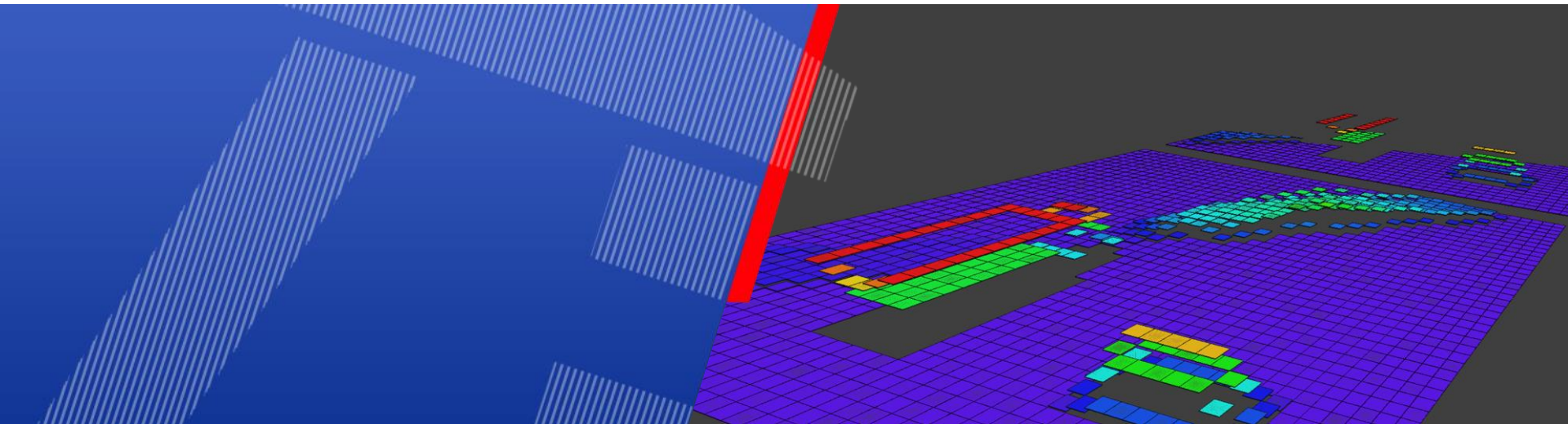


Versatile Spatiotemporal Working Memory for Autonomous Robots



Felix Laufer

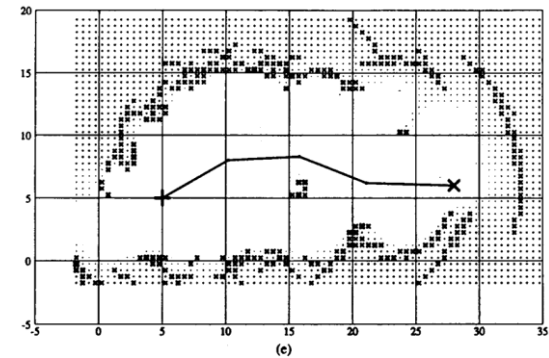
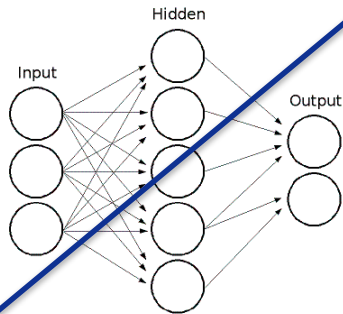
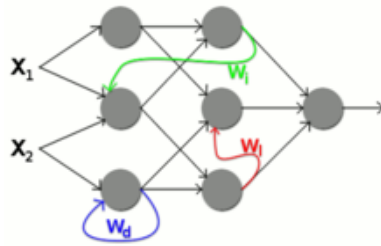
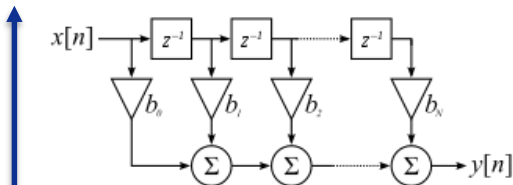
Robotics Research Lab

Department of Computer Science

University of Kaiserslautern, Germany

Was ist ein Gedächtnis?

Zeit



Inhalt

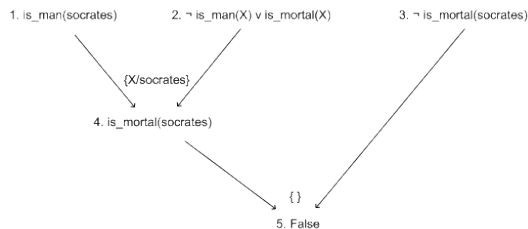
Dimensionen:

- „Zeit und Inhalt“ (Wienke 2010)
- **Robotik:** Zeit, **Raum** und Nutzdaten

Raum

Gedächtnis und Künstliche Intelligenz

- symbolisch
- deduktiv
- scharfe Logik
- vollständige, präzise Information
- technisch:
General Problem Solver,
logische Programmierung,
...
- Langzeitgedächtnis



Intelligentes Verhalten
„Reaktiv++“

(persistent)
Speichern

Wahrnehmen

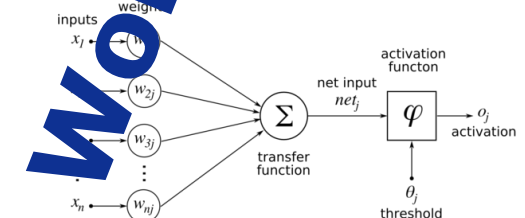
Denken
(Schlussfolgern)

Vergessen

Lernen

Erinnern

- subsymbolisch
- induktiv
- unscharfe Logik
- unvollständige, vage Information
- technisch:
Neuronale Netze,
Neuromorphische Netze,
...
- Kurzzeitgedächtnis



Working Memory

Cognitive Maps Architecture [G. Zolynski]

- ist ein **hierarchisches, datengetriebenes Wahrnehmungsnetzwerk**
- bestehend aus **Verarbeitungsknoten** (*Processing Units*) verknüpft durch Kanten, entlang derer **räumlich, zeitlich und semantisch zusammengehörige Daten** (*Aspects*) fließen

Aspect

- Informationen **eines semantischen Aspekts** der sensorisch wahrnehmbaren Umwelt
- **räumlich und zeitlich** zusammengehörig
Beispiele: {Höhenkarte, radiale Ultraschallabstände, Umgebungstemperatur} zur Zeit t_0

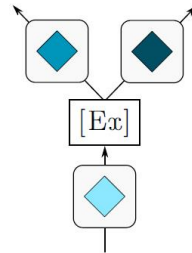
Aspect Maps

- einheitlicher, technischer **Datenspeicher** für **Aspects**
- **0- bis 2-dimensionaler** Unterraum des 3D WKS, parallel zur Horizontalen des WKS
- Daten entstehen durch **Projektion** sensorischer Daten des WKS auf diesen Unterraum
- Warum $\leq 2D$? → kognitive Karten (2.5D), gute Visualisierung, viele 2D-Algorithmen

Cognitive Maps Architecture – Processing Units

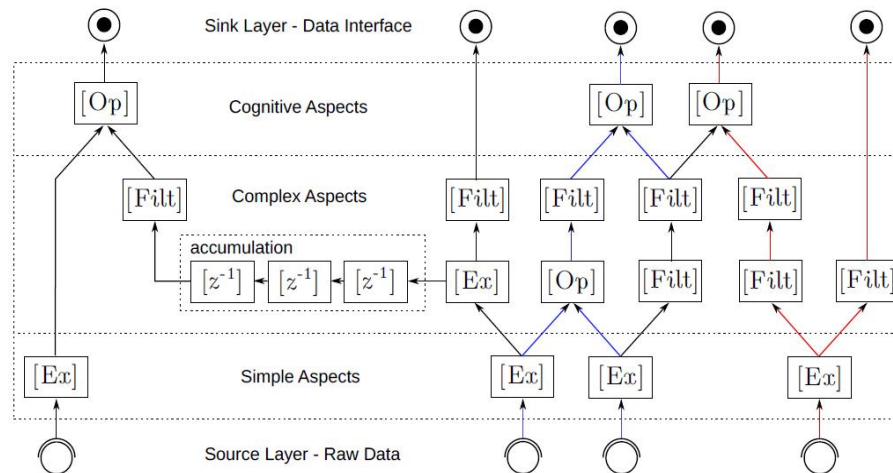
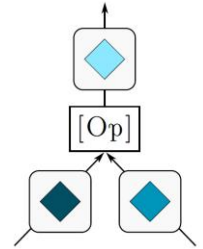
Extractor

- **Extrahiert** Aspects aus Rohdaten
- oder neue Aspects aus bisherigen



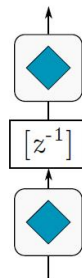
Operation / Combination

- **binäre** Operation, **verknüpft** Aspects **elementweise**
- Bsp.: Addition, Multiplikation



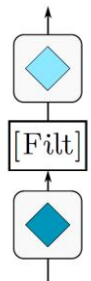
Delay Node

- **verzögert** oder **speichert** um eine Zeiteinheit
- vgl. Signalverarbeitung

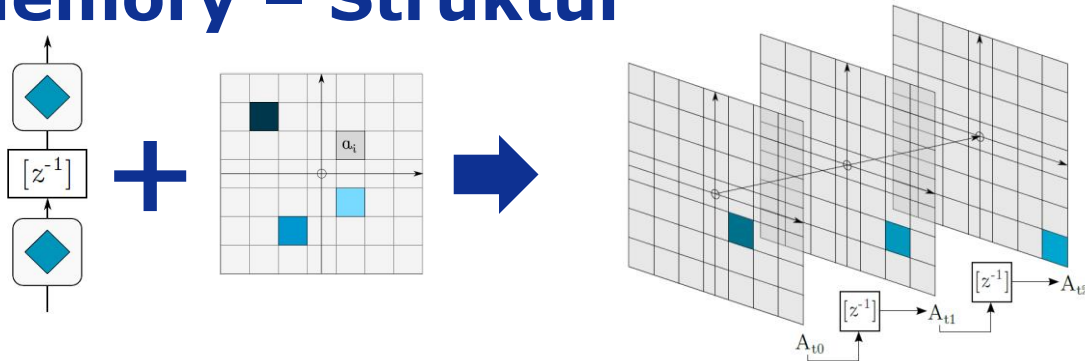


Filter

- **unäre** Operation, wendet eine **räumliche Filterfunktion** an
- typische Bildverarbeitungsfilter
- Bsp.: Weichzeichnen, Konturen



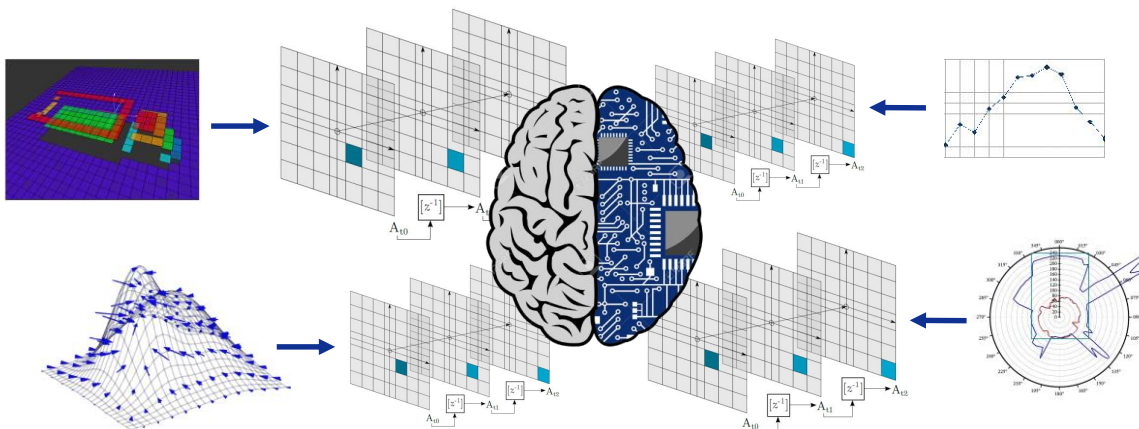
Aspect Memory – Struktur



Aspect Memory := Verkettung verzögerter Aspect Maps

- Einführen einer **expliziten** Zeitachse
- ist ein Block **raumzeitlich** zusammenhängender Information desselben Aspects
- „Netzwerk wird 3-dimensional“ (4D \rightarrow 3D)

(Aspect) Working Memory := Menge von Aspect Memories

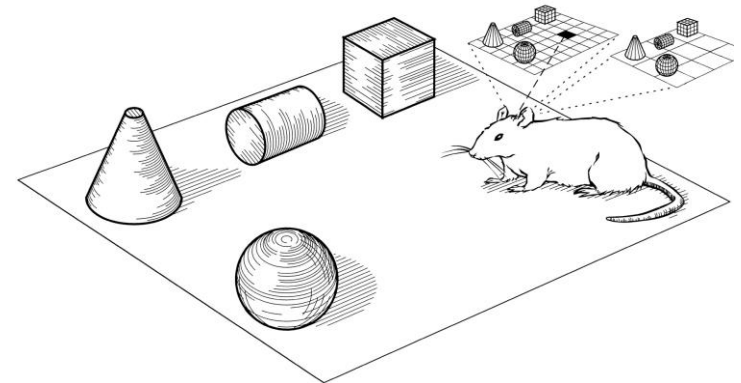
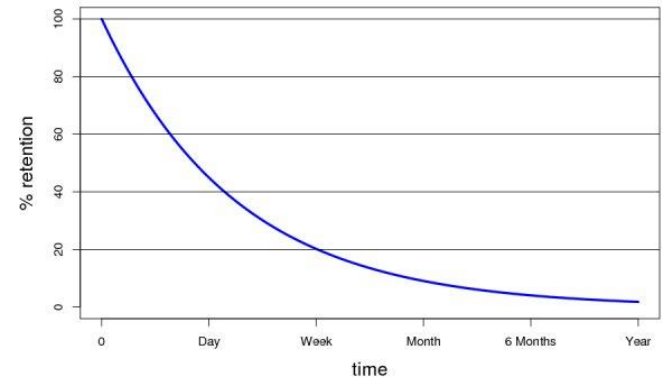


**Vergessen
& Erinnern?**

Vergessen – Motivation

Biologisch

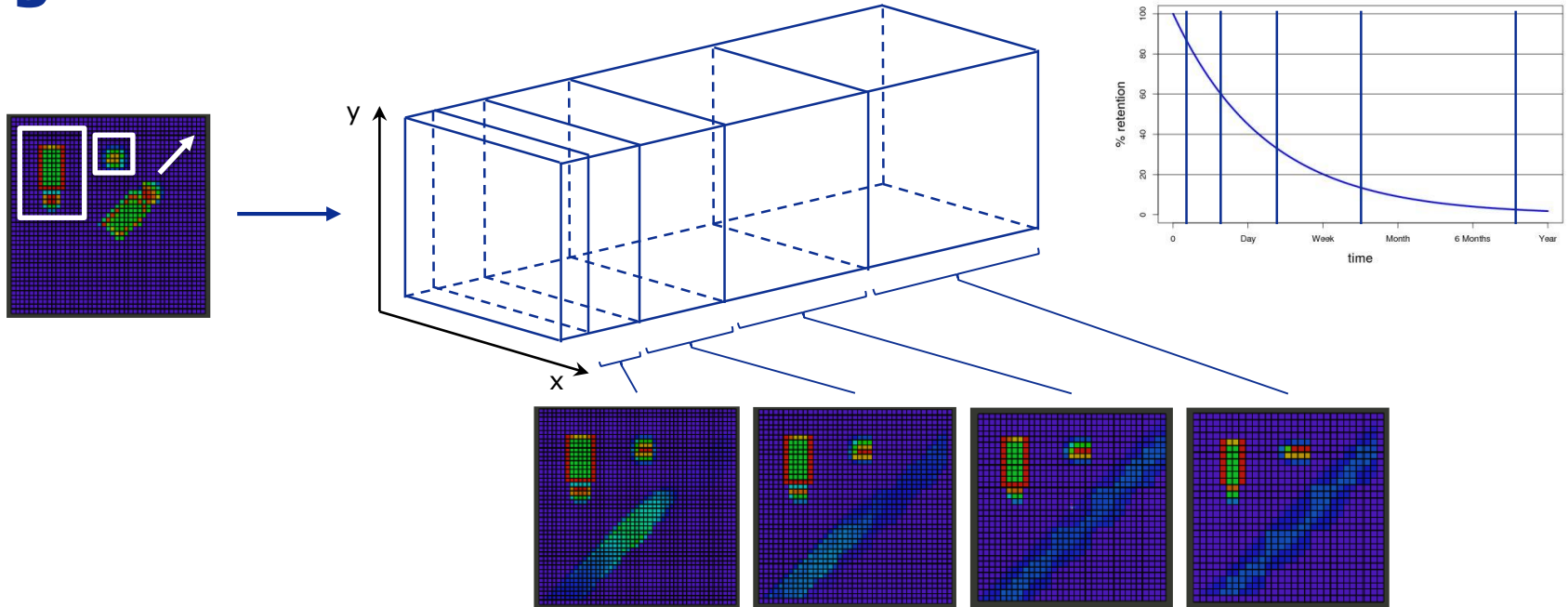
- **Decay theory** (Thorndike, 1914), **forgetting curve**
„Gedächtnisinhalte verblassen über die Zeit“
- **Verdrängen irrelevanter** Information,
Beibehalten relevanter Information
- Aufbau **kognitiver Karten**



Technisch

- Notwendigkeit: **begrenzter Speicherplatz**
- **Feature extraction** über die Zeit
- **Rausch- / Fehlerkompensation** über die Zeit
- → **zeitliches** und **räumliches** Vergessen := **Filtern**

Vergessen – Zeitlich



Zeitliches Vergessen :=

zeitliches Akkumulieren

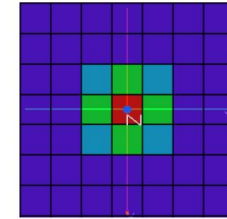
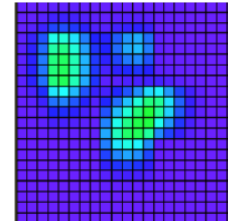
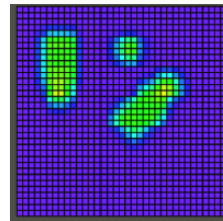
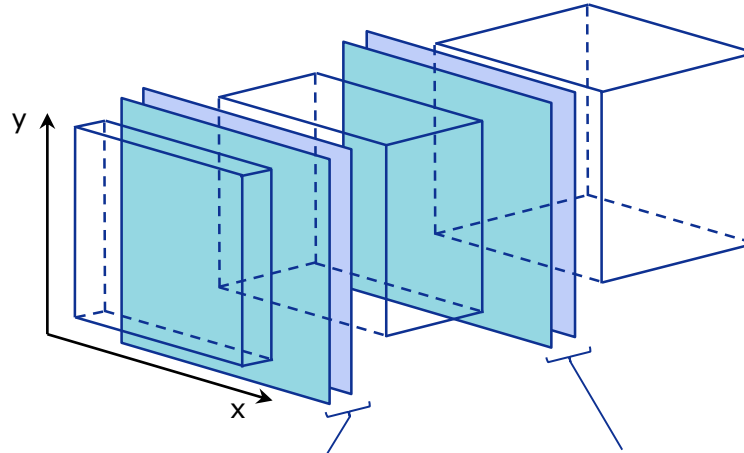
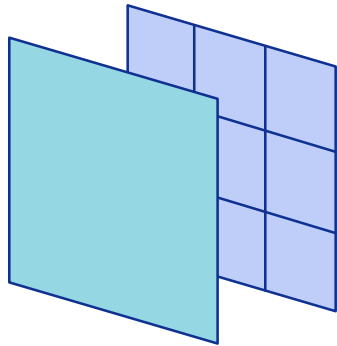
(Filtern, Signalverarbeitung)

+ zeitliches Subsampling

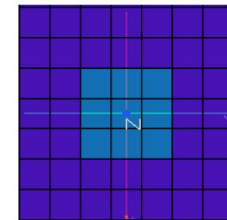
$$op_{wadd} : v_{acc,i} = \alpha v_{t,i} + (1 - \alpha)v_{t-1,j}, \quad \alpha \in [0, 1]$$

$$f(m) = \frac{f_0}{n \lfloor \frac{m}{n} \rfloor}$$

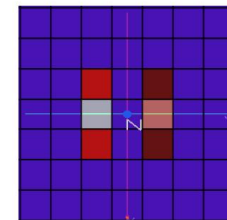
Vergessen – Räumlich



$$\frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$



$$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Räumliches Vergessen :=

räumliches Filtern

(Bildverarbeitung)

+ räumliches Subsampling

$$\forall i =: (x, y), j =: (u, v) :$$

$$v_{2,(x,y)} = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} v_{0,(x-u,y-v)} v_{1,(u,v)}$$

Vergessen := zeitliches Filtern + zeitliches Subsampling

+ räumliches Filtern + räumliches Subsampling

Erinnern – Motivation

Biologisch

- partieller **Umkehrprozess** des Vergessens (?)
- Abgleich von synaptischen **Erregungsmustern**

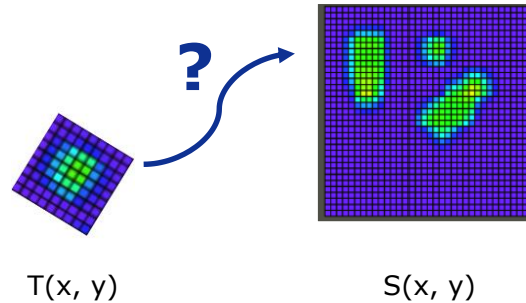


Technisch

- zeitlicher und räumlicher Suchprozess
- **Mustererkennung und -registrierung**
(explizites pattern matching)
- **Hier** → Matching eines **partiellen Aspect** (template)
innerhalb der **Aspect Maps** der **Gedächtnisstufen**
(search images)



Erinnern – Template Matching



Naiver Ansatz:

- **minimiere Fehler** E zwischen T und S :
- hinsichtlich der Distanz
- kleinster Fehler \rightarrow optimales Matching:
- Komplexität: $O(n^2m^2)$, $O(n^4)$ für $n = m$

$$E(x, y) = \sum_{u=0}^{m-1} \sum_{v=0}^{m-1} dist(x + u, y + v, u, v)$$

$$dist(x_s, y_s, x_t, y_t) = \|S(x_s, y_s) - T(x_t, y_t)\|$$

Effizienter, implementierter Ansatz:

- **Phasenkorelation:** 2D Kreuzkorrelation im Frequenzbereich
- Komplexität: $O(n^2)$ für Korrelation + $O(n^2 \log n)$ für FFT $\rightarrow O(n^2 \log n)$
- **Rotation?** \rightarrow Phasenkorelation im Polarbereich

Konzept in Kurzform

Aspect

- := (genau) ein semantischer Aspekt der sensorisch wahrnehmbaren Umwelt, bestehend aus zeitlich und räumlich zusammengehörigen Daten



Aspect Map

- := einheitliche Datenstruktur, die einen Aspect als Projektion auf die (maximal) 2-dimensionale Bodenebene des WKS speichert

Aspect Memory

- := Menge von zeitlich fortlaufend wahrgenommen Aspect Maps desselben Aspects

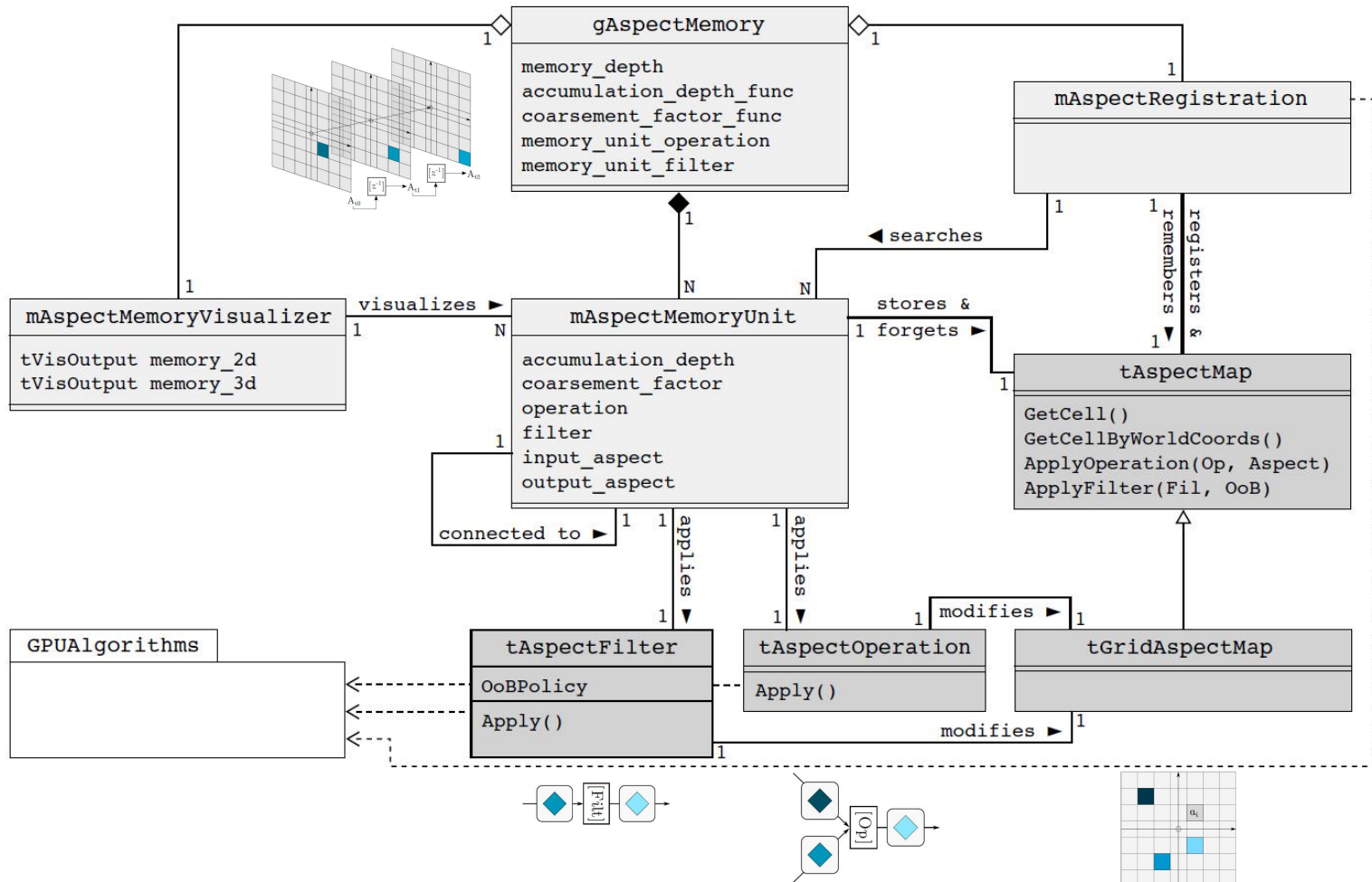
Vergessen

- := zeitliches und räumliches Filtern und Vergrößern von Aspect Maps

Erinnern

- := rotationsinvariantes Template Matching partieller Aspect pro Gedächtnisstufe

Implementierung – Architektur



Résumé und Ausblick

■ Gedächtnis

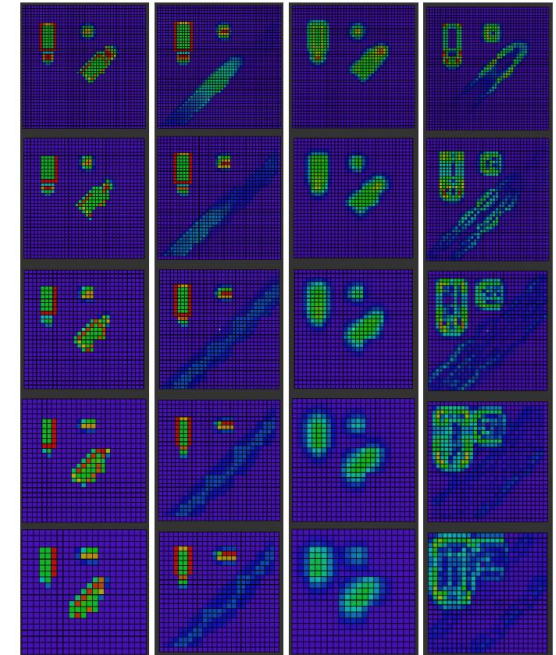
- ... als Datenstruktur für zusammengehörige 4D Daten der Umwelt auf Basis der CMA

■ Vergessen

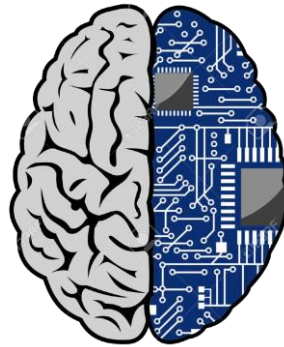
- ... als zeitliches & räumliches Filtern, „temporaler Feature-Extractor“, Generierung kogn. Karten
- Parameter, Kernels abhängig vom Verwendungszweck
- selbstständiges Finden der Parameterkonfiguration (?) „Lernen“ (gilt auch für zugrundeliegende CMA) → ANN, CNN

■ Erinnern

- ... als Matching räumlicher Patterns innerhalb des raumzeitlichen Gedächtnisses
- raumzeitliche Patterns → Matching von Situationsmustern



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

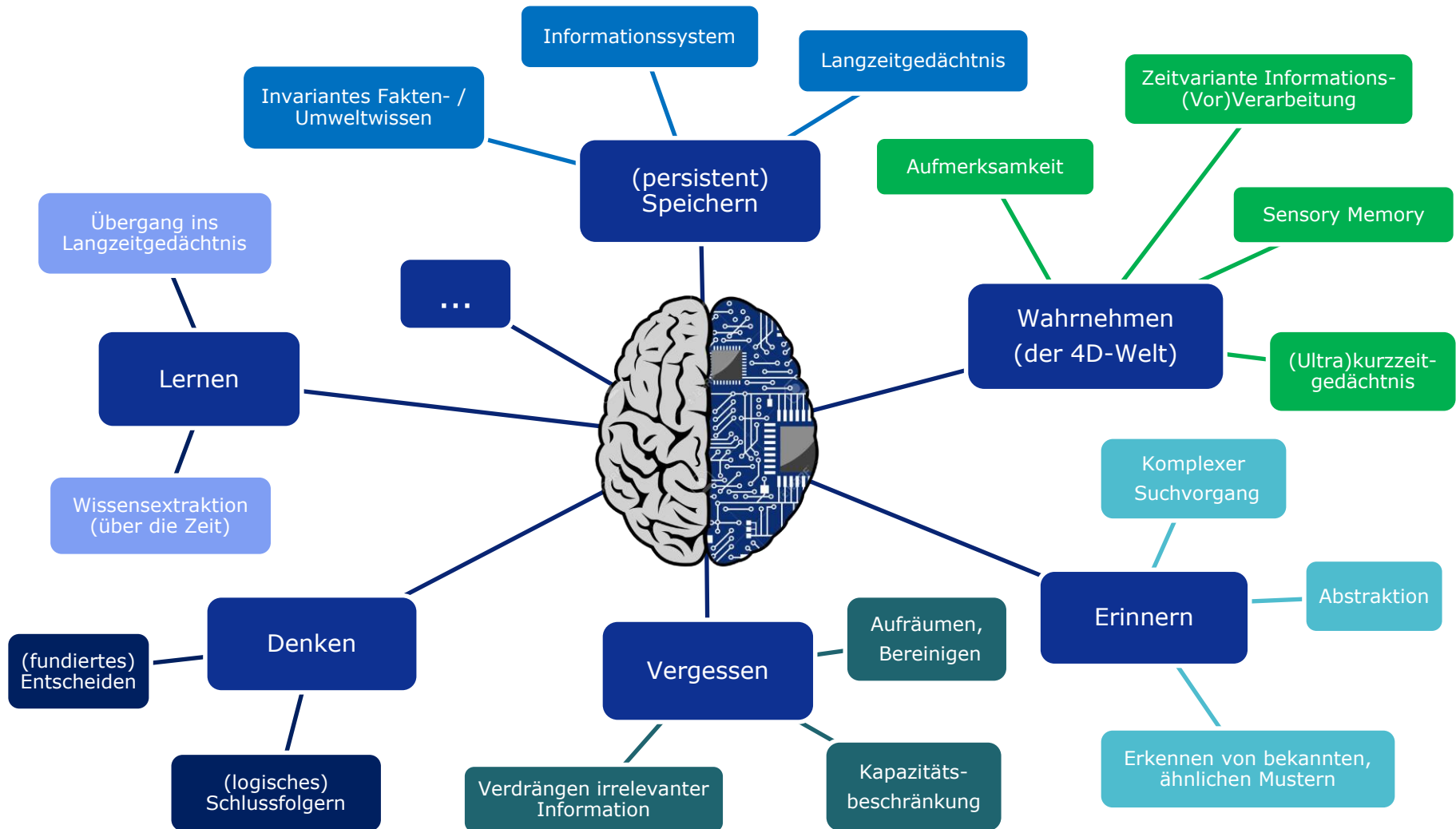


... Fragen?

Anhang

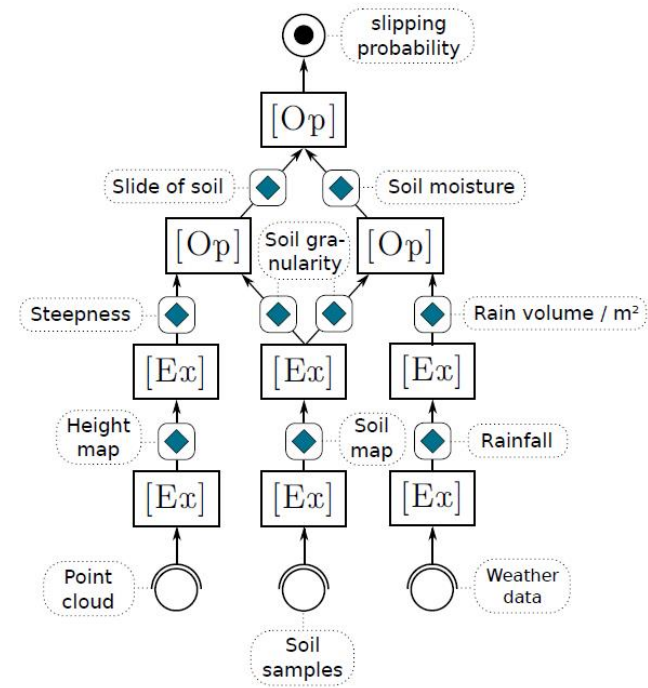
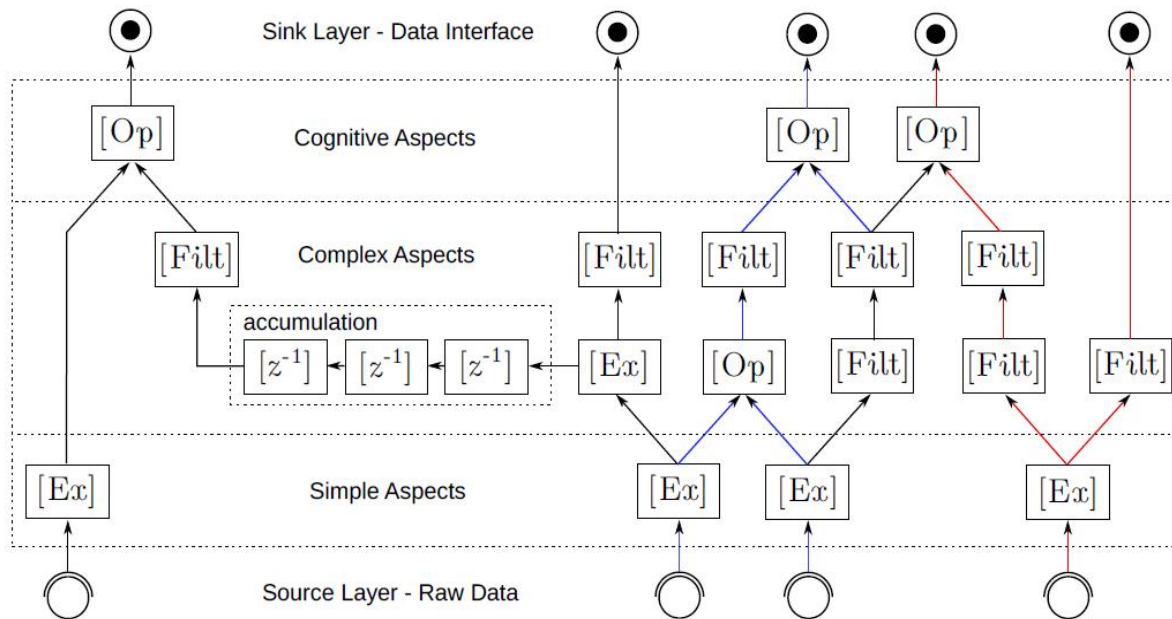
$$\begin{aligned}
 & \rho(x) = -G(-x^2)/[xH(-x^2)]. \\
 & \rho^p > \sum_{j=0, j \neq p}^n A_j \rho^j, \quad \Delta_L \arg f(z) = (\pi/2)(S_1 + S_2) \\
 & G(u) = \prod_{k=1}^n (u + u_k) G_0(u), \quad \Re[\rho^p f(z)/a_p z^p] = \sum_{j=0, j \neq p}^n A_j \rho^j \\
 & \rho(x) = -G(-x^2)/[xH(-x^2)]. \\
 & p = 2\mathcal{V}_0 - (1/2)[1 - \operatorname{sg} A_1] \\
 & f(z) = \prod_{k=1}^n (u + u_k) G_0(u)
 \end{aligned}$$

Wozu ein Gedächtnis für Robotersysteme?



Cognitive Maps Architecture

Beispielarchitektur und -netzwerk



Räumliches Filtern – Separierbarkeit

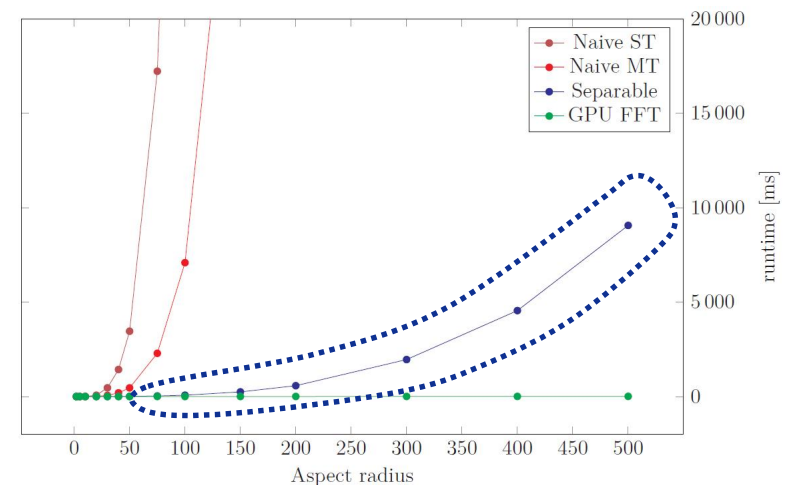
$$\frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \otimes \frac{1}{4} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{16} \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

- $\text{rank}(K) = 1$
- → separierbar in 2 nacheinander anwendbare 1D-Kernels

$$\vec{v} \otimes \vec{h} = \vec{v} * \vec{h}$$

$$\vec{v} \otimes \vec{h} = \begin{bmatrix} v_{(0,0)} \\ v_{(1,0)} \\ \vdots \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} h_{(0,0)} & h_{(0,1)} & \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{(0,0)} & c_{(0,1)} & \dots \\ c_{(1,0)} & c_{(1,1)} & \\ \vdots & & \ddots \end{bmatrix}$$

$$c_{(x,y)} = v_{(x,0)} h_{(0,y)} = \sum_{i=0}^0 v_{(x,i)} h_{(i,y)} = \sum_{u=0}^0 \sum_{v=y}^y v_{(x-u,y-v)} h_{(u,v)}$$

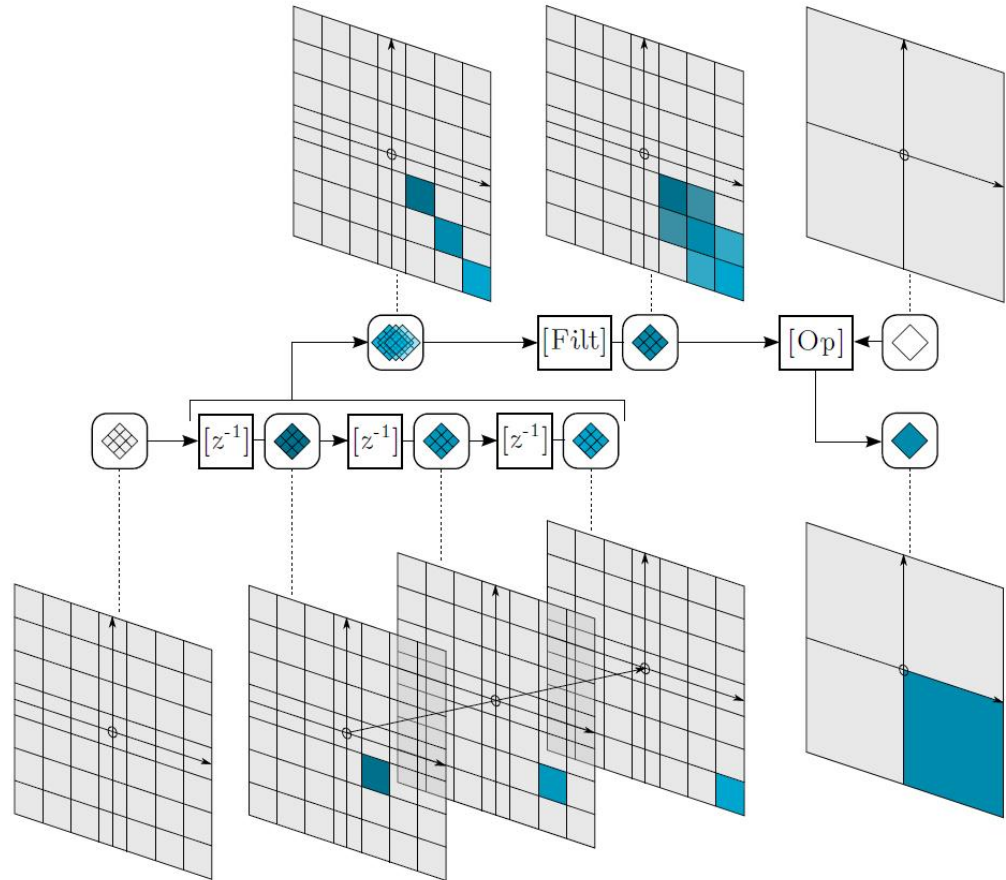


Vergessen – Gesamtprozess

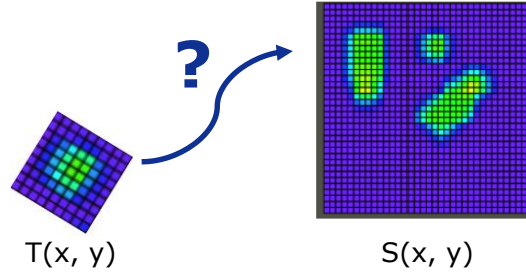
Vergessen :=

**zeitliches Filtern
+ zeitliches Subsampling**

**+ räumliches Filtern
+ räumliches Subsampling**



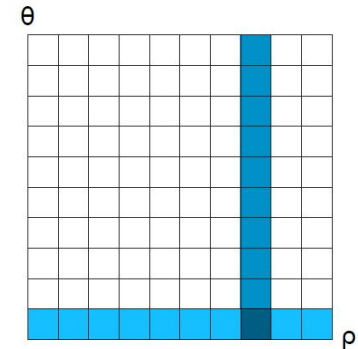
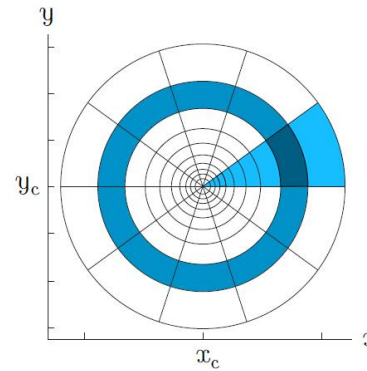
Erinnern – Rotationsinvarianz



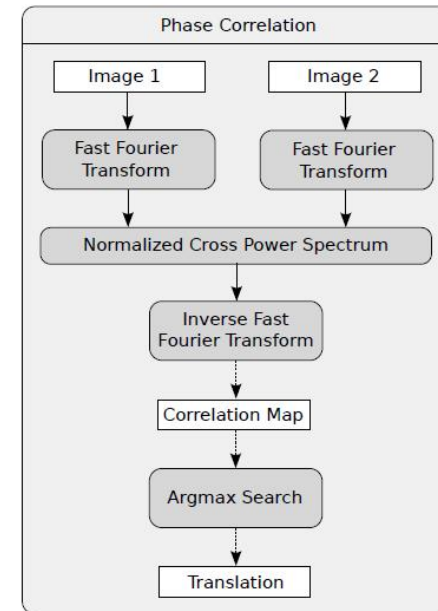
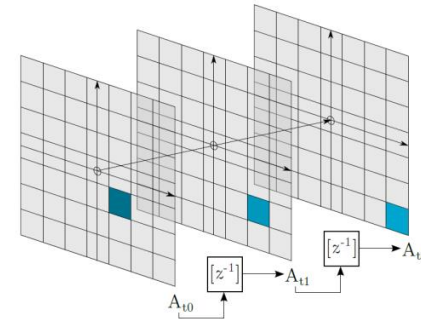
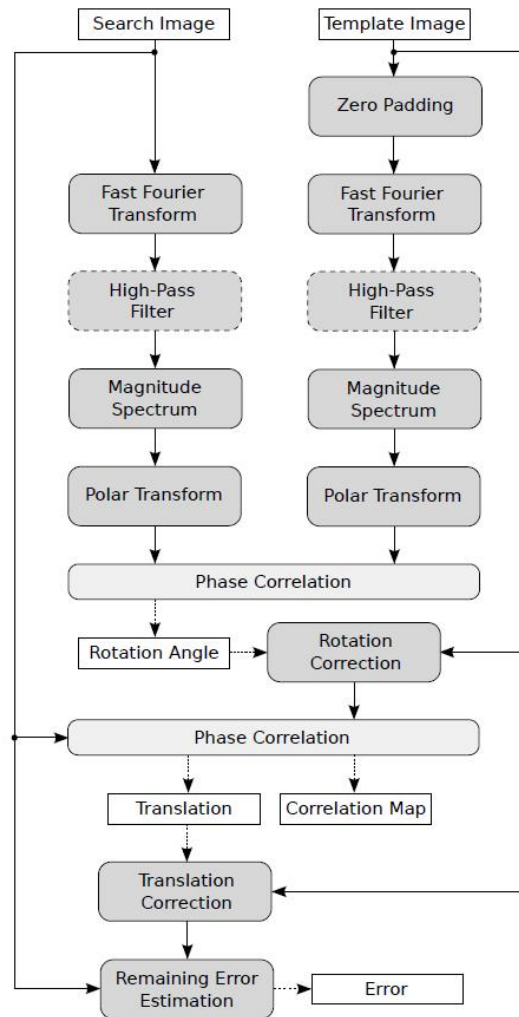
Polartransformation:

$$\begin{pmatrix} \rho \\ \theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \\ \tan^{-1} \frac{(y - y_c)}{(x - x_c)} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \rho' \\ \theta' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{(\rho \cos \theta - \Delta x)^2 + (\rho \sin \theta - \Delta y)^2} \\ \tan^{-1} \frac{(\rho \sin \theta - \Delta y)}{(\rho \cos \theta - \Delta x)} \end{pmatrix}$$



Erinnern – Gesamtprozess



Implementierung – Effizienz

Kostenintensive Basisoperationen:

■ Vergessen

- [Filt] Filtern (Faltung): $O(n^2 k^2) \rightarrow \text{FFT: } O(n \log n^2)$
- [Op] Operation / Combination: $O(n^2)$

■ Erinnern

- Phasenkorrelation (entspricht Faltung): $O(n^4) \rightarrow \text{FFT: } O(n^2 \log n)$

