol{r}) = \sum_{k=0}^{K-1} \alpha_{\mathrm{pred},k} \cdot \exp\Bigg(-\frac{1}{2}(\boldsymbol{r} - \hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{pos},k}^{(p+1)})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}_{\mathrm{pred},k}^{-1} \cdot (\boldsymbol{r} - \hat{\boldsymbol{r}}_{\mathrm{pos},k}^{(p+1)}) \Bigg). \quad (1)$$

In Gl. (1) ist zu beachten, dass der Normierungsterm der klassischen Normalverteilung fehlt. Dies bewirkt, dass jede Normalverteilung das Maximum von Eins besitzt. Der Grund hierfür liegt letztendlich in der Entscheidungsfindung des Entscheidungsmoduls. Dafür werden die Maxima in der Entscheidungskarte gesucht. Sollte die Position eines Ziels sehr genau bekannt sein, würde die normierte Normalverteilung sehr schmal und spitz zusammenlaufen. Durch den Normierungsterm würde ein sehr hoher Wert für das Maximum folgen und bei der Suche nach diesem dementsprechend häufig dominieren. Durch die Vernachlässigung dieses Terms ist das Maximum jeder Normalverteilung auf Eins beschränkt und bringt durch das nicht normierte Volumen mehr oder weniger Gewicht in die Entscheidungskarte ein. Damit tragen unsicherere Ziele mehr zur Entscheidung bei und werden dementsprechend häufiger ausgewählt als sicherere Ziele.
In Abbildung 5 ist die eine Entscheidungskarte des Prädiktionsmoduls für drei Ziele dargestellt. In diesem Fall sind drei Normalverteilungen zu erkennen, welche die Unsicherheiten der Zielpositionen darstellen.

Benutzergewichtung

Da bei realen Anwendungen nicht unbedingt alle Gebiete um das SONAR-System von gleichem Interesse sind, besteht die Möglichkeit einer benutzergesteuerten Gewichtung bestimmter Areale. Dazu wird eine Entscheidungskarte generiert, welche die vom Benutzer gewünschten ortsabhängigen Gewichte besitzt. Diese kann dabei sowohl positiv sein und Gebiete hervorheben, als auch negativ sein und Areale unterdrücken. Auf diese Art und Weise können komplette Gebiete ausgeblendet werden.
In der Abbildung 6 ist als Beispiel das Gebiet in unmittelbaren Nähe um das SONAR-System mit einem Offset versehen und fällt mit steigender Distanz r linear zur

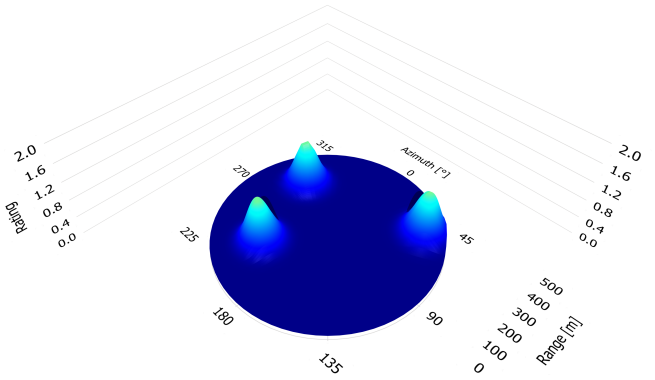

Abbildung 5: Entscheidungskarte $E^{(p)}_{\text{pred}}(\boldsymbol{r})$ des Prädiktionsmoduls.

maximalen Distanz $r_{\max}$ ab:

$$E^{(p)}_{\text{off}}(\boldsymbol{r}) = -\alpha_{\text{off}} \frac{r}{r_{\max}} + 1. \tag{2}$$

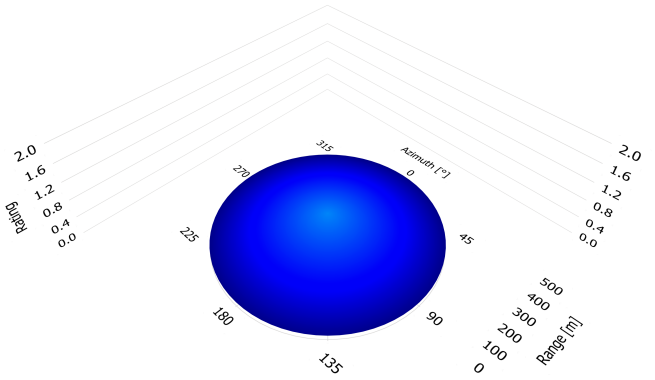

Abbildung 6: Entscheidungskarte $E^{(p)}_{\text{off}}(\boldsymbol{r})$ der Benutzergewichtung.

Die hier verwendeten Funktionen sind allerdings stark von den Einsatzgebieten des SONAR-Systemen abhängig und können vom Benutzer vorgegeben werden. Andere Einstellungen wären zum Beispiel eine zusätzliche Gewichtung in Fahrtrichtung oder auch das Ausblenden von festen bekannten Objekten wie Hafenmauern.

Reduktion

Das Reduktionsmodul besitzt keinen externen Eingang, sondern bezieht vorherige Entscheidungen der kognitiven Steuereinheit in die aktuelle Entscheidung ein. Motiviert ist dieses Modul mit der Annahme, dass sich neue Informationen in vorher beobachteten Gebieten nicht instantan ändern. Damit stellt dieses Modul das Gedächtnis der Steuereinheit dar.
Umgesetzt wird dies durch das Speichern der Entscheidungskarte $E^{(p-1)}_{\text{red}}(\boldsymbol{r})$ des Reduktionsmoduls des vorherigen Pings. Diese wird mit einem Faktor $0 \leq \alpha_{\text{red}} < 1$ multipliziert und stellt sicher, dass vorangegangene Entscheidungen weiter reduziert werden und somit eine immer geringere Rolle bei der aktuellen Entscheidung spielen. Wird ein Gebiet ausgewählt, das beim nächsten Ping von besonderem Interesse ist, wird dieses als negativ gewichtete Normalverteilung um den Mittelpunkt des vorher ausgewählten Bereichs $\boldsymbol{r}^{(p-1)}_{\text{sel}}$ auf die Entscheidungskarte addiert. Die Kovarianzmatrix $\boldsymbol{\Sigma}_{\text{red}}$ ist durch die Größe des im vorherigen Ping ausgewählten Bereichs vorgegeben. Auf diese Art und Weise wird der potentielle Informationsgehalt von Arealen, über die in den letzten Pings Informationen gesammelt wurden, reduziert:

$$E^{(p)}_{\text{red}}(\boldsymbol{r}) = \alpha_{\text{red}}\, E^{(p-1)}_{\text{red}}(\boldsymbol{r}) - \exp\left(-\frac{1}{2}(\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}^{(p-1)}_{\text{sel}})^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Sigma}^{-1}_{\text{red}} \cdot (\boldsymbol{r} - \boldsymbol{r}^{(p-1)}_{\text{sel}}) \right). \tag{3}$$

In der Abbildung 7 ist die Entscheidungskarte des Reduktionsmoduls für drei Ziele abgebildet. Es lassen sich drei Normalverteilungen erkennen, die unterschiedliche Amplituden aufweisen. Dies begründet sich in der Tatsache, dass die obere Normalverteilung vor längerer Zeit ausgewählt wurde und daher am häufigsten mit dem Reduktionsfaktor α_{red} gewichtet wurde. Die rechte Normalverteilung ist das ausgewählte Gebiet des letzten Pings und daher lediglich einmal mit einem Faktor reduziert. Die linke Normalverteilung wurde zwischen der oberen und der rechten Normalverteilung erzeugt.

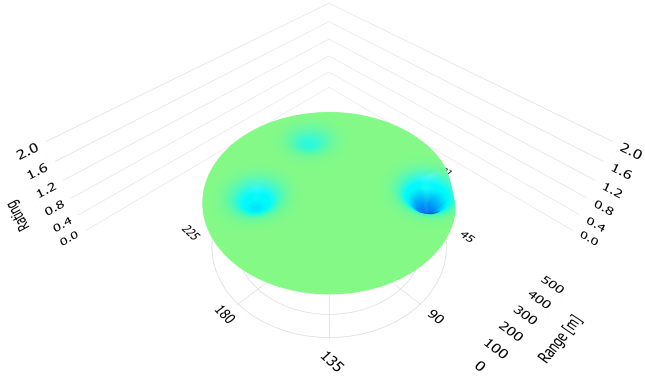

Abbildung 7: Entscheidungskarte $E^{(p)}_{\text{red}}(\boldsymbol{r})$ des Reduktionsmoduls.

Entscheidungsfindung

Nachdem im Extraktionsmoduls alle Entscheidungskarten erzeugt wurden, werden diese mit den individuellen Gewichten w_{pred}, w_{off} und w_{red} multipliziert und zu einer finalen Entscheidungskarte $E^{(p)}_{\text{ext}}(\boldsymbol{r})$ summiert:

$$E^{(p)}_{\text{ext}}(\boldsymbol{r}) = w_{\text{pred}} E^{(p)}_{\text{pred}}(\boldsymbol{r}) + w_{\text{off}} E^{(p)}_{\text{off}}(\boldsymbol{r}) + w_{\text{red}} E^{(p)}_{\text{red}}(\boldsymbol{r}). \tag{4}$$

So können einzelne Eingangsquellen besonders hervorgehoben oder gedämpft werden. Die finale Entscheidungskarte $E^{(p)}_{\text{ext}}$ in Abbildung 8 bildet die Grundlage des Entscheidungsfindungsmoduls.

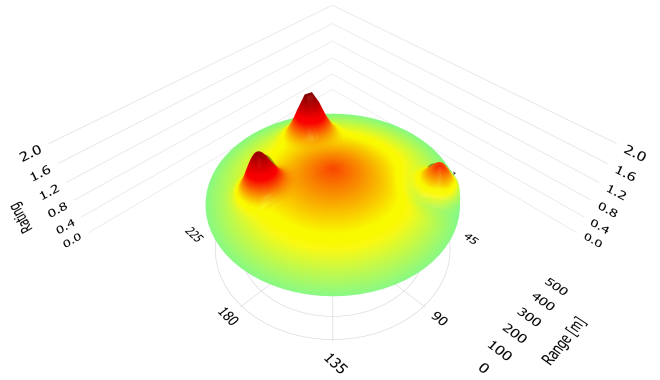

Abbildung 8: Finale Entscheidungskarte $E_{\text{ext}}^{(p)}(\boldsymbol{r})$ als Summe aller Entscheidungskarten.

Da die Werte in $E_{\text{ext}}^{(p)}(\boldsymbol{r})$ den potenziellen Informationsgehalt über den Ort abbilden, kann das Gebiet von größtem Interesse mit einer Suche nach dem Maximum realisiert und unter verschiedenen Gesichtspunkten gestaltet werden:

1. **Festes Volumen um das Maximum**
   Es wird das Maximum der Entscheidungskarte gesucht und darum ein Volumen gewählt. Dieses wird durch den Benutzer festgelegt und setzt sich aus einer Entfernungs-, einer Azimut- und einer Polarwinkelkomponente zusammen.

2. **Prozentuales Volumen um das Maximum**
   Es wird das Maximum der Entscheidungskarte gesucht und darum mittels Floodfill-Algorithmus ein Volumen gewählt. Der Grenzwert ist dabei ein vom Benutzer vorgegebener Prozentwert des Maximums.

3. **Prozentuales Volumen um jedes Ziel**
   Es wird für jede Zielposition mittels Floodfill-Algorithmus und einer prozentualen Grenze das Volumen bestimmt und darauf basierend die Zielposition mit dem maximalen Volumen gewählt.

Parameteranpassung

Das Parameteranpassungsmodul dient als Verbindung zwischen der kognitiven Steuereinheit und dem klassischem SONAR-System. In diesem werden die Einstellungen des SONAR-Systems auf den ausgewählten Bereich abgestimmt. Dazu gehört sowohl die Anpassung der Sendesignallänge als auch das Adaptieren der Sende- und Empfangsbeamformer.

Zusammenfassung

Es wurde der Entwurf und die Implementierung einer kognitiven Steuereinheit in ein Echtzeit-MIMO-SONAR-System vorgestellt. Dies wurde über die Adaption von Kognition auf ein SONAR-System mittels der Entwicklung einer kognitiven Steuereinheit motiviert. Diese reagiert mit den Informationen vorheriger Pings auf die Umwelt und wählt auf Basis dieser das Gebiet mit dem höchsten potentiellen Informationsgehalt aus. Als Grundlage der Entscheidung dienten drei verschiedene Quellen, die durch das Prinzip der Entscheidungskarte beliebig erweitert werden können.
Die Entscheidungen werden durch die Suche eines Maximums der Entscheidungskarte getroffen. Es wurden drei verschiedene Arten aufgeführt dieses zu bestimmen.
Im letzten Modul werden die getroffenen Entscheidungen als Parameter in das SONAR-System eingebracht und umgesetzt.

Literatur

[1] Ender, J. H. G. & Bruggenwirth, S.: Cognitive radar - enabling techniques for next generation radar systems. 16th International Radar Symposium (IRS) (2015), 3-12

[2] Haykin, S.: Cognitive radar: a way of the future. IEEE Signal Processing Magazine (2006), 23(1):30-40

[3] Guerci, J. R.: Cognitive Radar - The Knowledge-aided Fully Adaptive Approach. Artech House, Norwood, 2010

[4] Kaak, T., Schmidt, G.: An Introduction to Real-time Cognitive SONAR Systems Utilizing Novel MIMO Approaches. DAGA, 2017

[5] Bar-Shalom, Y. & Rong Li, X. & Kirubarajan, T.: Estimation with Applications to Tracking and Navigation - Theory Algorithms and Software. John Wiley & Sons, New York, 2004