



Doctoral Thesis

**The fusion of multiple sources of information in the organization of goal-oriented behavior**

**Author(s):**

Ringwald, Milanka

**Publication Date:**

2009

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005772420> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18234

# **The Fusion of Multiple Sources of Information in the Organization of Goal-Oriented Behavior**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY  
ZURICH

for the degree of  
Doctor of Sciences

presented by  
MILANKA RINGWALD  
M. Sc., University of Niš, Serbia  
born 22 August, 1975  
citizen of Serbia

Thesis committee:  
Prof. Rodney J. Douglas, examiner  
Prof. Paul F. M. J. Verschure, co-examiner  
Dr. Daniel C. Kiper, co-examiner  
Prof. Auke J. Ijspeert, co-examiner

2009

# Abstract

In the fields of machine learning, psychology, and neuroscience, an important question is how multiple sources of sensory information can be integrated to generate structured goal-oriented behavior in the absence of a global frame of reference. Successful machine learning models of foraging suggest that optimal strategies can be achieved by a system in which both sensory integration and selection of allocentric action are governed by Bayesian probabilistic law. However, the required global frame of reference precludes a generalization of these models to the neuronal substrate. On the contrary, the results of behavioral studies on animals suggest that the optimality of behavior can be met without this strong assumption. In the study of the neuronal substrate underlying self-localization and navigation, it is well accepted that, in mammals, the hippocampus plays a crucial role [1, 2]. More specifically, work on hippocampus suggests that egocentric sensory inputs are stored and linked into behavioral episodes along with the allocentric spatial representations, and that the recall of hippocampal behavioral sequences is accompanied by two phenomena: anticipation of the subsequent location and reward. Human brain studies provide another supplementary view on this issue. While these studies provide evidence that the human brain is capable of performing Bayesian inference, they also suggest the existence of two separate cognitive mechanisms: the implicit one, which plays a role in the multi-modal sensory abstraction of categories, and the declarative one, whose role is to delineate the category membership of the sensory input based on verbally expressible rules. This strengthens the idea that the hippocampus, as a part of the declarative mem-

ory systems, processes cortical sensory inputs in a non-Bayesian manner, but the exact mechanisms are still unknown.

To explore the mechanisms of sensory fusion that could facilitate the transformation of egocentric actions into allocentric behavior, we work with simulated robots performing a foraging task in an open arena and in maze environments. This work involves: (1) Augmenting the Distributed Adaptive Control (DAC) [3–5], a self-contained system, that learns sequences of egocentrically defined visual cues and actions leading to goal states, with allocentric cues; (2) Designing two approaches for sensor fusion: *spatial attention* and *spatial integration* employing Bayesian technique; (3) Evaluating the two integration approaches with respect to two biasing mechanisms which model anticipation of the future location and the reward; (4) Generalizing and evaluating two approaches for bimodal sensor fusion; (5) Comparing the performance of the two integration approaches with the performance of the two known machine learning methods.

The key result is that the two integration approaches are complementary, which supports the hypothesis that spatial cognition is a two-stage process in which the probabilistic integration precedes the spatial attention mechanism. In the spatial attention method, the synergy of the two biasing mechanisms facilitate the transformation of egocentrically defined actions into allocentric behavior. However, the performance comparison with machine learning models shows that the two biasing mechanisms are not sufficient to organize a series of recalled actions into optimal foraging behavior. The sub-optimal behavior suggests a need for an additional type of attentional feedback that could act upon the discrepancy between the prediction of the DAC system and the new state observation. Although the DAC system performs about ten percent worse than the two benchmark algorithms, this result is remarkable, since it shows that DAC has the potential to be considered as a complete system that acquires both its input state space and policies of its integration in optimal goal-oriented behavior.

# Zusammenfassung

In den Gebieten des Maschinenlernens, der Psychologie und der Neurowissenschaften stellt die Frage wie unterschiedliche Sinneswahrnehmungen integriert werden können um strukturiertes und zielorientiertes Verhalten ohne das Vorhandensein eines globales Bezugssystems zu erzeugen, eine wichtiges Thema dar.

Erfolgreiche Modelle des Foraging (Nahrungssuche) im Gebiet des Maschinenlernens legen nahe, dass optimale Strategien durch ein System erreicht werden können, in welchem sowohl die Integration als auch die Auswahl allozentrischer Aktionen durch das Bayestheorem der Wahrscheinlichkeitstheorie bestimmt werden. Das hierzu notwendige globale Bezugssystem verhindert jedoch eine Verallgemeinerung dieser Modelle auf biologische Nervensysteme. Verhaltensstudien an Tieren zeigen im Gegensatz dazu, dass optimales Verhalten auch ohne diese starke Annahme erzielt werden kann. In der Erforschung des Nervensystems, welches der Ortsbestimmung und der Orientierung zugrunde liegt, wird allgemein anerkannt, dass der Hippokampus bei Säugetieren eine entscheidende Rolle spielt [1, 2]. Untersuchungen des Hippokampus legen nahe, dass egozentrische Sinneswahrnehmungen im episodischen Gedächtnis zusammen mit allozentrischen Ortsinformationen gespeichert werden, und dass das Abrufen gelernter Verhaltensabläufe von zwei Phänomenen begleitet wird: das Erwarten des nächsten Ortes und des an diesem Ort erfolgenden Gewinns. Studien des menschlichen Gehirns ergänzen diesen Aspekt. Während diese Studien den Beweis dafür liefern, dass das menschliche Gehirn zur Ausführung Bayes'scher Inferenz fähig

ist, legen sie auch das Vorhandensein zweier unterschiedlicher kognitiver Mechanismen nahe: der implizite, der eine Rolle in der multimodalen, sensorischen Abstraktion von Kategorien spielt, und der explizite, dessen Rolle darin besteht die Zugehörigkeit von Sinneswahrnehmungen zu Kategorien basierend auf verbal ausdrückbaren Regeln festzustellen. Dies bestärkt die Idee, dass der Hippokampus, als Teil des deklarativen Gedächtnissystems, Sinneswahrnehmungen in einer nicht-Bayes'schen Weise verarbeitet, wobei die genauen Mechanismen noch unbekannt sind.

Um die Mechanismen der Integration von Sinneswahrnehmungen zu erforschen, die die Umwandlung egozentrischer Aktionen in allozentrisches Verhalten erleichtern könnten, arbeiten wir mit simulierten Robotern, die eine Foraging-Aufgabe in einer offenen Arena und in Labyrinthen durchführen. Diese Arbeit beinhaltet folgendes: (1) Erweiterung des *Distributed Adaptive Control* (DAC)-Systems [3–5] um allozentrische Ortsinformationen. DAC ist ein in sich geschlossenes System, welches die Abfolge der egozentrischen visueller Wahrnehmungen und Aktionen lernt, die zum Ziel führen; (2) Entwurf zweier Ansätze zur Integration von Sinneswahrnehmungen: *Räumliche Aufmerksamkeit* und *Räumliche Integration*, welche die Bayes'sche Inferenz einsetzt; (3) Bewertung der zwei Integrationsansätze mit Bezug auf zwei Steuermechanismen, die das Erwarten des nächsten Ortes und des dortigen Gewinns nachbilden. (4) Generalisierung und Bewertung zweier Ansätze zur Integration von Sinneswahrnehmungen; (5) Vergleich der Effizienz der zwei neuen Integrationsansätze mit zwei anerkannten Methoden aus dem Gebiet der Maschinellen Lernens.

Das Hauptergebnis ist, dass sich die zwei Integrationsansätze ergänzen. Dies stützt die Hypothese, dass räumliche Wahrnehmung ein zweistufiger Prozess ist, in welchem die *Räumliche Integration* der *Räumlichen Aufmerksamkeit* vorausgeht. Bei der Methode der *Räumlichen Aufmerksamkeit* erleichtert die Synergie der beiden Steuermechanismen die Umwandlung egozentrischer Aktionen in allozentrisches Verhalten. Jedoch zeigt der Leistungsvergleich mit Methoden aus dem Gebiet der

Maschinenlernens, dass die zwei Steuermechanismen nicht dazu ausreichen, eine Serie abgerufener Aktionen in optimales Foraging-Verhalten umzuwandeln. Das suboptimale Verhalten legt die Notwendigkeit eines zusätzlichen Steuerungsmechanismus nahe, der die Diskrepanz zwischen der Vorhersage des DAC-Systems und der tatsächlichen Zustandbeobachtung verringern könnte. Obwohl das DAC-System ungefähr zehn Prozent schlechter als die zwei Vergleichsalgorithmen abschneidet, ist dieses Resultat bemerkenswert, da es zeigt, dass DAC das Potenzial hat als komplettes System betrachtet zu werden, welches sowohl ein Modell der Umgebung und die zugehörigen Foraging-Strategien durch optimales, zielorientiertes Verhalten erwirbt.