

Grundlagen der Robotik

15. Pfadplanung cont., Wahrnehmung

Prof. Sven Behnke

UNIVERSITÄT **BONN**

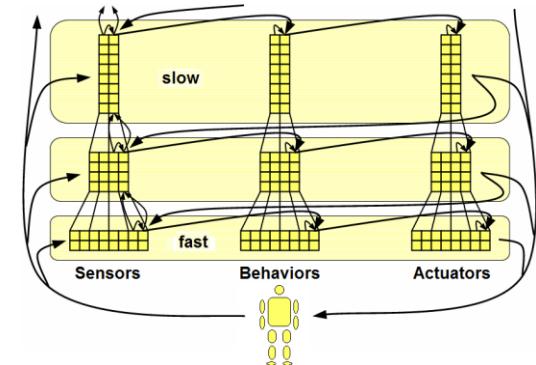
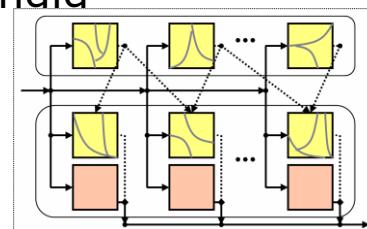


Letzte Vorlesung

■ Architekturen zur Verhaltenssteuerung

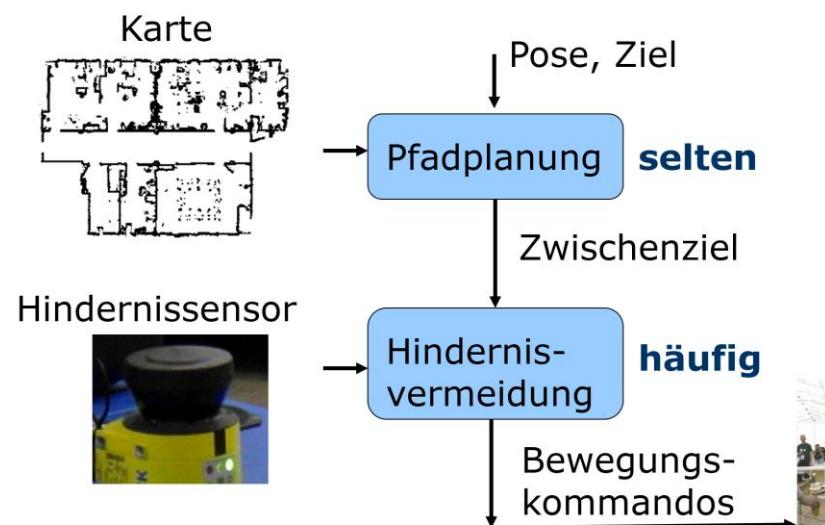
■ Verhaltensbasiert

- Mehrere einfache Verhalten
- Aktivierung situationsabhängig

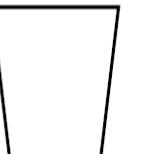
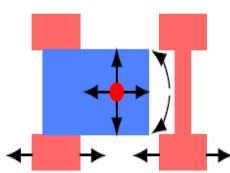
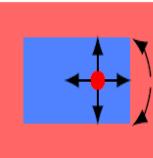


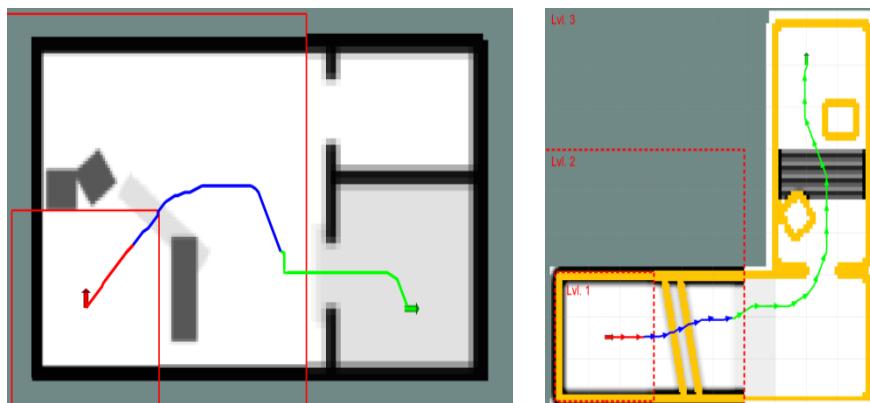
■ Hybrid

- Deliberative und reaktive Schicht
- Eventuell Zwischenschicht



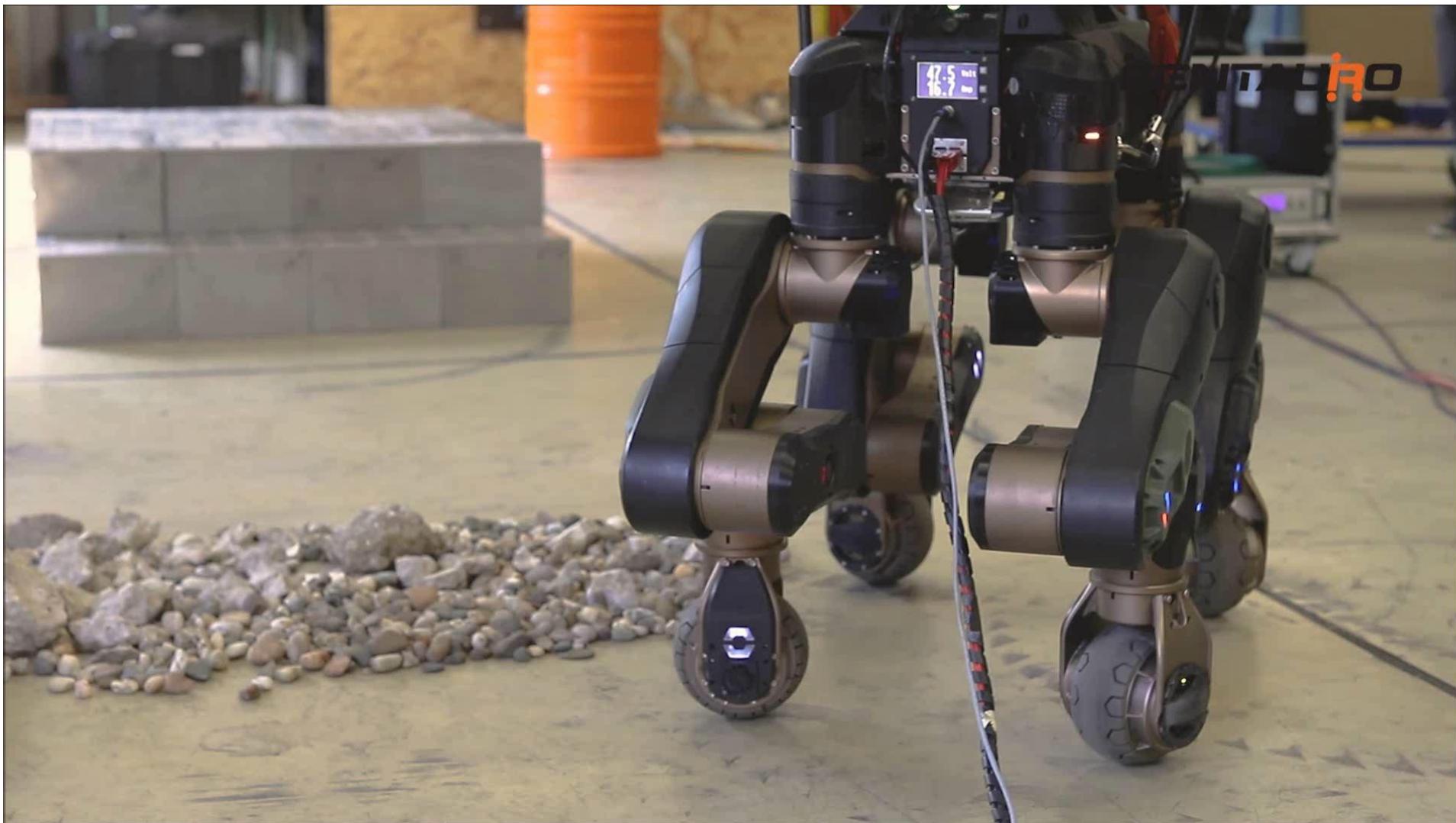
Planen auf mehreren Abstraktionsstufen

Level	Map Resolution	Map Features	Robot Representation	Action Semantics
1	• 2.5 cm • 64 orient.	• Height		• Individual Foot Actions
2	• 5.0 cm • 32 orient.	• Height • Height Difference		• Foot Pair Actions
3	• 10 cm • 16 orient.	• Height • Height Difference • Terrain Class		• Whole Robot Actions



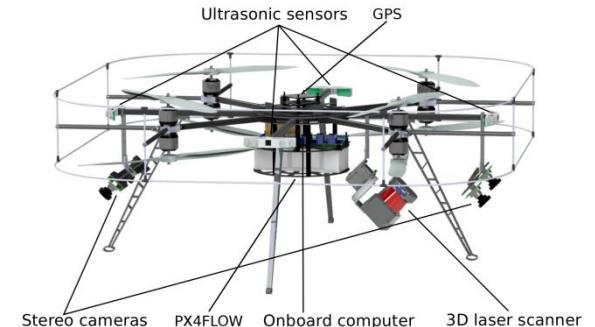
[Klamt and Behnke,
IROS 2017, ICRA 2018]

Evaluation @ KHG: Hybride Fortbewegung

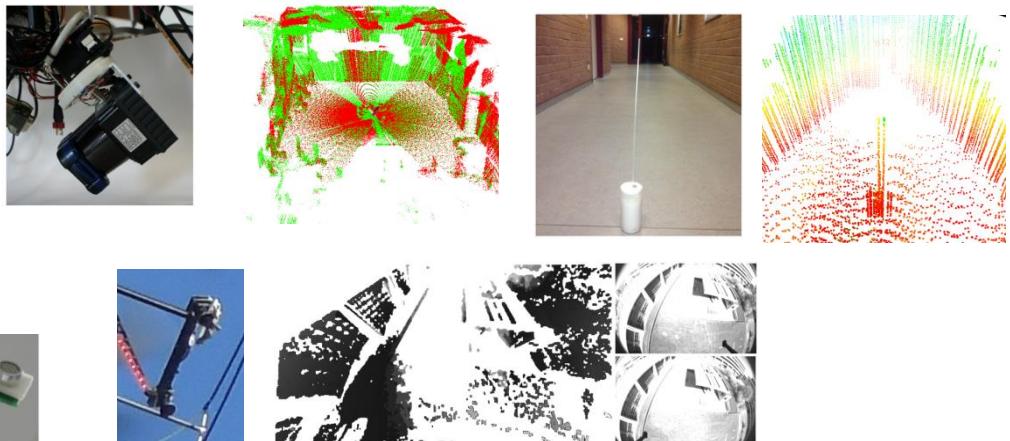


Autonomer Flug in Hindernisnähe

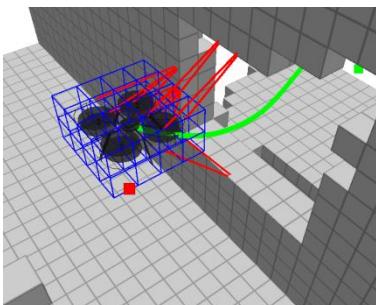
- Flugroboter mit viel Sensorik und Rechenleistung
- Multimodale Hindernisdetektion
 - 3D-Laserscanner



- Stereo-Kameras
- Ultraschall

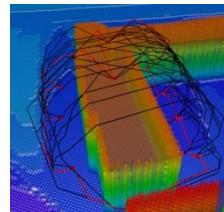


- Lokale Hindernisvermeidung

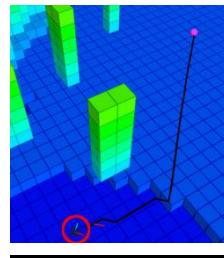


Navigationsarchitektur

■ Geschichtete Planung: Von abstrakt zu konkret



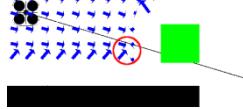
Missionsplanung



Allozentrische Planung

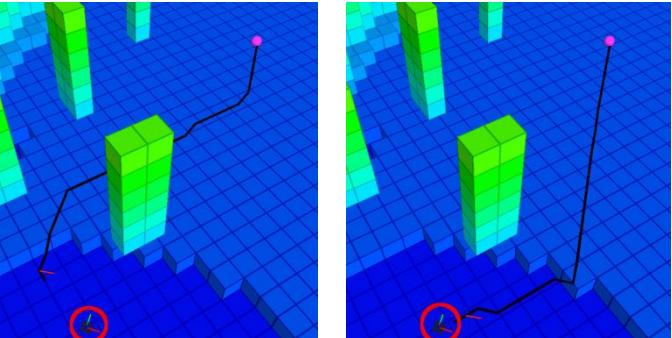
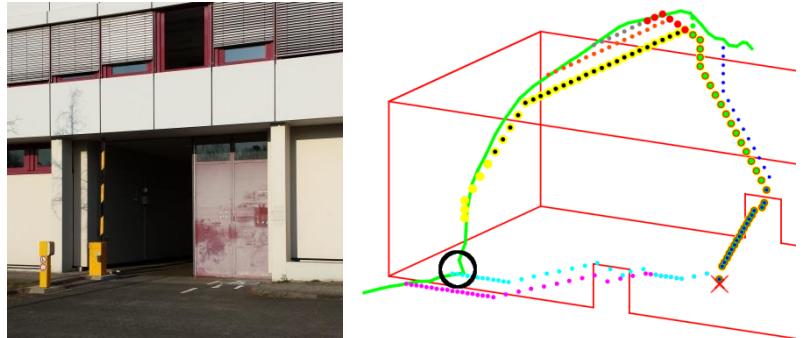
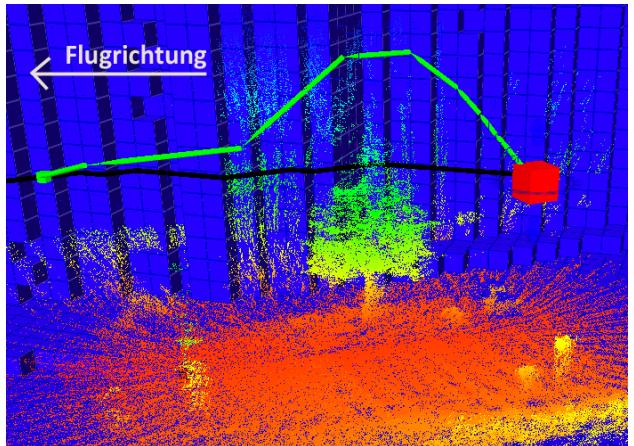


Egozentrische Planung



Hindernisvermeidung

Navigationsplanung

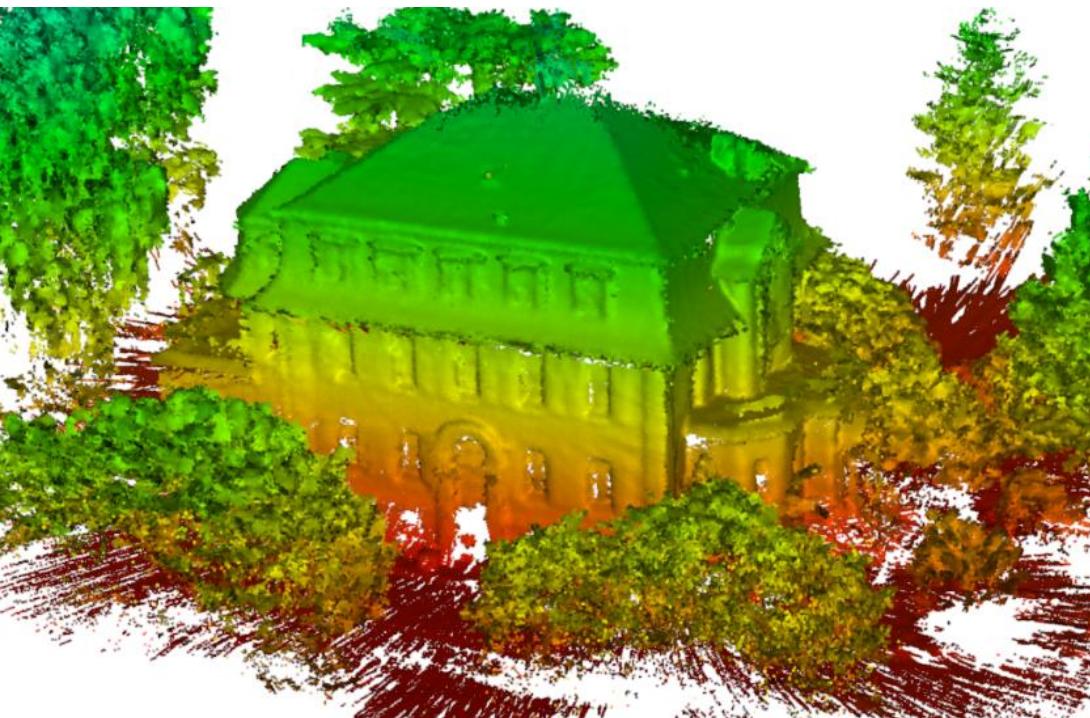
- Kontinuierliche allozentrische Planung
 - A*-Planer in Voxel-Gitter findet kostenoptimale Pfade
- Reaktion auf Positionsabweichung Reaktion auf Belegtheitsänderung
- 
- 
- Lokale Multiresolutionsplanung
 - A*-Planer in lokaler Multi-resolutionskarte
 - Neuplanung mit hoher Rate
 - Umfliegen lokal wahrnommener Hindernisse
- 

Autonomer Flug in Hindernisnähe

Mapping on Demand
Autonomous Flight to Planned View Poses

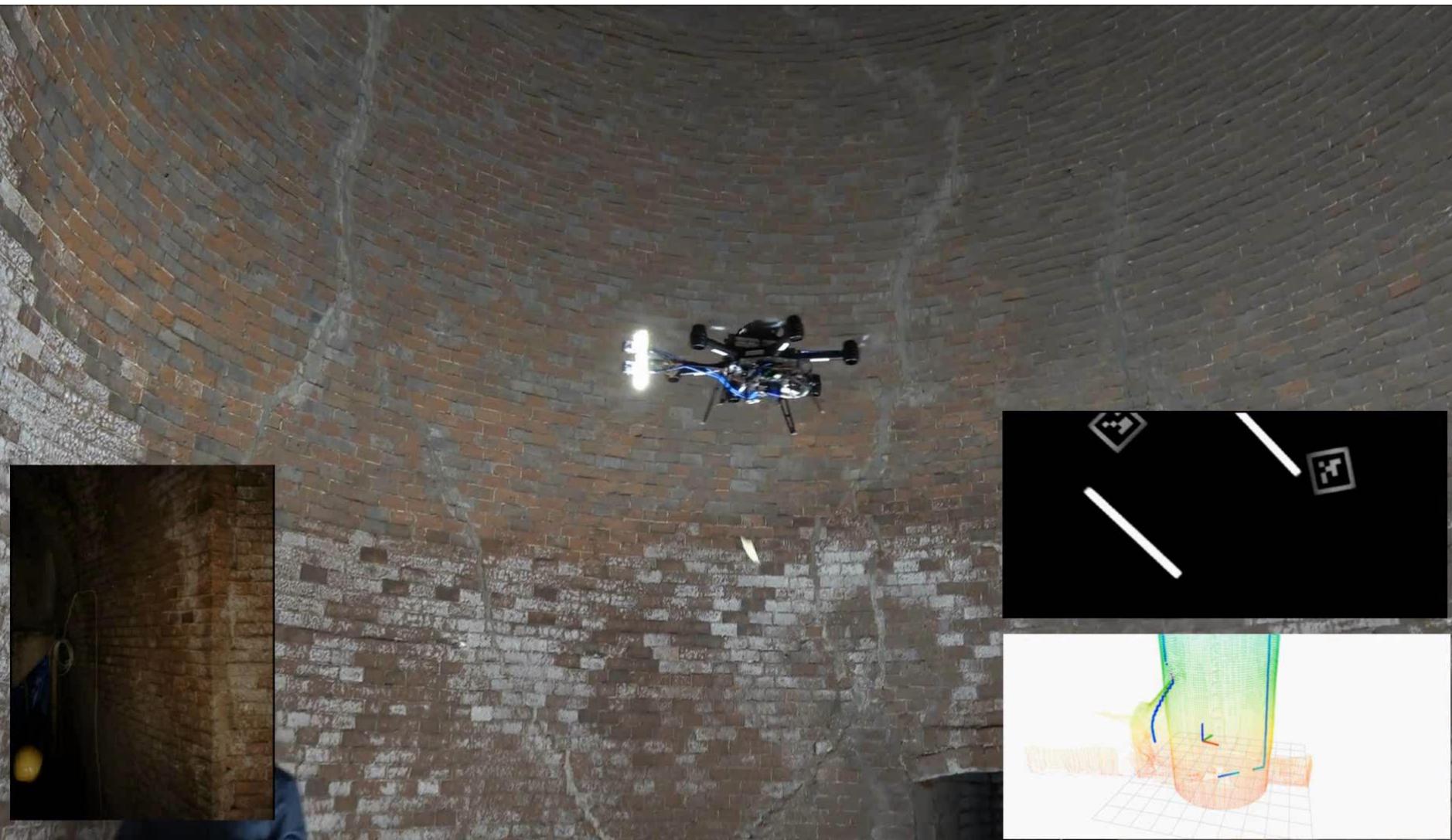
3D-Kartierung

- Registrierung von Laser-Distanzmessungen



[Droeschel et al. JFR 2016]

European Robotics Challenge 3: ChimneySpector



DJI Matrice 600 mit Velodyne Puck Lidar



Autonome Navigation in Innenräumen



Fully Autonomous indoor flight without external tracking.

InventAIRy: Detektierte Etiketten im Regal



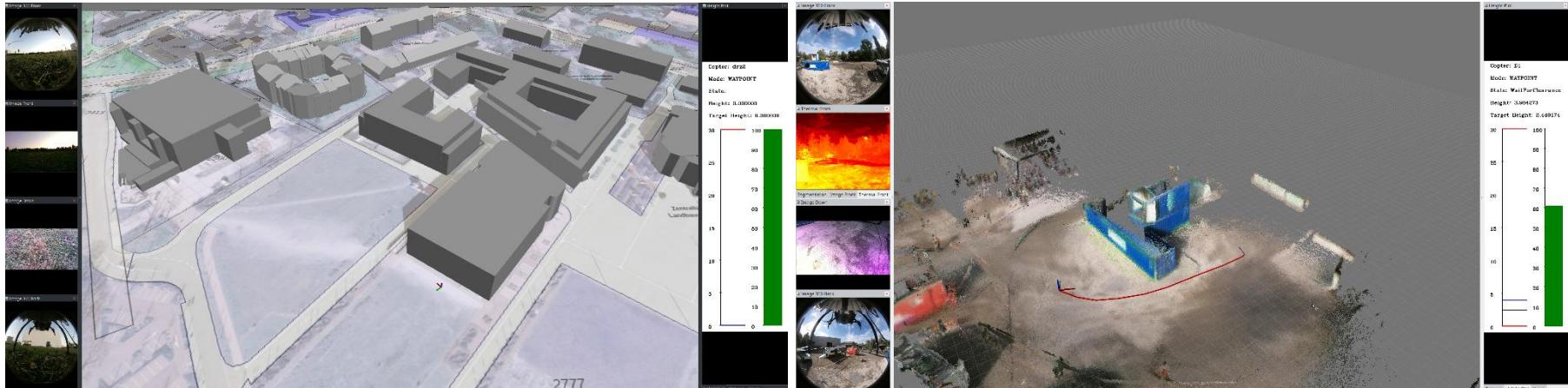
Deutsches Rettungsrobotik-Zentrum

- Basis: DJI Matrice M210 v2
- Intel NUC 11th Gen zur Onboard-Verarbeitung
- 20 Hz 3D-LiDAR Ouster OS0-128
- 360° Kamera Insta360 Air
- FLIR Boson Thermalkamera
- 2x Realsense D455 RGB-D Kamera



Operator-Interface

- Anzeige von CityGML-Modellen, Satellitenbildern und Straßenkarten aus dem Lagebildsystem
- Intuitive Steuerung mehrerer Roboter an der Bodenstation mit Gamepad und Maus
- Visuelle und haptische Rückmeldung des aktuellen Zustandes und der nächsten geplanten Aktionen für wechselbare Steuerungsmodi mit unterschiedlichen Autonomiegraden



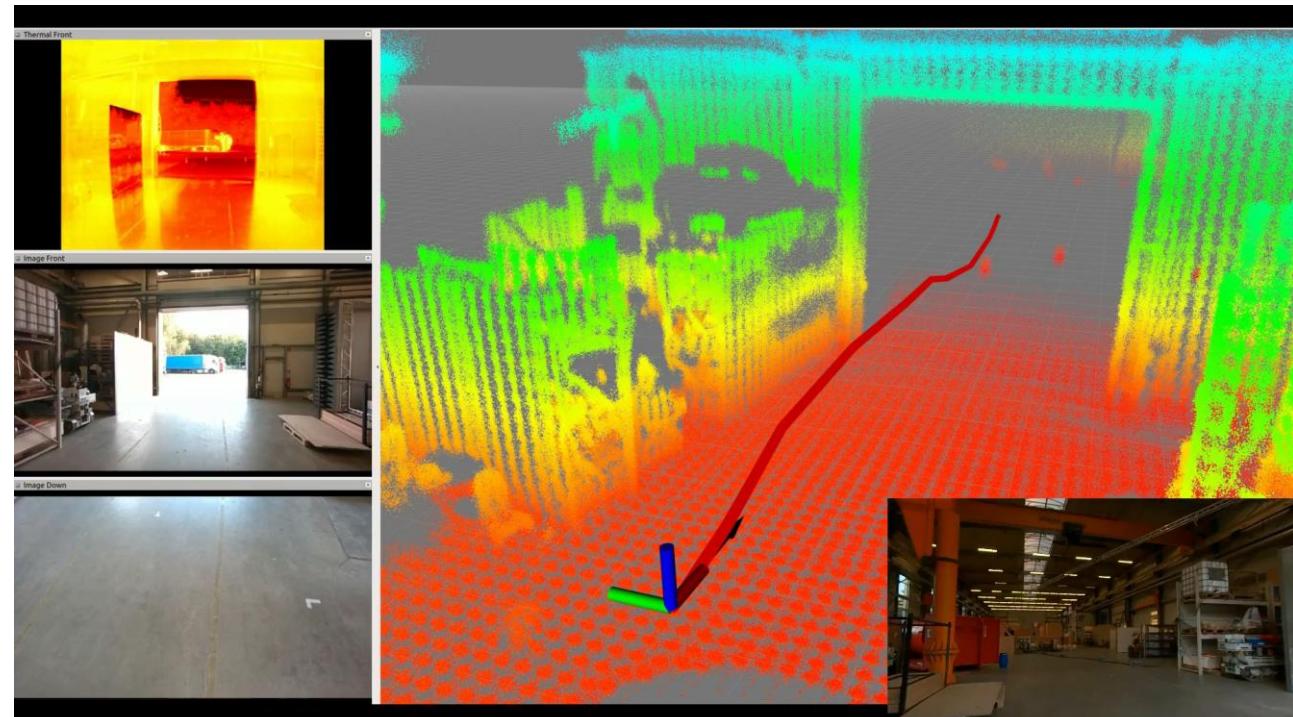
Hindernisvermeidung

- Aktuelle Zielpose wird per Gamepad verschoben und in Echtzeit angeflogen
- Aktive Hindernisvermeidung passt Zielposen an, sodass
 - zu dichte Annäherung an Hindernisse vermieden wird
 - Flugrichtung innerhalb des Sensorsichtfeldes liegt
- Haptische Rückmeldung bei Eingreifen der Hindernisvermeidung



Hindernisvermeidung

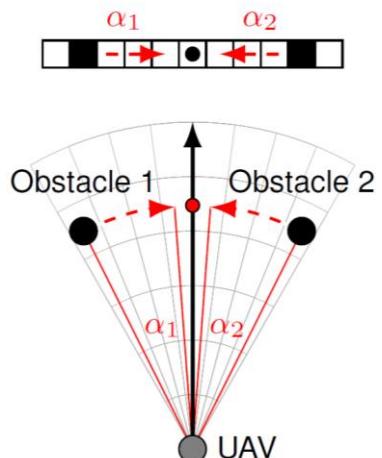
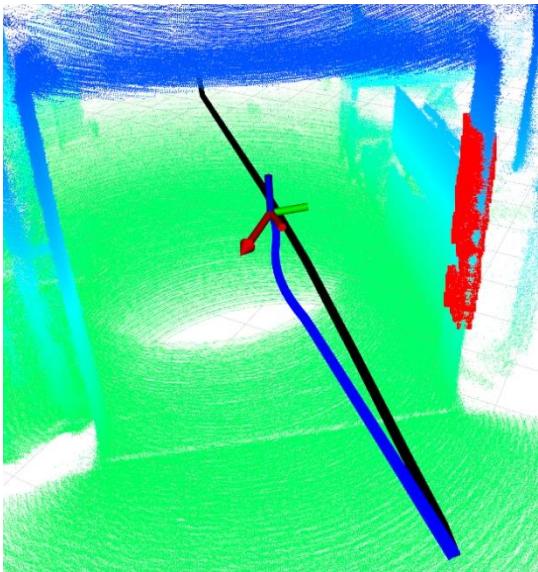
- Aktuelle Zielpose wird per Gamepad verschoben und in Echtzeit angeflogen
- Aktive Hindernisvermeidung passt Zielposen an, sodass
 - zu dichte Annäherung an Hindernisse vermieden wird
 - Flugrichtung innerhalb des Sensorsichtfeldes liegt
- Haptische Rückmeldung bei Eingreifen der Hindernisvermeidung



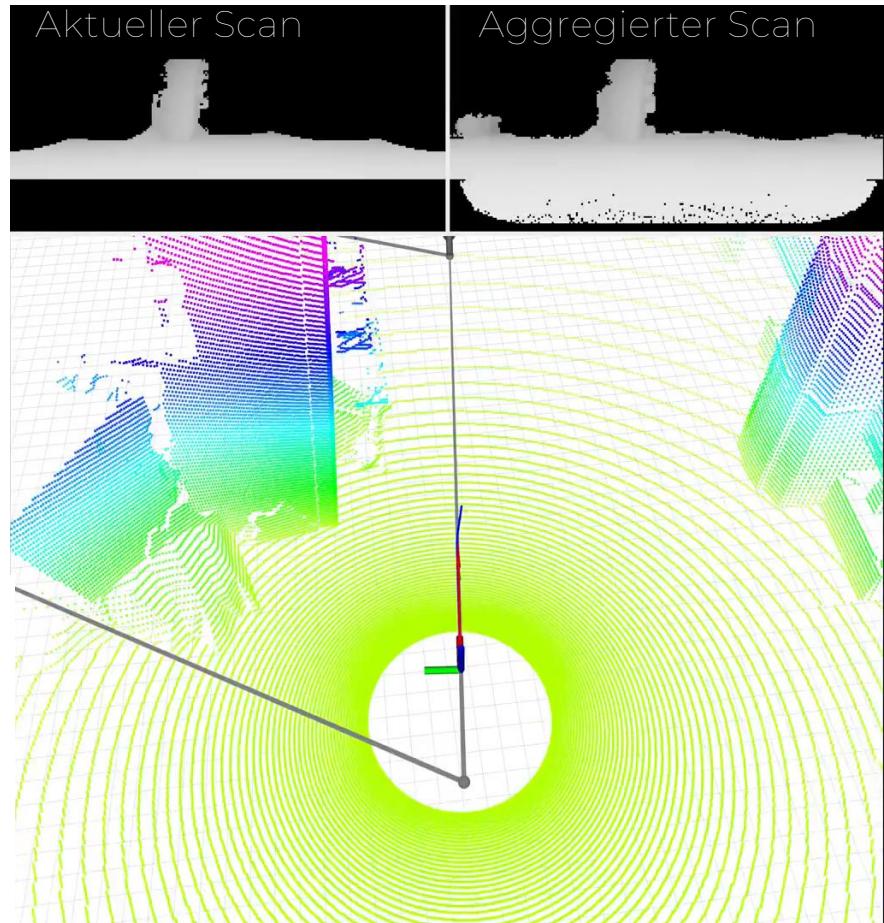
[Beul et al. SSRR 2020]

Hindernisvermeidung

- LiDAR-Scans zu Entfernungsbild aggregieren
- Anpassen der Flugrichtung mit Potentialfeld-Methode
- Vorhersage von Flugbahn und Entfernungsbild
- Skalierung der Geschwindigkeit basierend auf Zeit bis Berührung



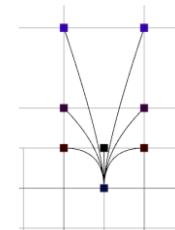
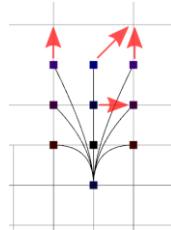
Anpassen der Flugrichtung



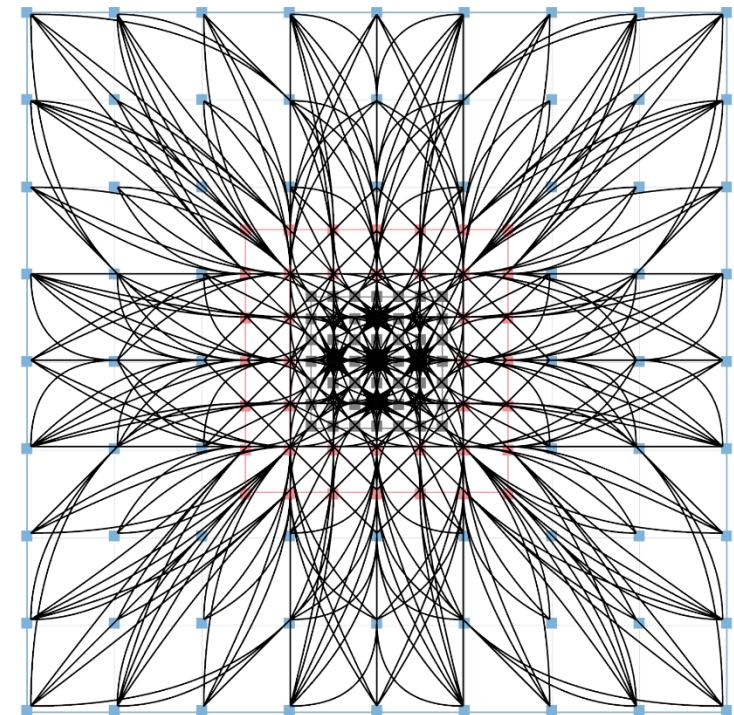
[Schleich and Behnke, IROS 2022]

Dynamische Trajektorienplanung

- Suchbasierte Planung in hochdimensionalem Zustandsgraphen
- Berücksichtigung von Geschwindigkeit und Beschleunigung
- Anpassung der Bewegungsprimitive an lokales multiresolutionales Gitter

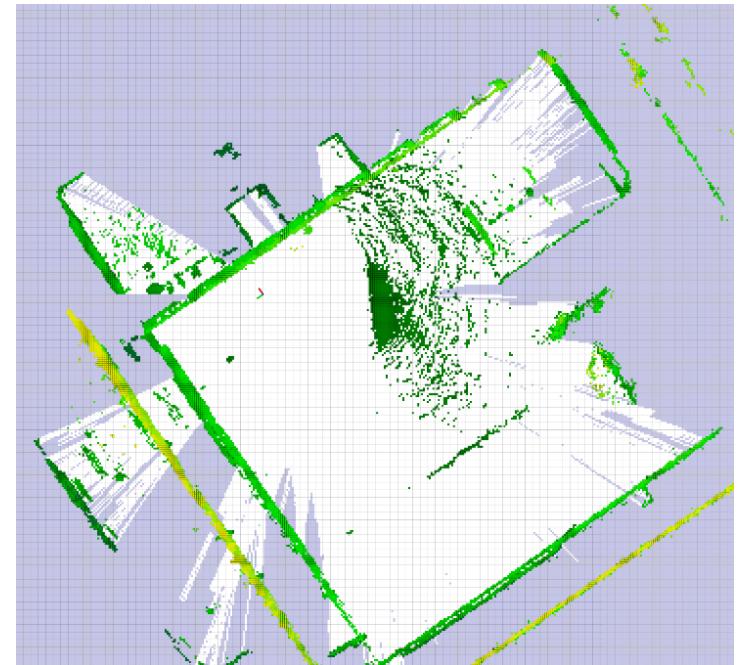
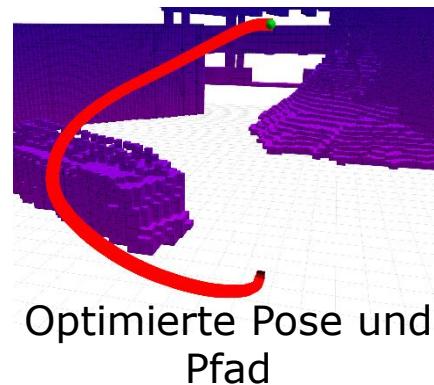
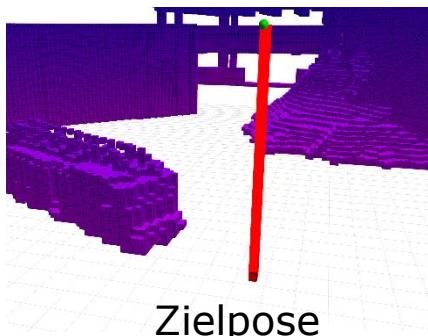


- Optimierung von Flugzeit und Kontrollkosten
- Neuplanung mit ~ 1 Hz



Planung mit Sichtbarkeitsbeschränkung

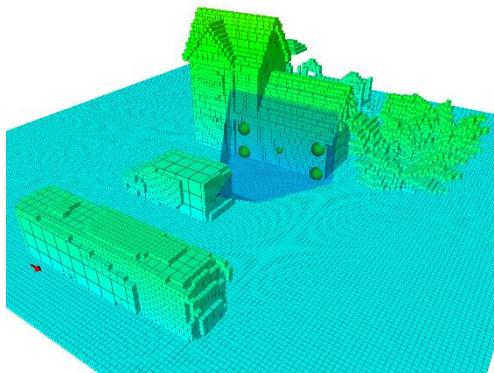
- Zusätzliche Kosten für Flug durch unkartierte Bereiche
- Berücksichtigung des Sensorsichtfeldes bei der Planung:
 - Steigratenbeschränkung durch Kopplung von vertikaler und horizontaler Fluggeschwindigkeit
 - Beschränkung auf Flug in Vorwärtsrichtung mit begrenzter Rotationsgeschwindigkeit



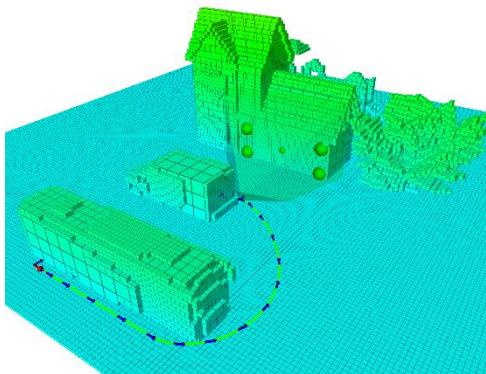
Hinderniskarte

Planung von Beobachtungsposen

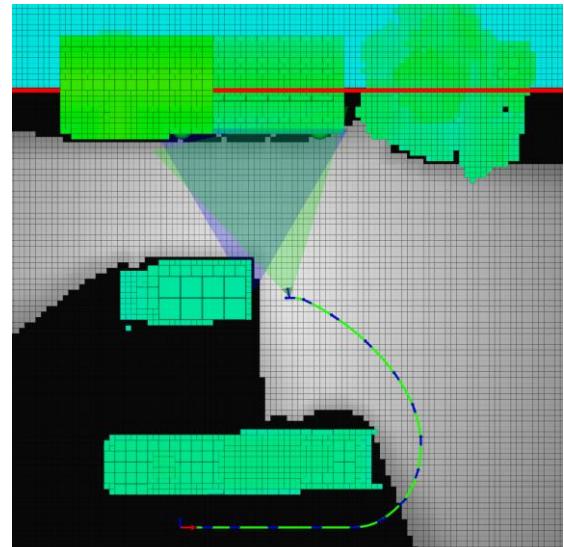
- Ableitung von Beobachtungsposen zu Zielobjekten
- Optimierung der Posen hinsichtlich Sichtbarkeit, Hindernissabstand und Erreichbarkeit



Zielbeobachtungs-
pose



Optimierte Pose und
Pfad



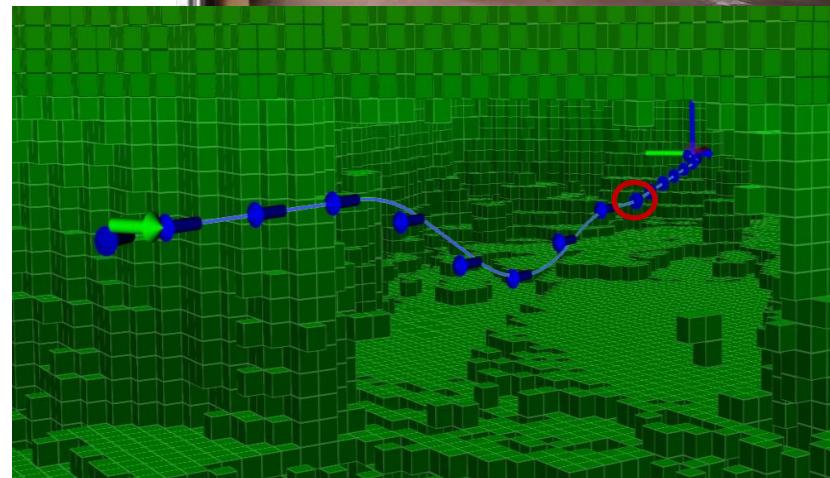
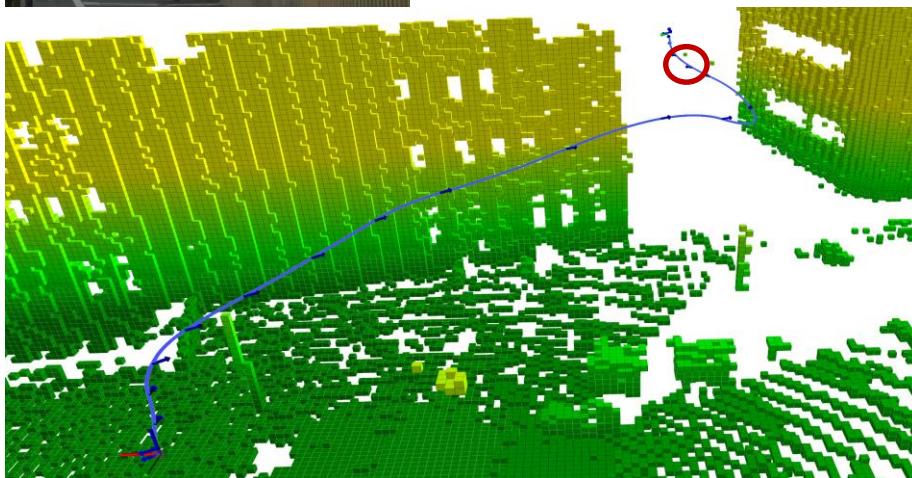
Sichtbarkeit

Wegpunkt-Navigation



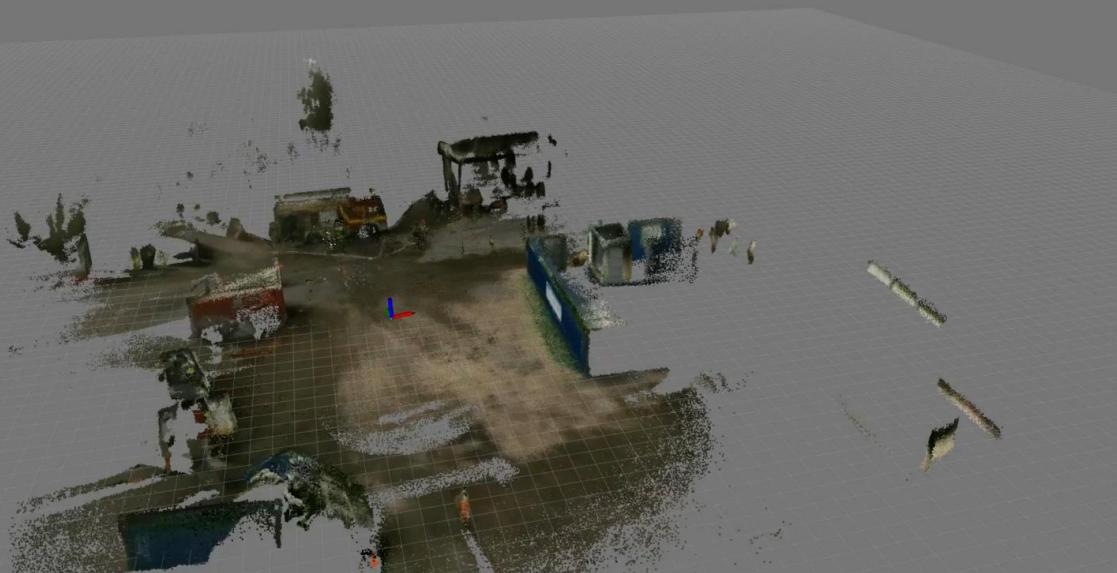
Campus
Poppelsdorf

Desaster-
Szenario

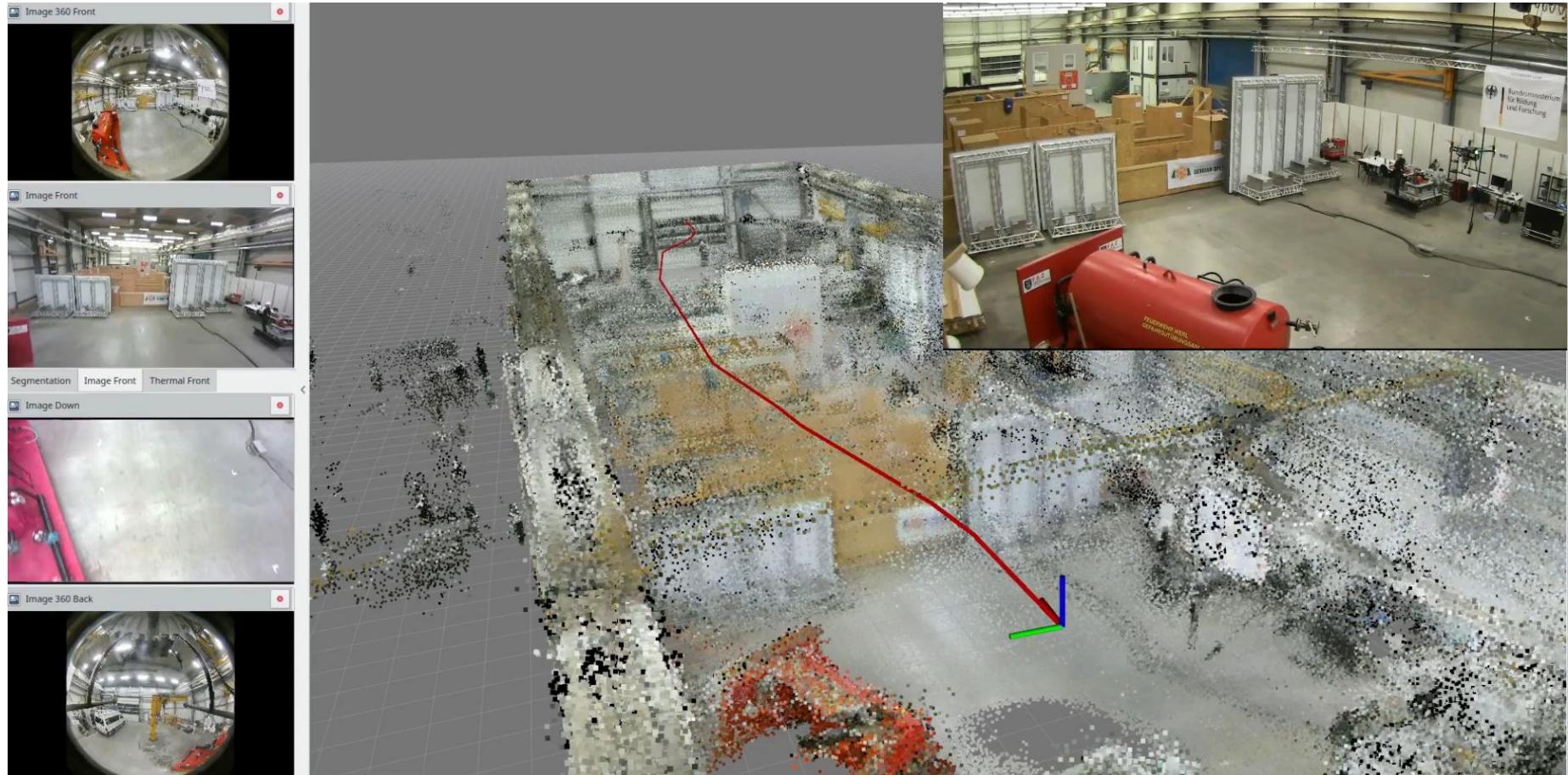


Wegpunkt-Navigation

- Vorgabe von Wegpunkten per Gamepad in der aktuellen 3D-Karte
- Anzeige der geplanten Trajektorie und autonomer Abflug nach Freigabe durch Operator
- Hindernisvermeidung passt Trajektorie an



Wegpunkt-Navigation



[Schleich and Behnke, ICRA 2021]

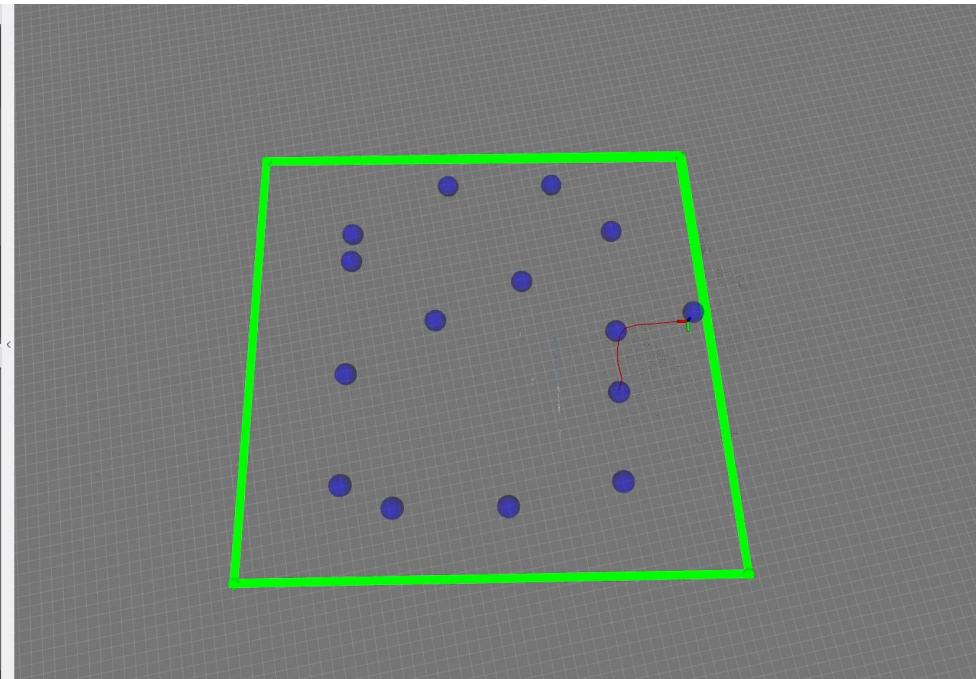
Exploration

- Markierung des Zielgebiets auf Satellitenbildern oder Straßenkarten
- Prüfung von initialem Explorationsmuster (Mäander, Spirale...) auf Hinderniskollisionen
- Lösung eines Traveling-Salesman-Problems auf Bodenstation bestimmt optimale Reihenfolge
- UAV plant kontinuierlich onboard dynamische Trajektorien durch die nächsten Wegpunkte



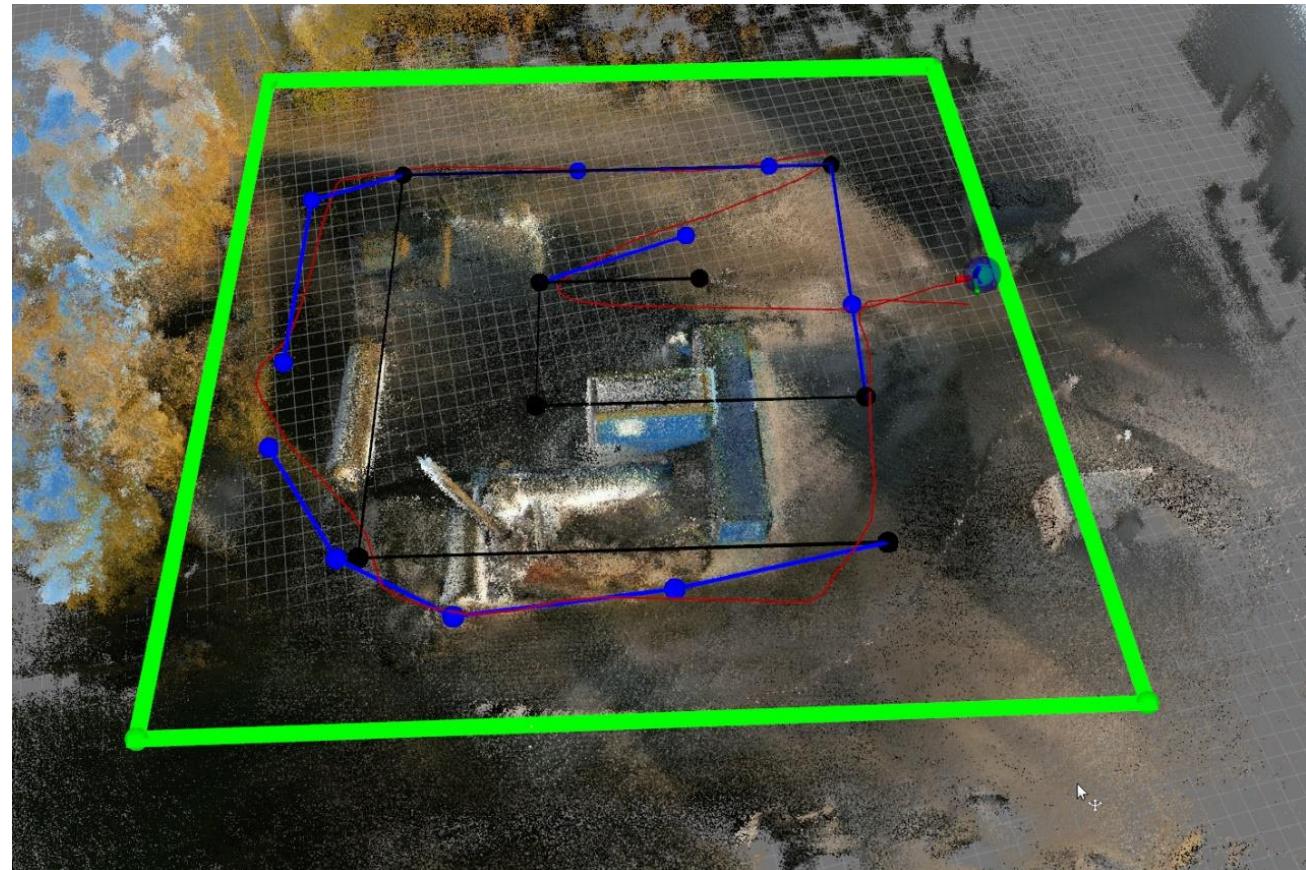
Exploration

- Zielbereich vorgegeben (grünes Rechteck)
- UAV plant kontinuierlich onboard dynamische Trajektorien (rote Linie) durch die nächsten Wegpunkte (blau)
- Kontinuierliche Neuplanung auf der Bodenstation mit 2 Hz zur Anpassung an Hindernisse



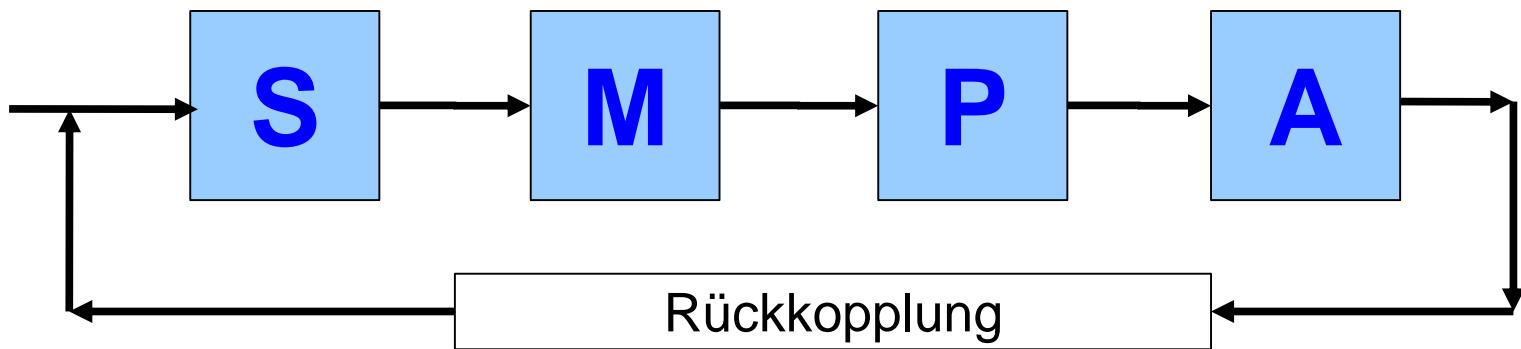
Exploration

- Umgebungsmodell nach Exploration mit
 - initialem Muster (schwarz)
 - angepasstem Muster (blau)
 - exploriertem Pfad (rot)
- Pattern-Wegpunkte werden lokal entsprechend der Hindernisse verschoben



Erinnerung: SMPA Architektur

Sense – Model – Plan – Act



- Umgebungs- und Selbstwahrnehmung ist Grundlage für Verhaltensplanung

Humanoide Fußballroboter

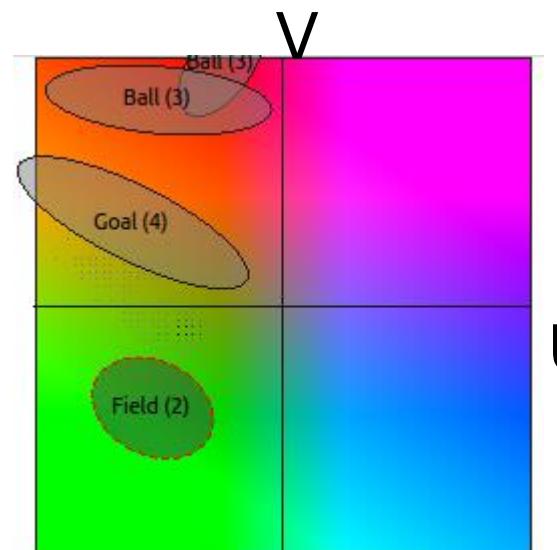
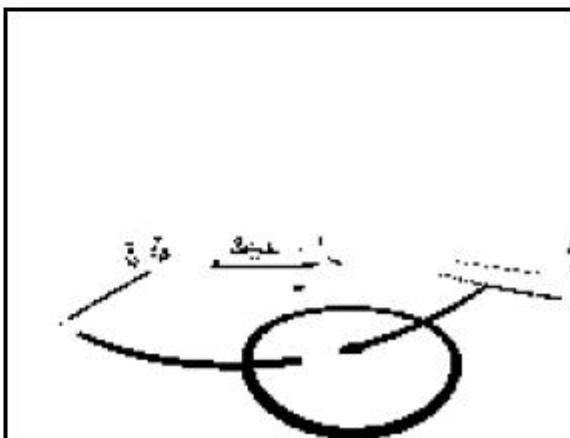
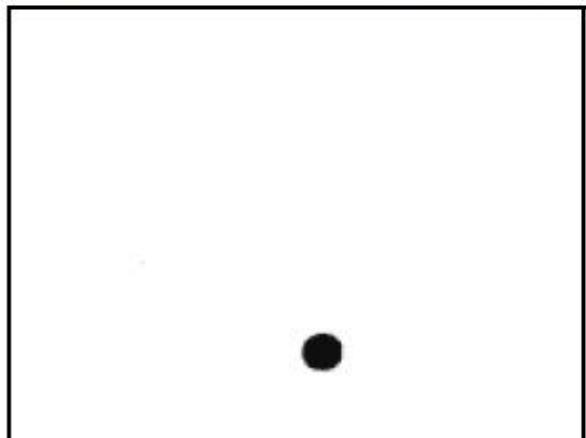
- TeenSize: 90-114 cm



- AdultSize: 125 cm



Farbklassifikation im YUV-Raum

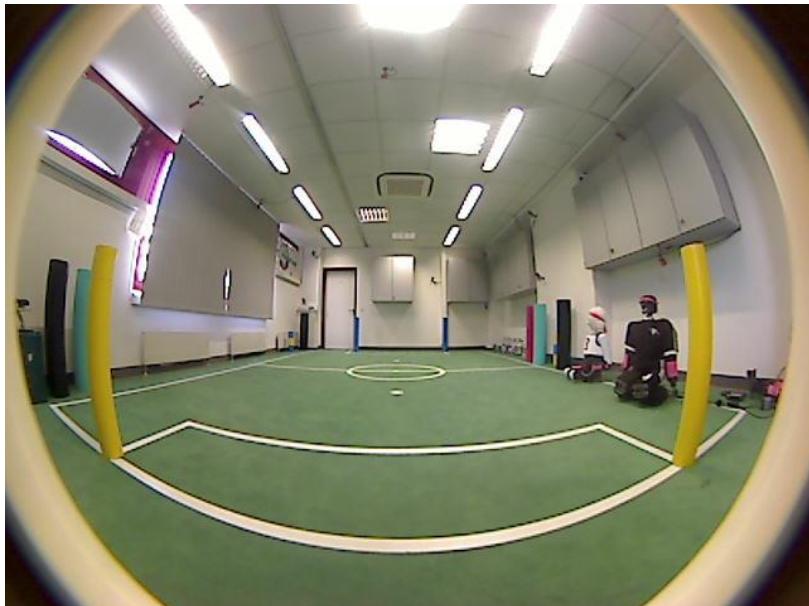


Visuelle Objektdetektion



- Spielfeld
- Ball
- Tore
- Ecken,
Kreuzungen,
Abzweigun
gen von
Linien
- Hindernisse

Entzerrung des Bildes



- Bildkoordinate p und entzerrte Koordinate q relativ zum Bildzentrum

$$q = \frac{p}{1 - \alpha \|p\|^2}$$

Visuelle Wahrnehmung



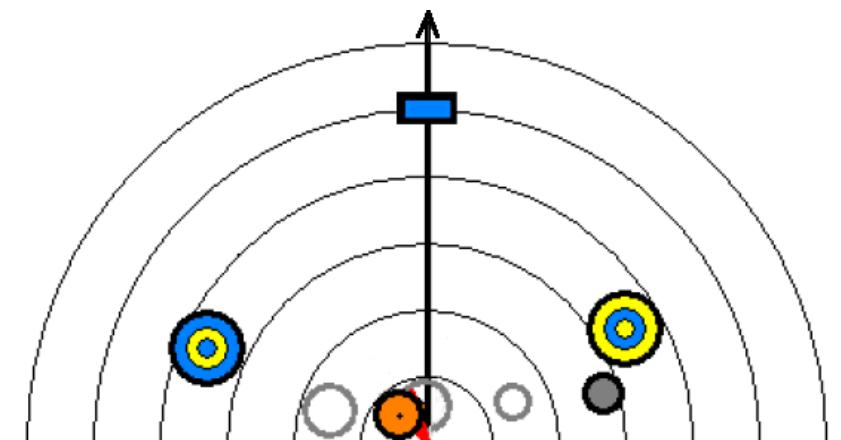
Links



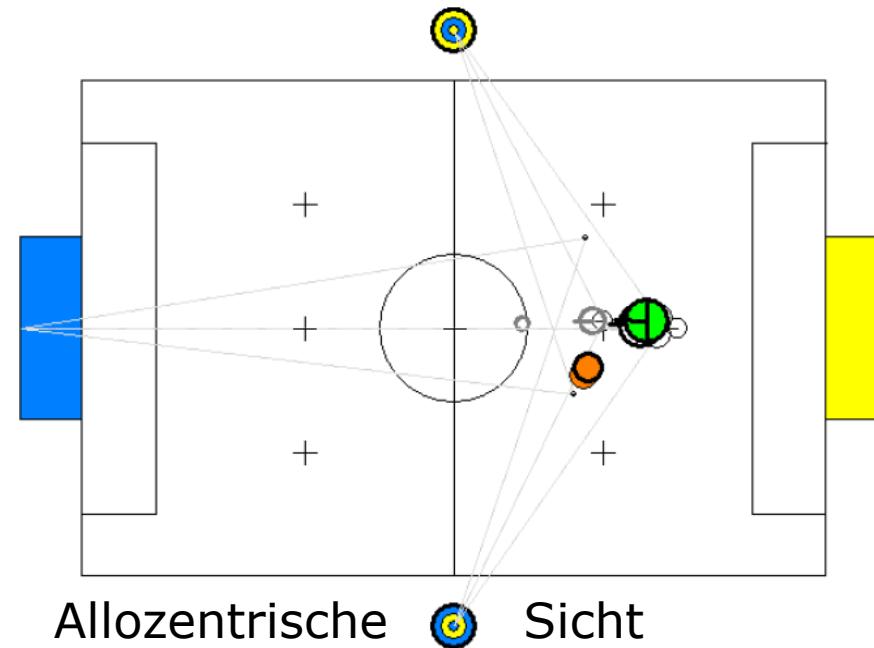
Mitte



Rechts

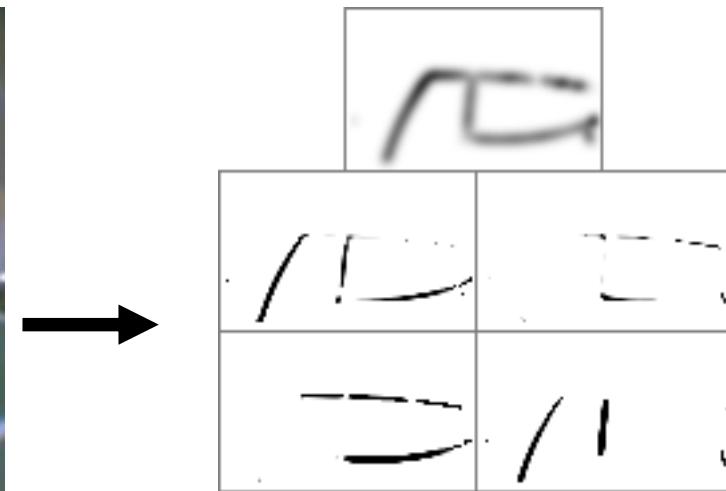


Egozentrische Sicht

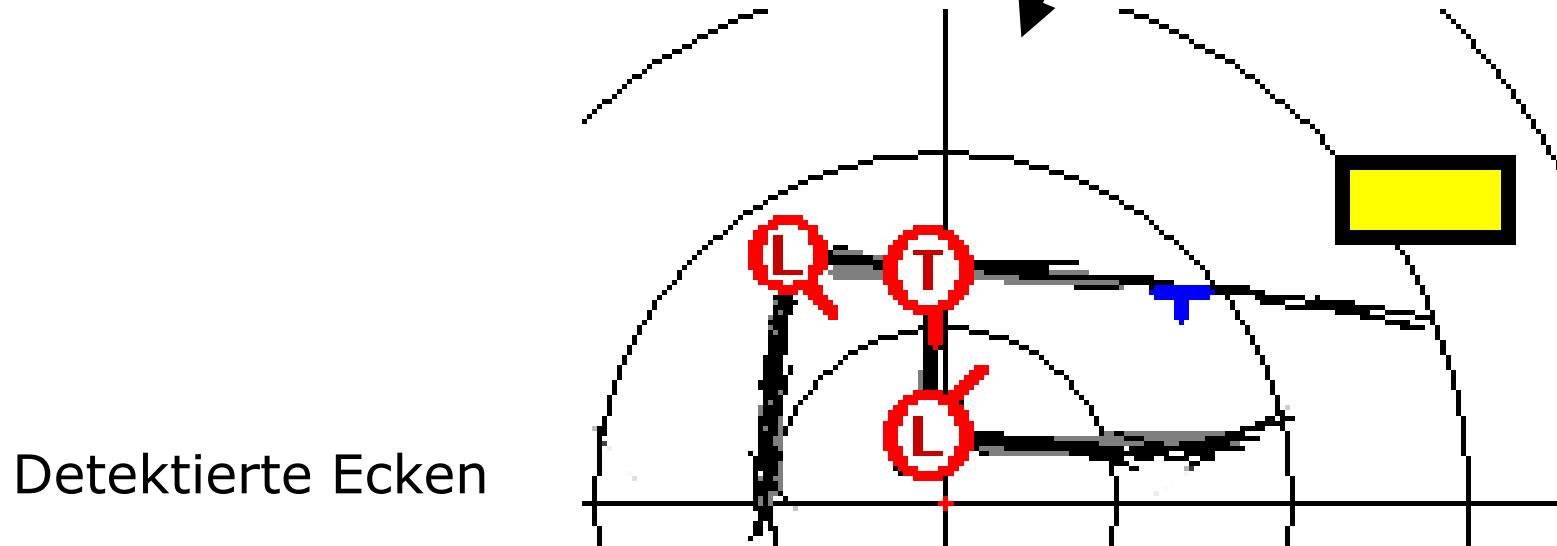


Allozentrische Sicht

Wahrnehmung von Ecken

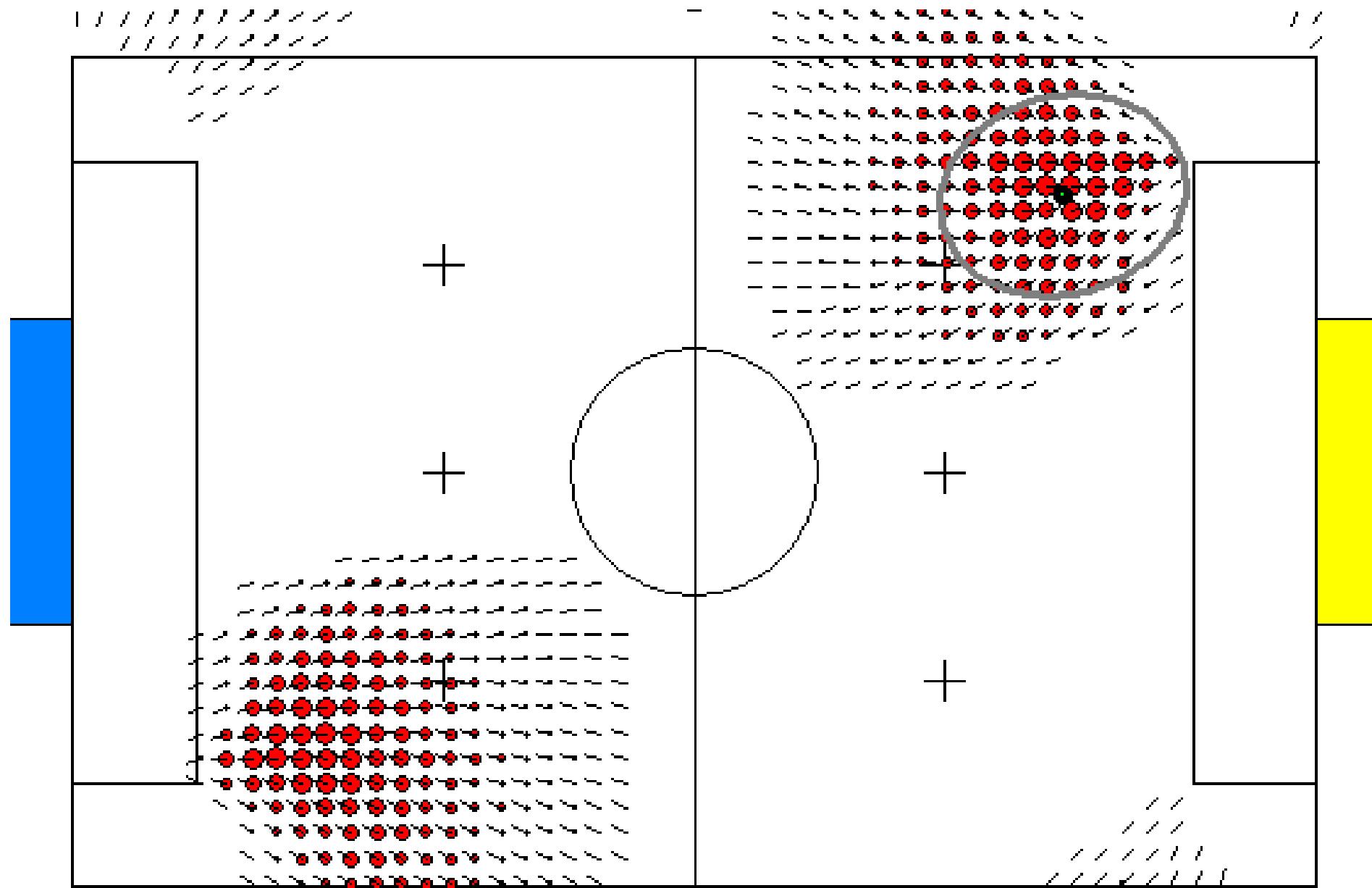


Detektionierte Spielfeldlinien

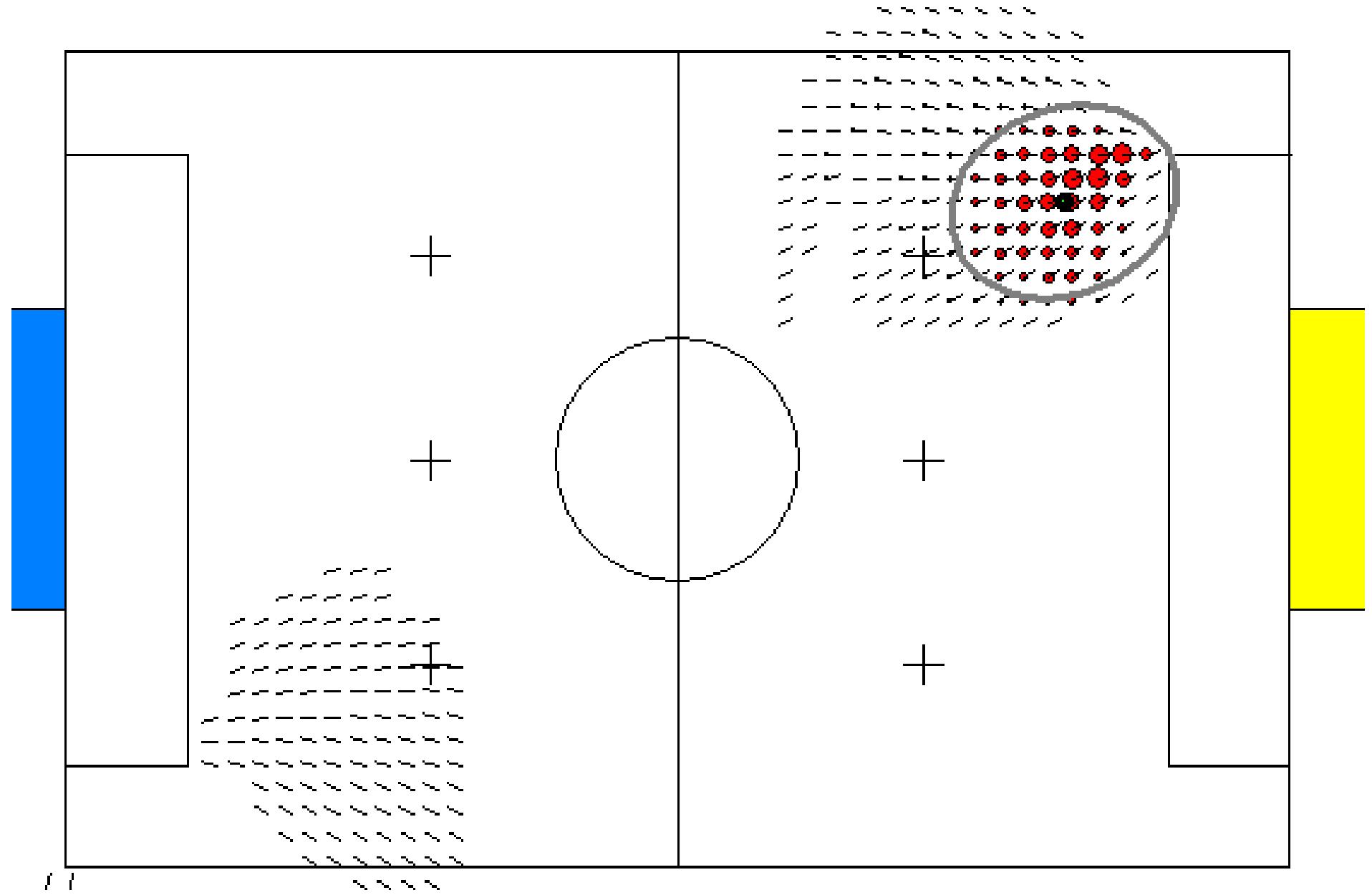


Detektionierte Ecken

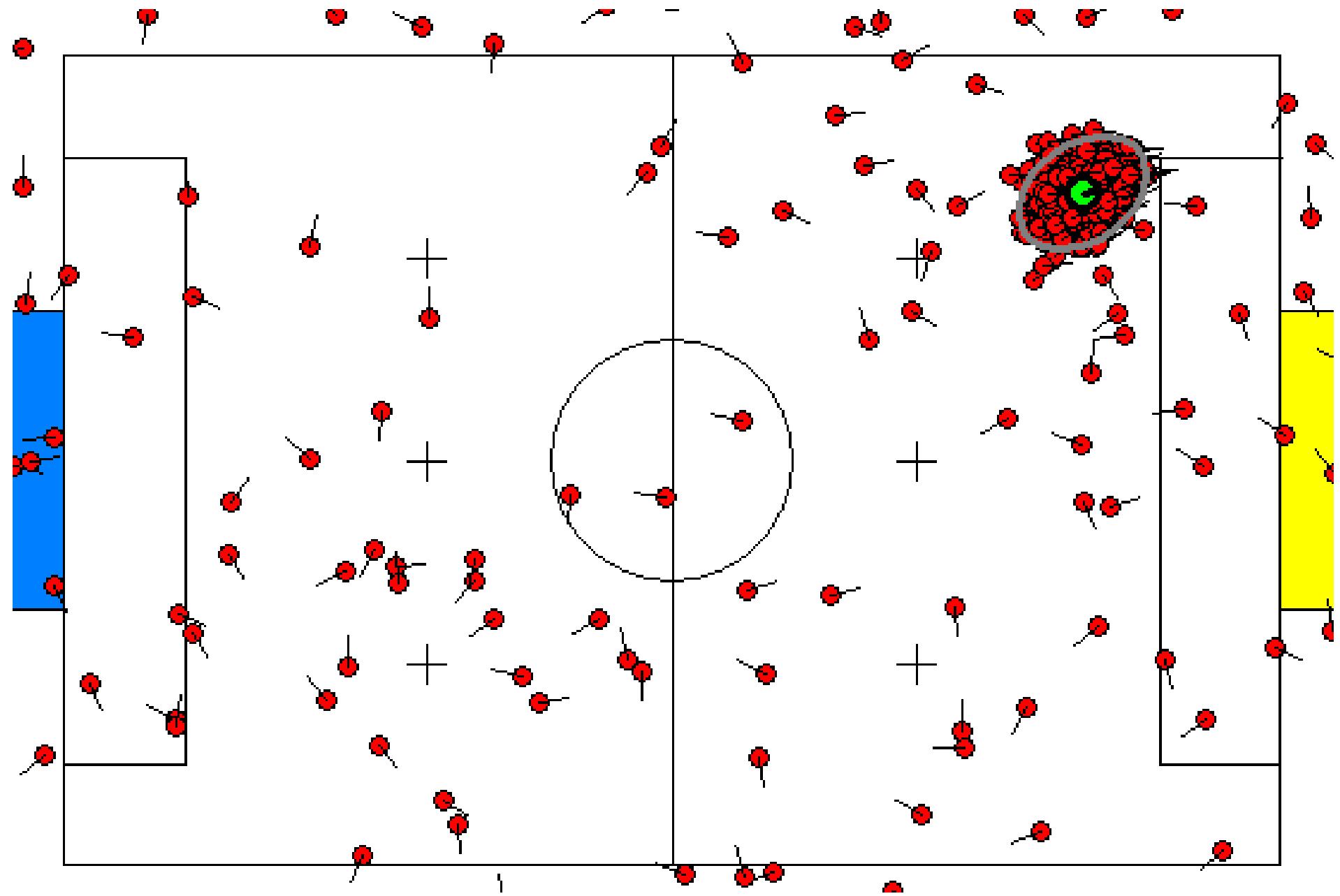
Lokalisierung durch Ecken



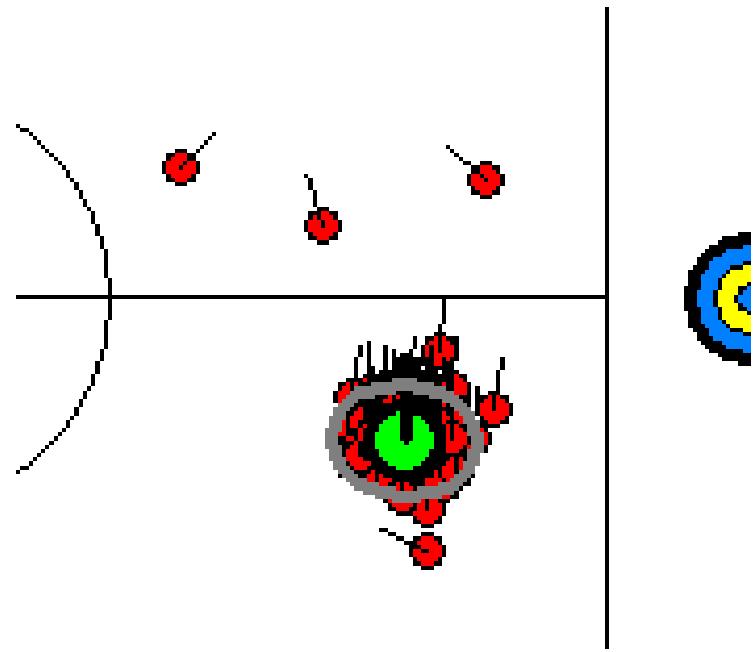
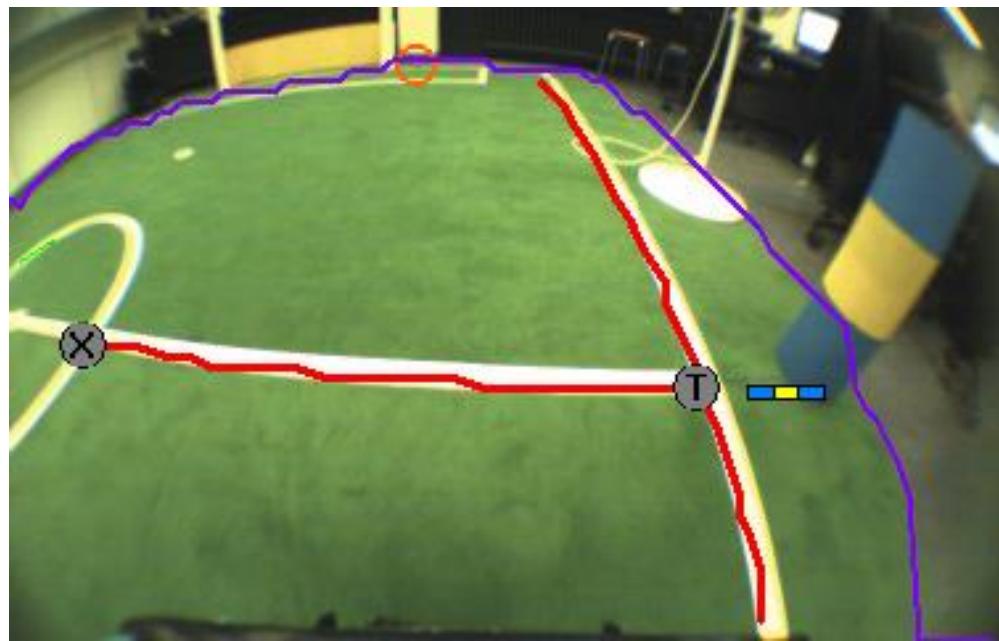
Ecken und ein Tor



Lokalisierung mit Partikel-Filter



Probabilistische Lokalisierung



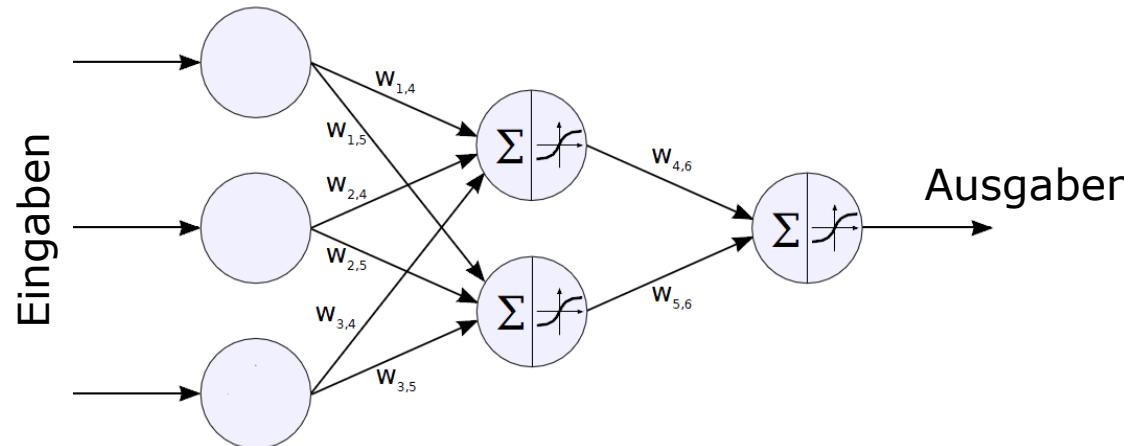
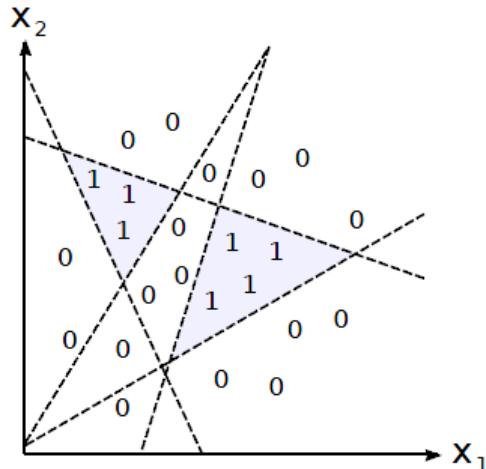
Visuelle Wahrnehmung der Spielsituation



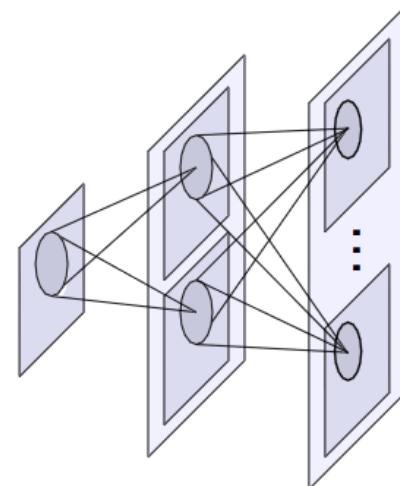
[Farazi & Behnke, RoboCup 2016]

Neuronale Netzwerke

- Graph einfacher Prozessorelemente
 - Gewichtete Summen
 - Nichtlinearitäten

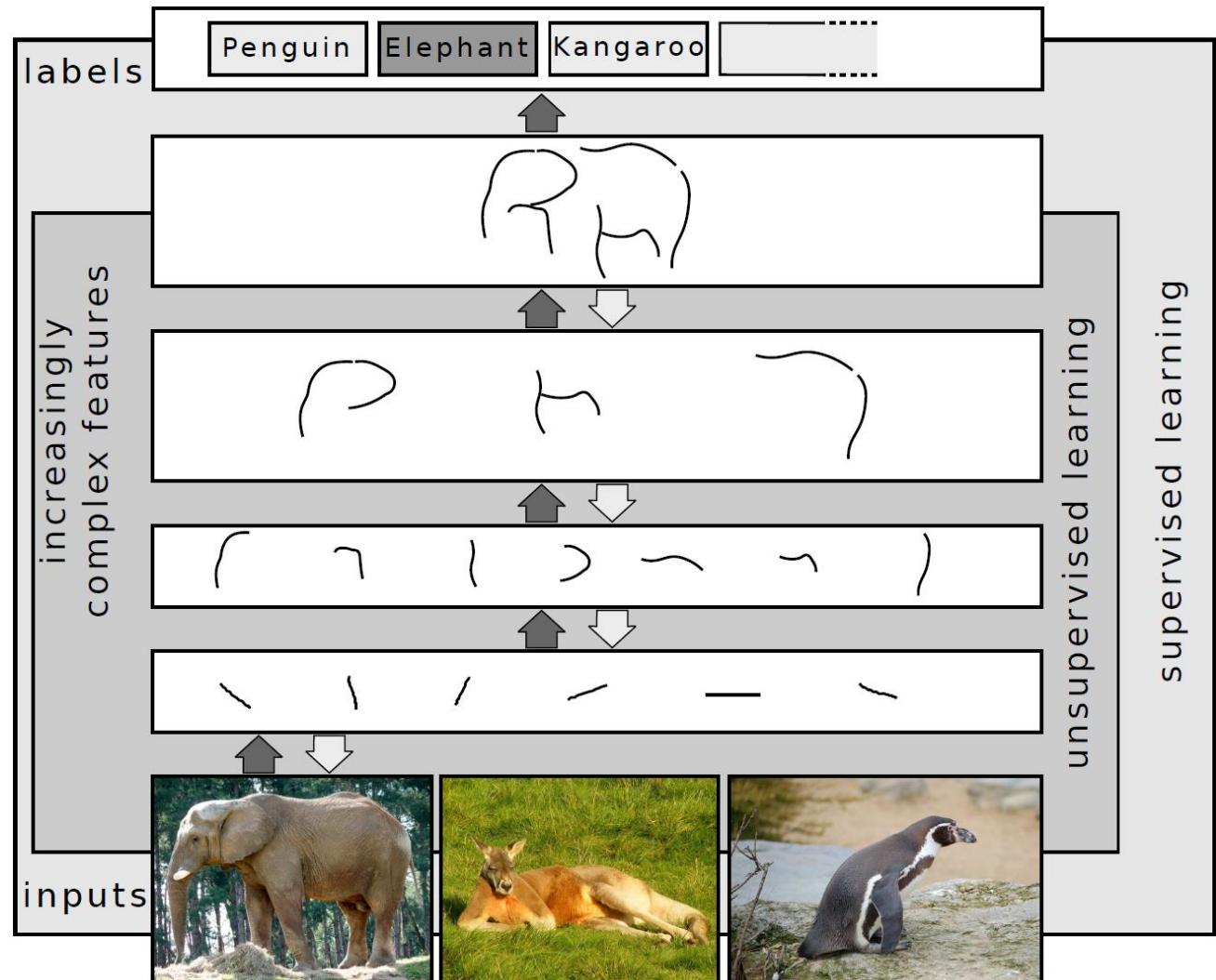


- Hyperebenen im Eingaberaum
- Trennung von Kategorien
- Training durch Backpropagation
- Konvolutionale Neuronale Netze:
Merkmalskarten, lokale Verbindungsstruktur,
mehrfach genutzte Gewichte, Hierarchie



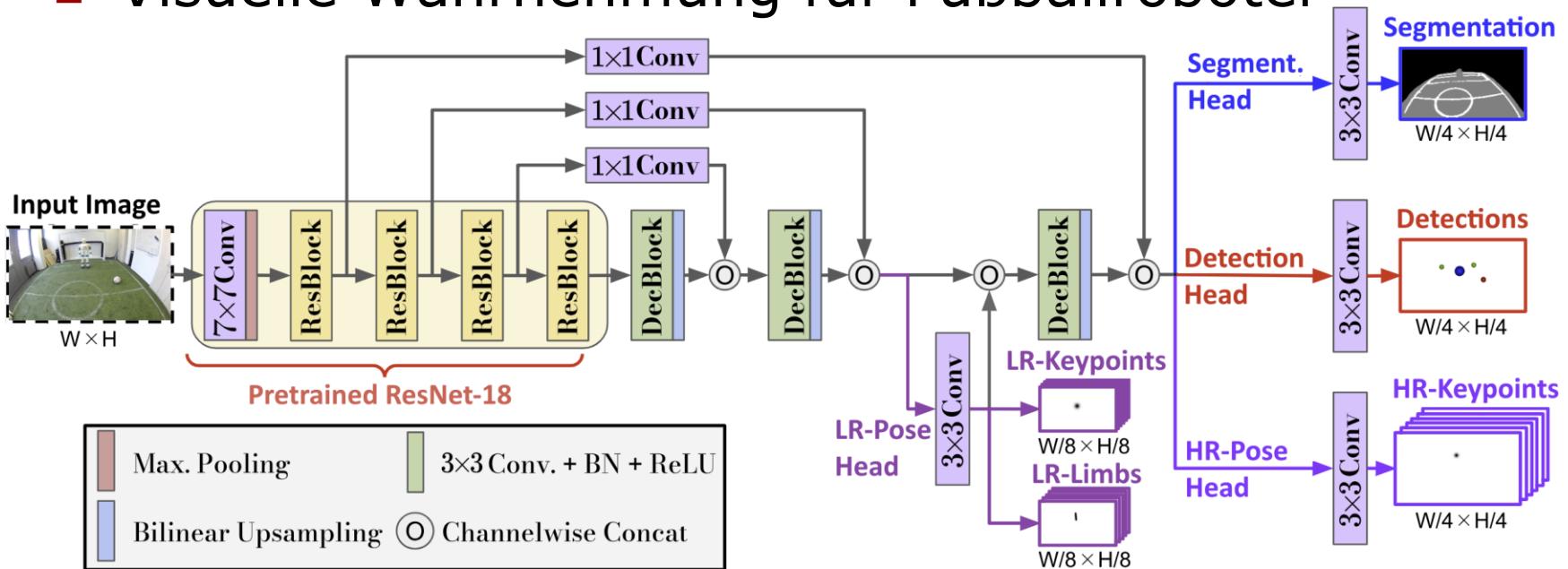
Deep Learning

- Lernen immer abstrakterer Repräsentationen
- Kompositionalität

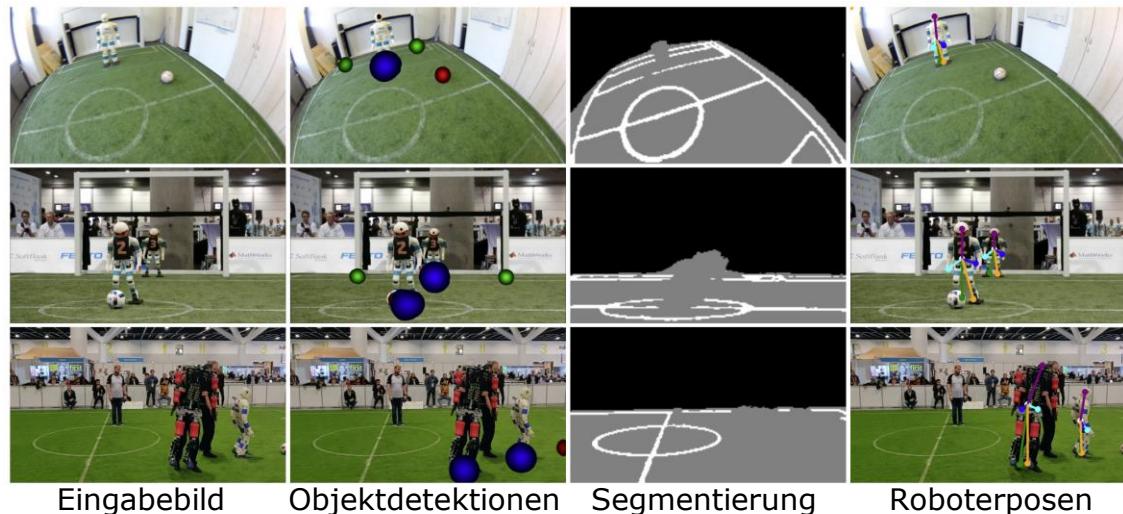


Beispiel: NimbRoNet3

■ Visuelle Wahrnehmung für Fußballroboter

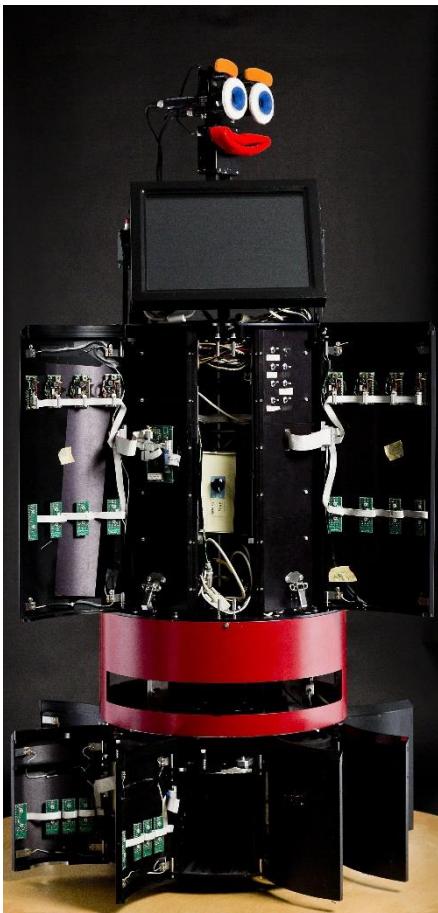


- Enkoder-Dekoder-Netzwerk mit drei Ausgaben:
 - Semantische Segmentierung
 - Objektdetektion
 - Roboterpose (Gelenke)
- Inferenz durch GPU



Lokalisierung für Mobile Radroboter

- Rhino, Uni Bonn



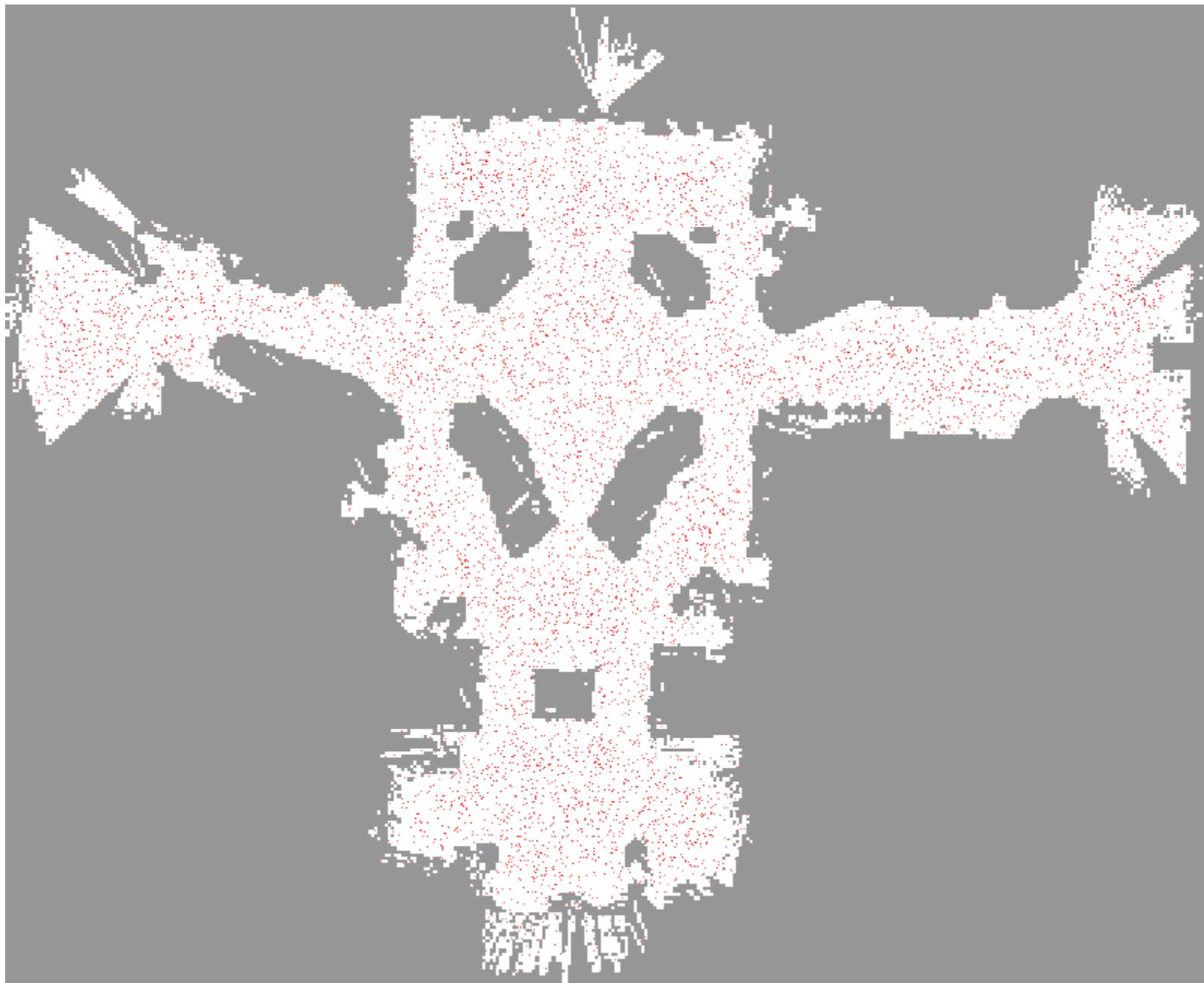
[Burgard et al. 1998]

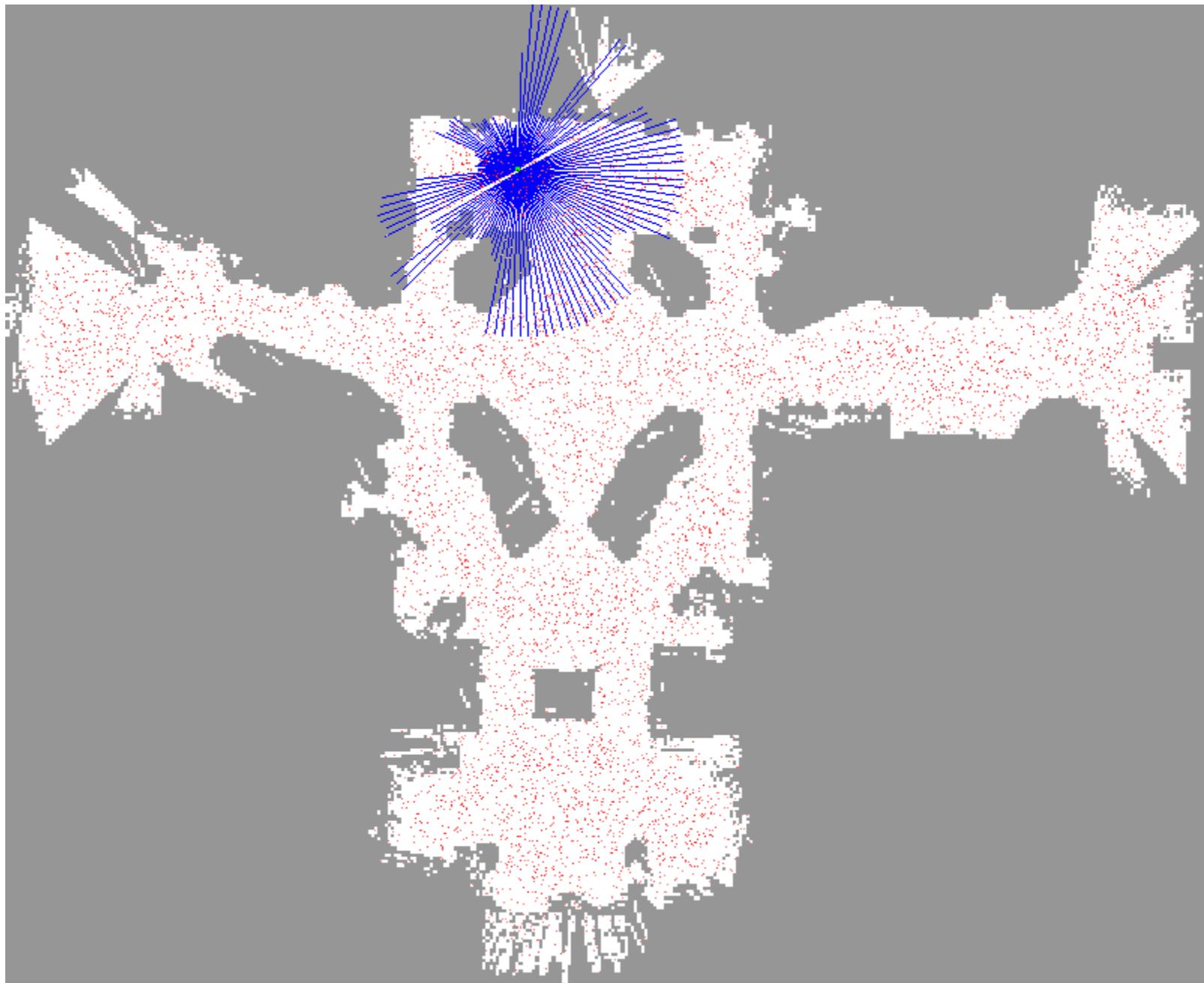
Bild: Deutsches Museum | Eric Lichtenscheidt

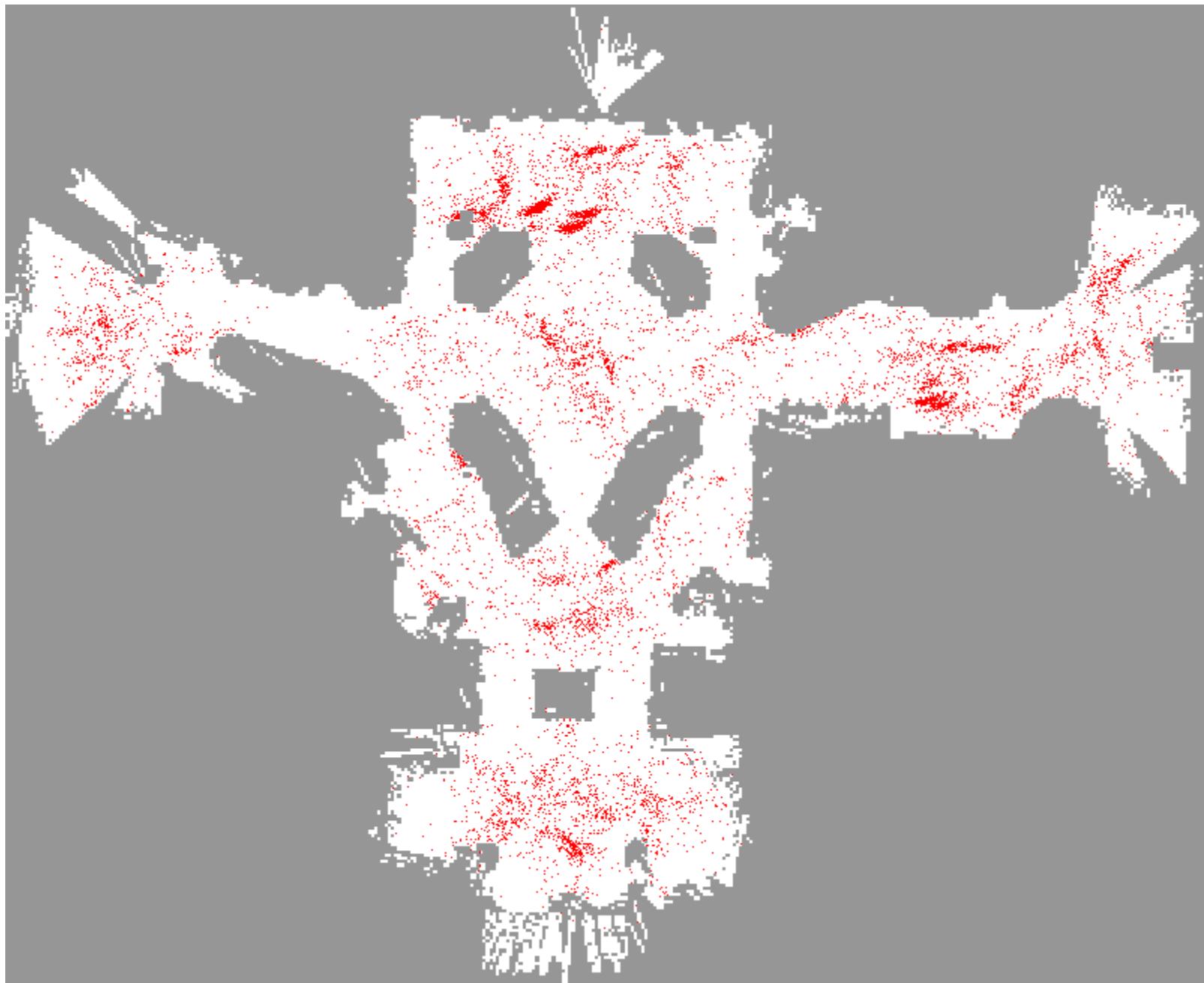
- Minerva, CMU

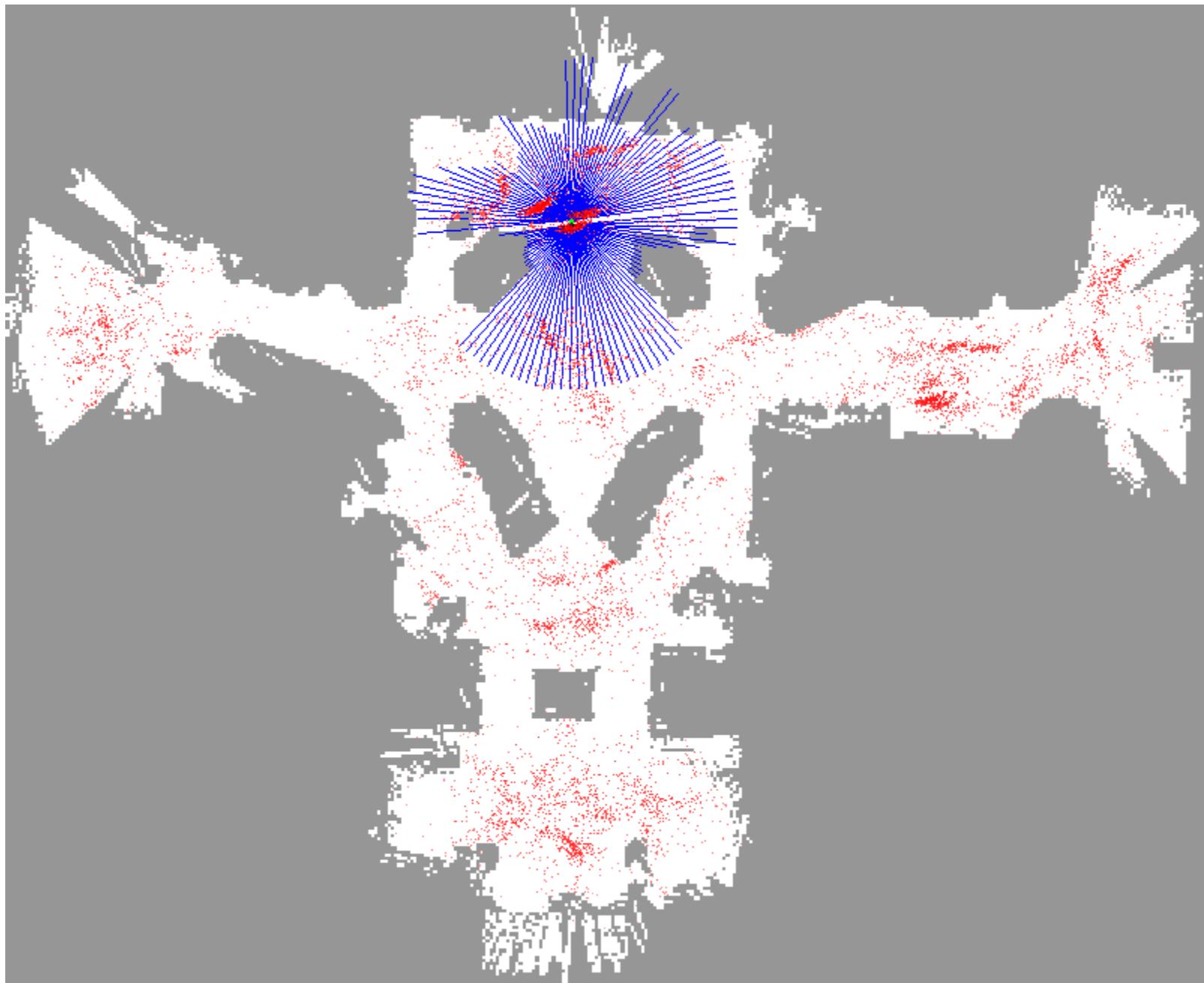


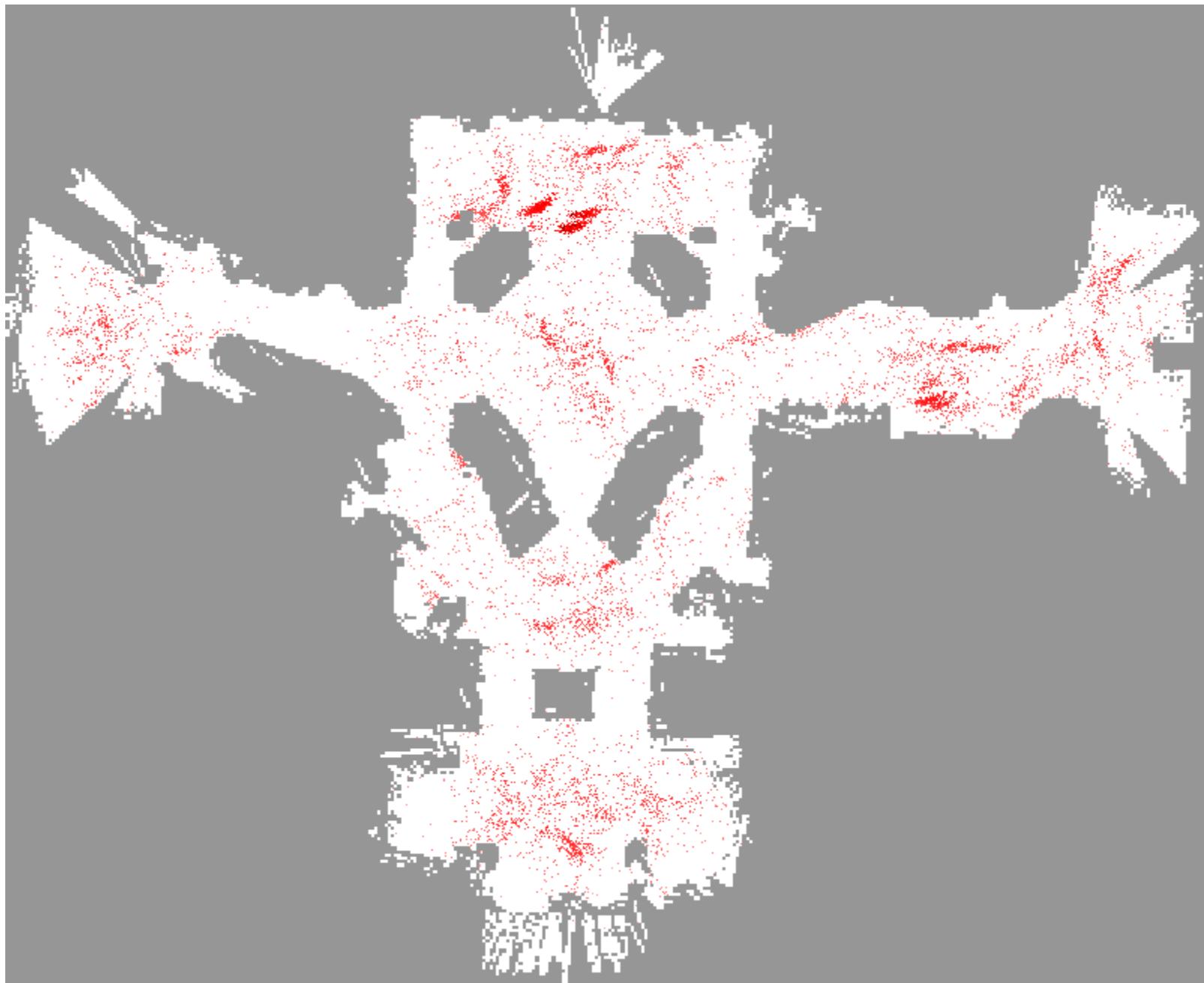
[Thrun et al. 1999]

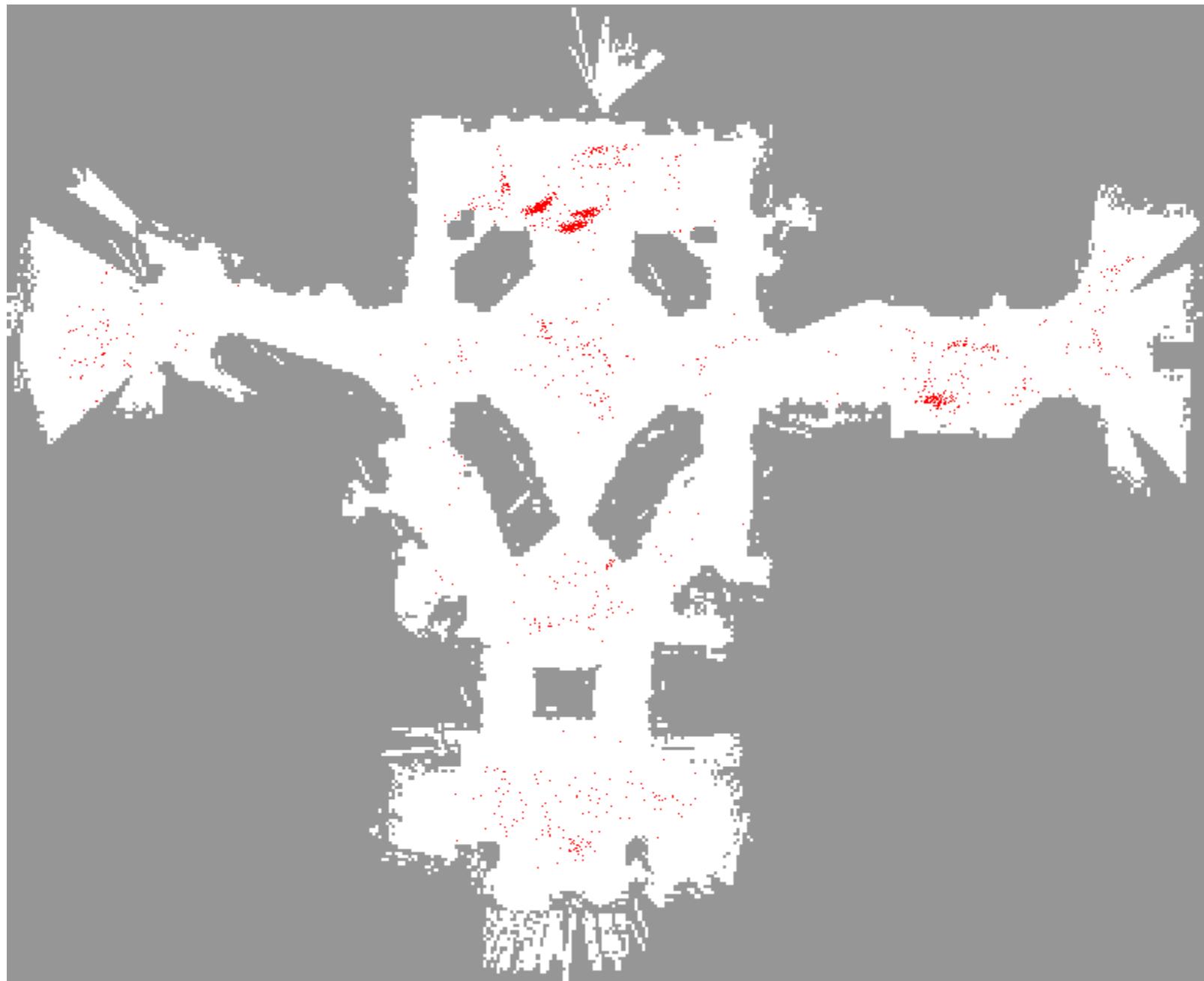


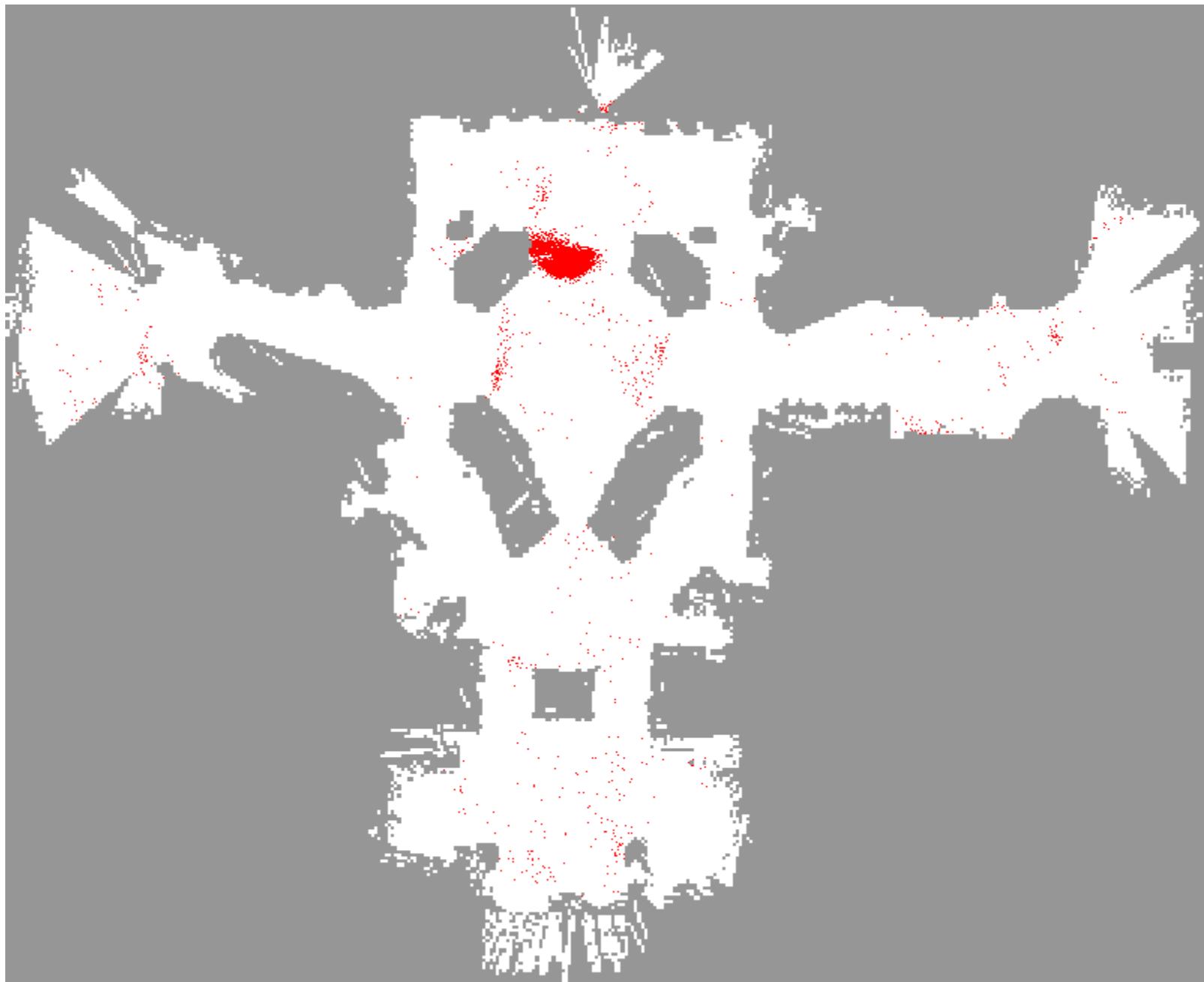


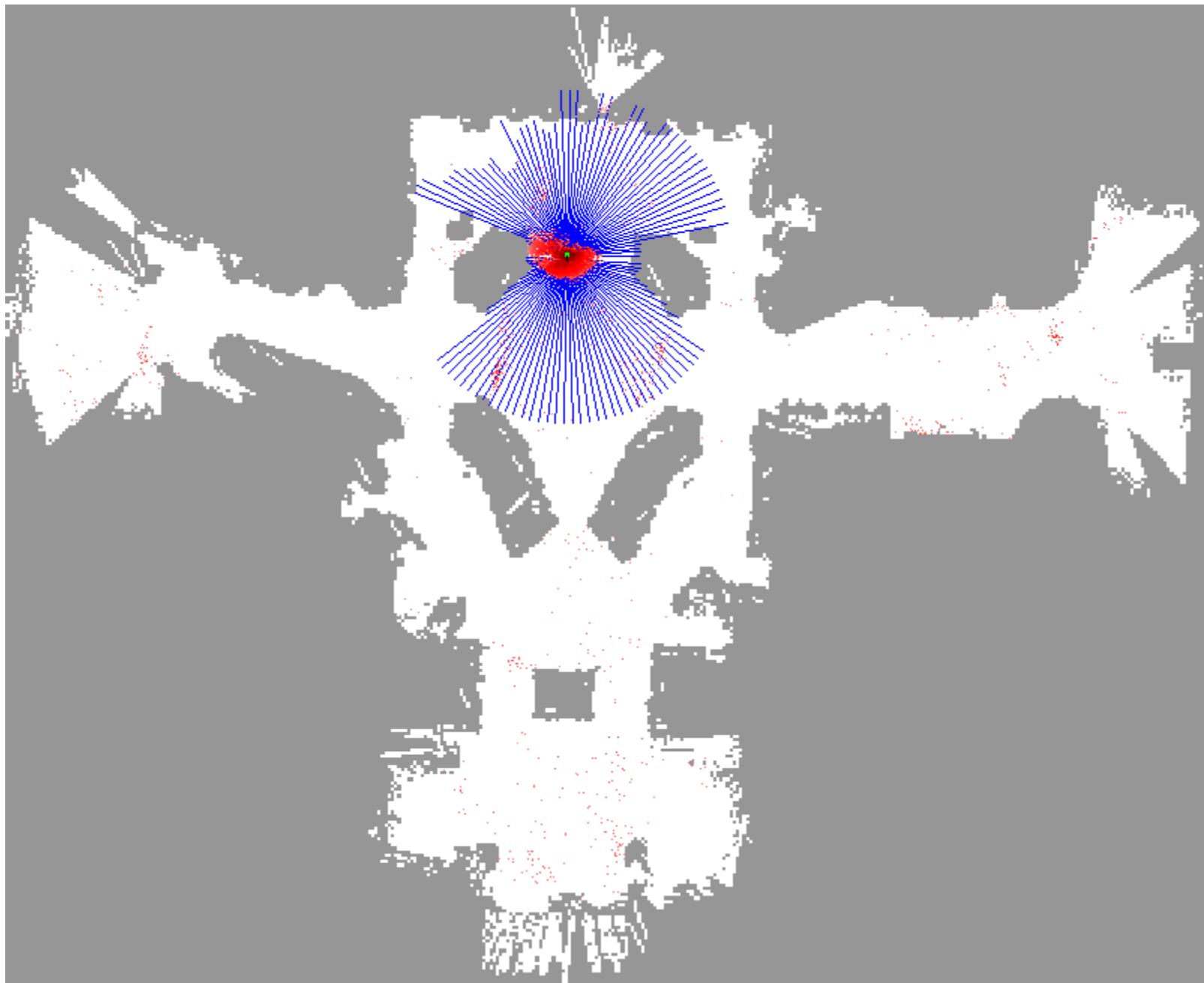


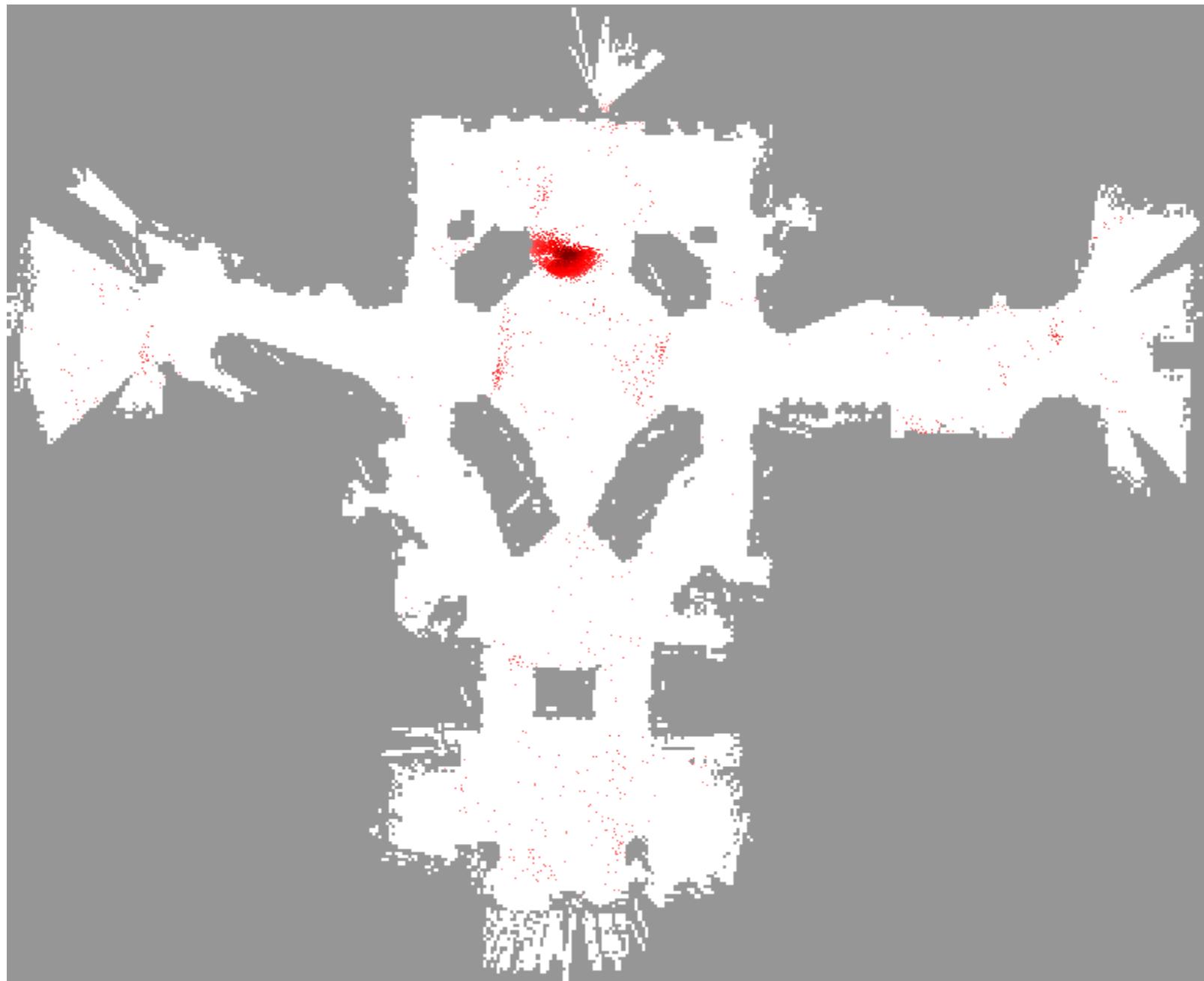


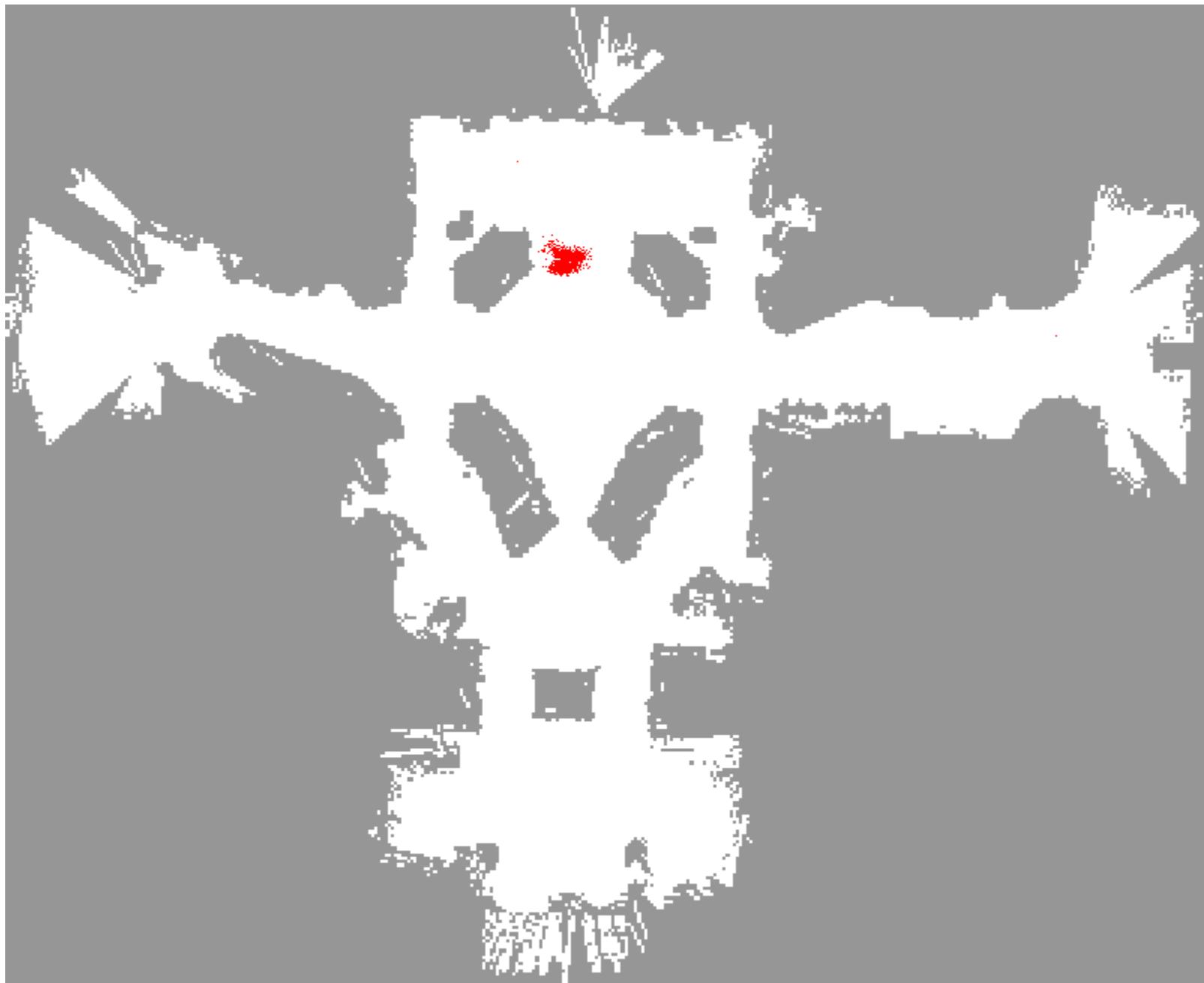


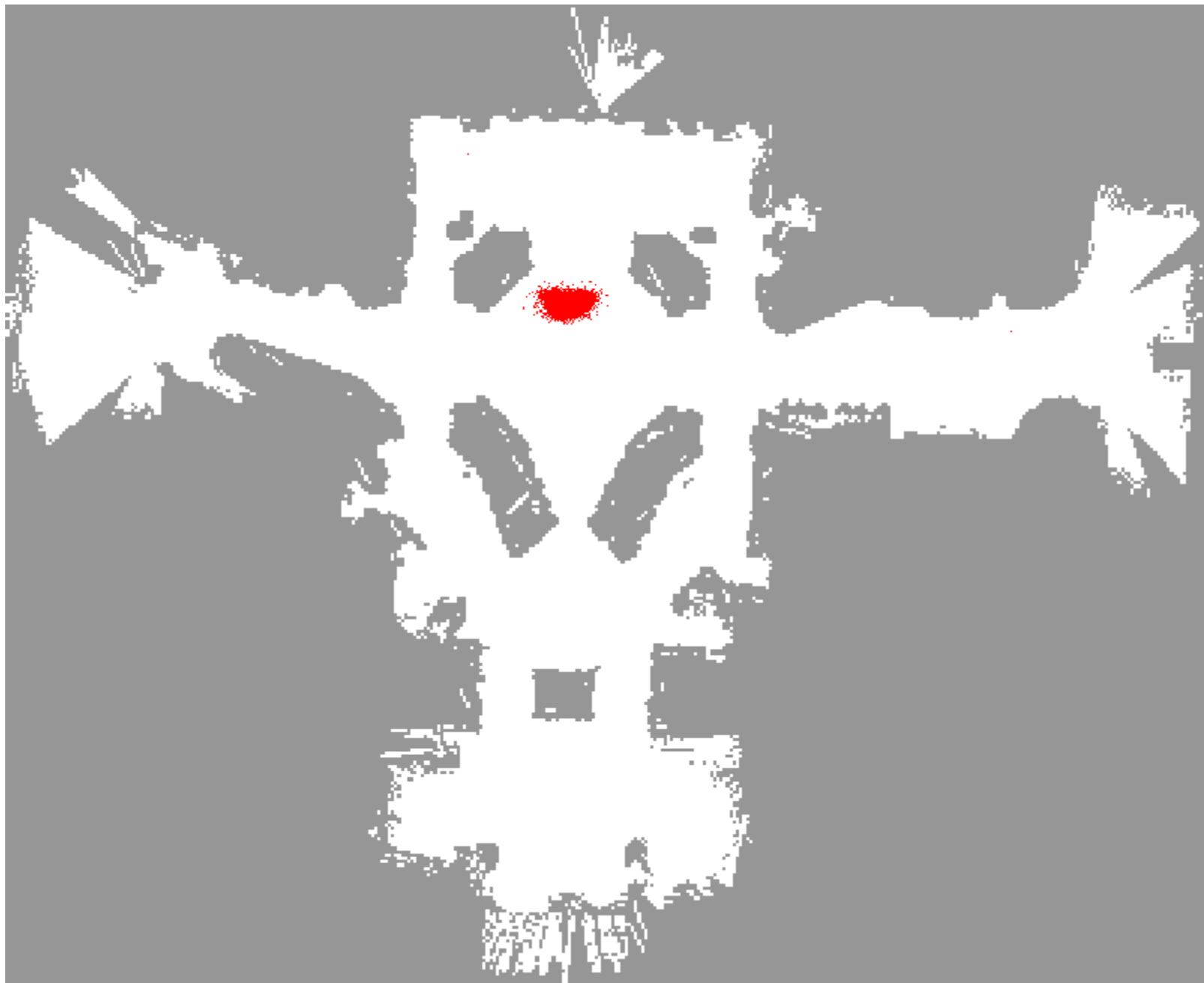


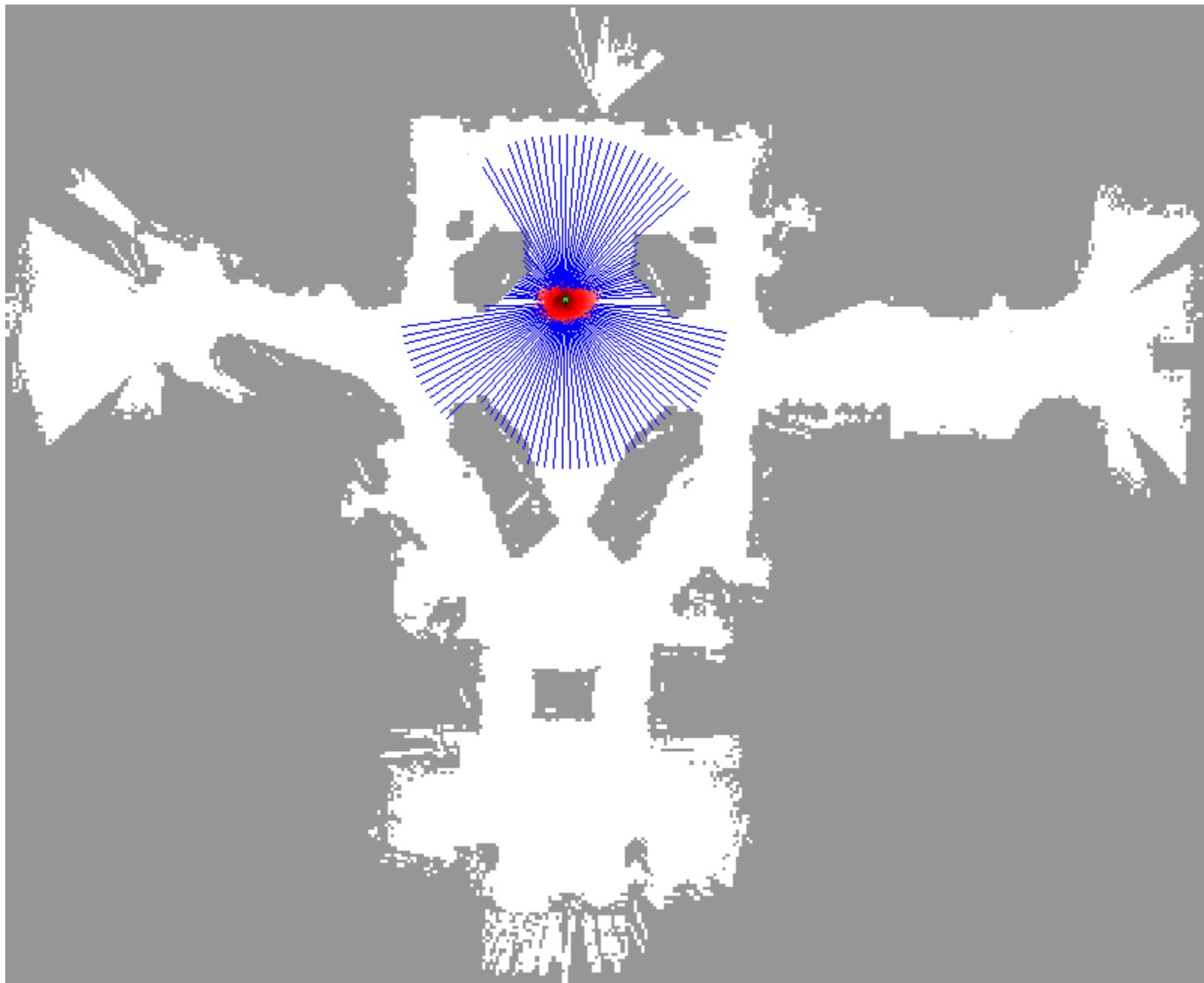


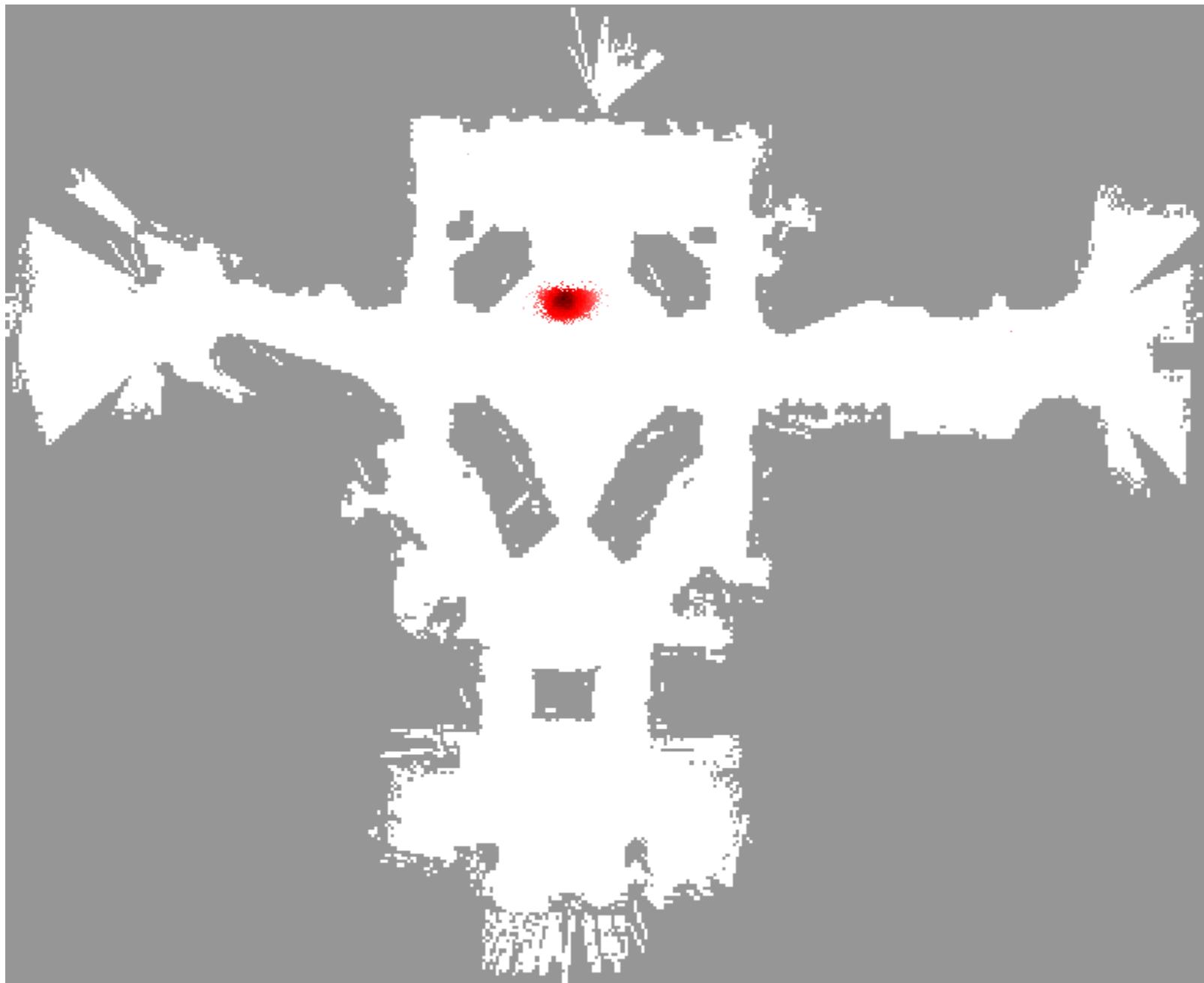


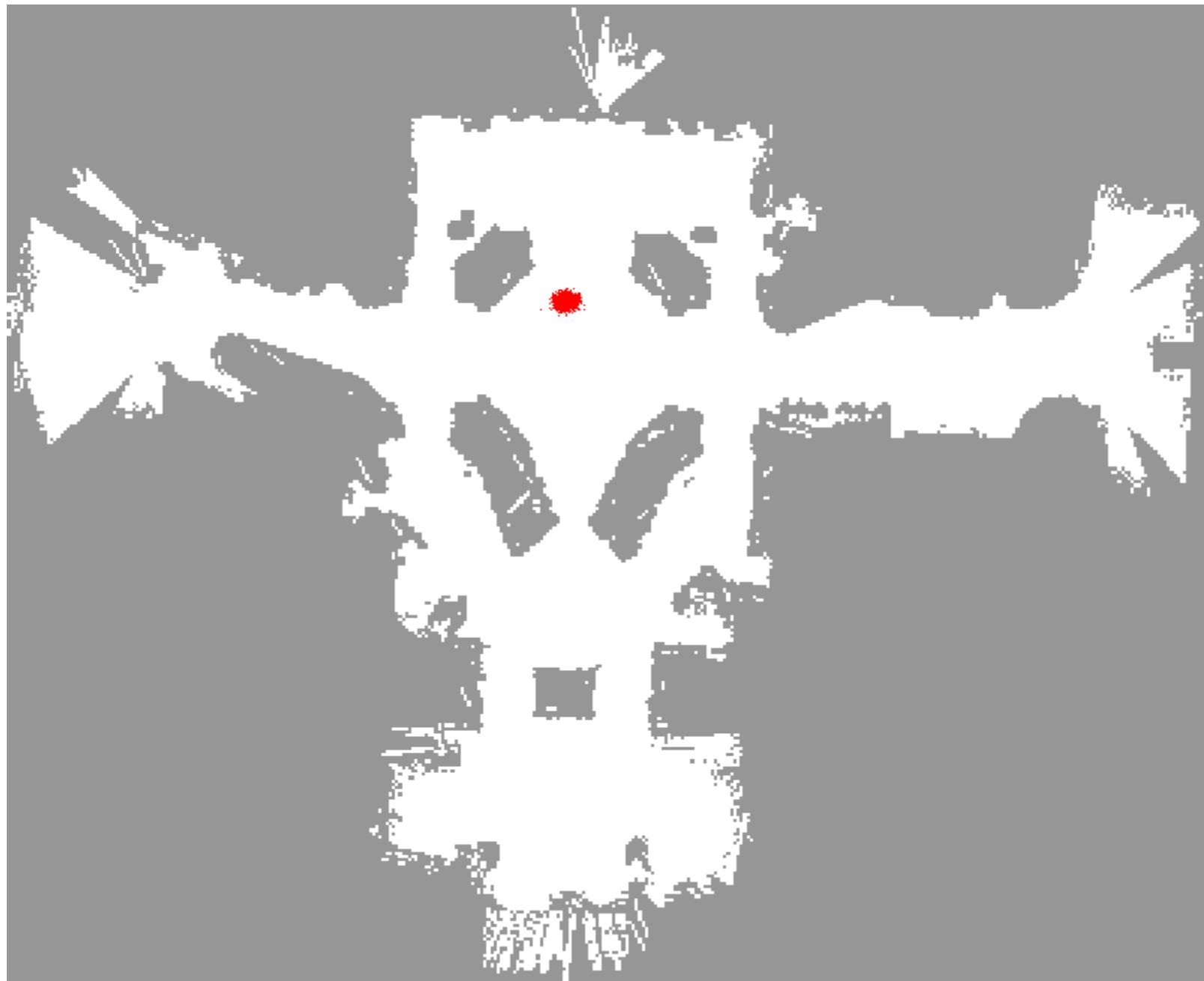


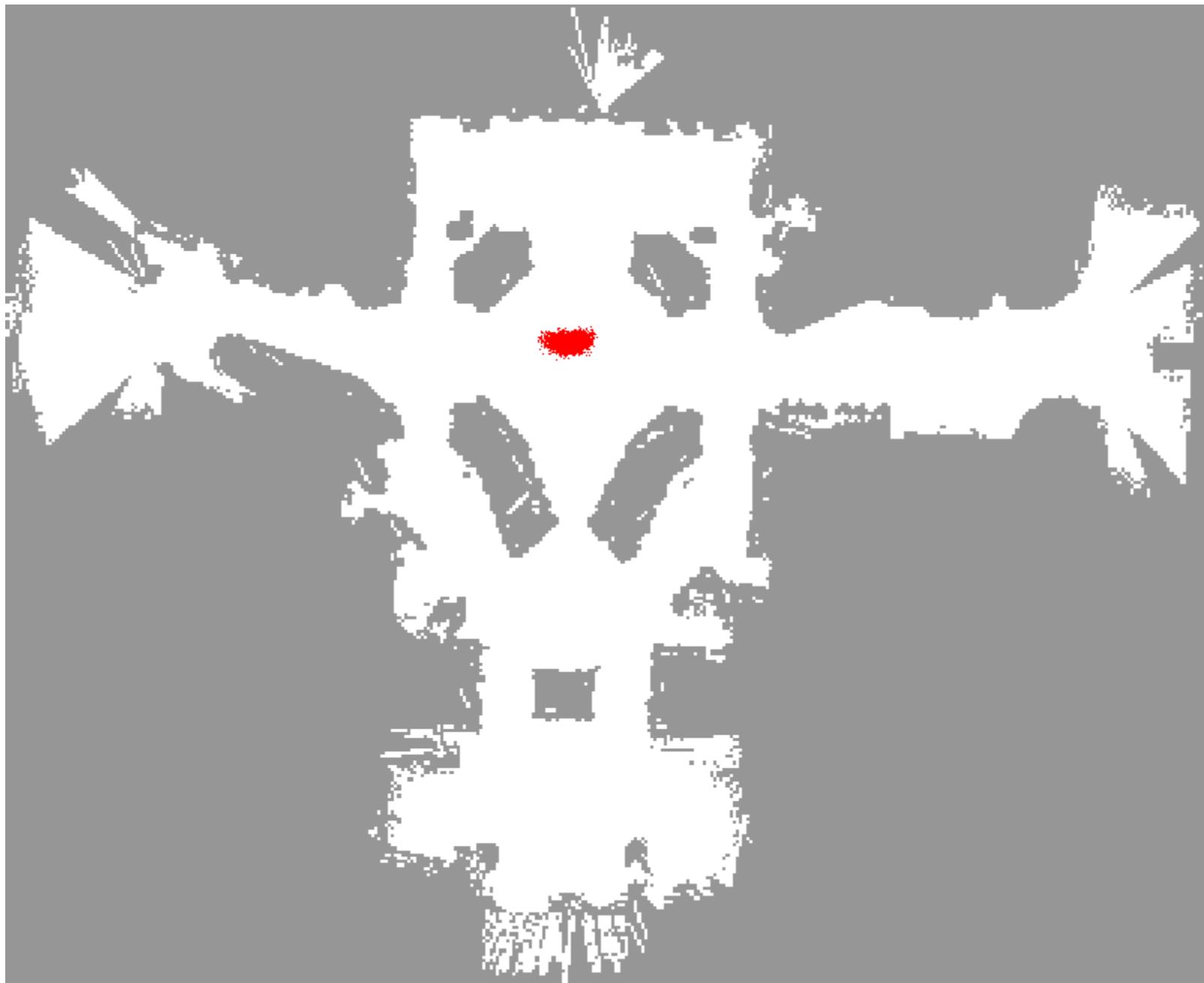


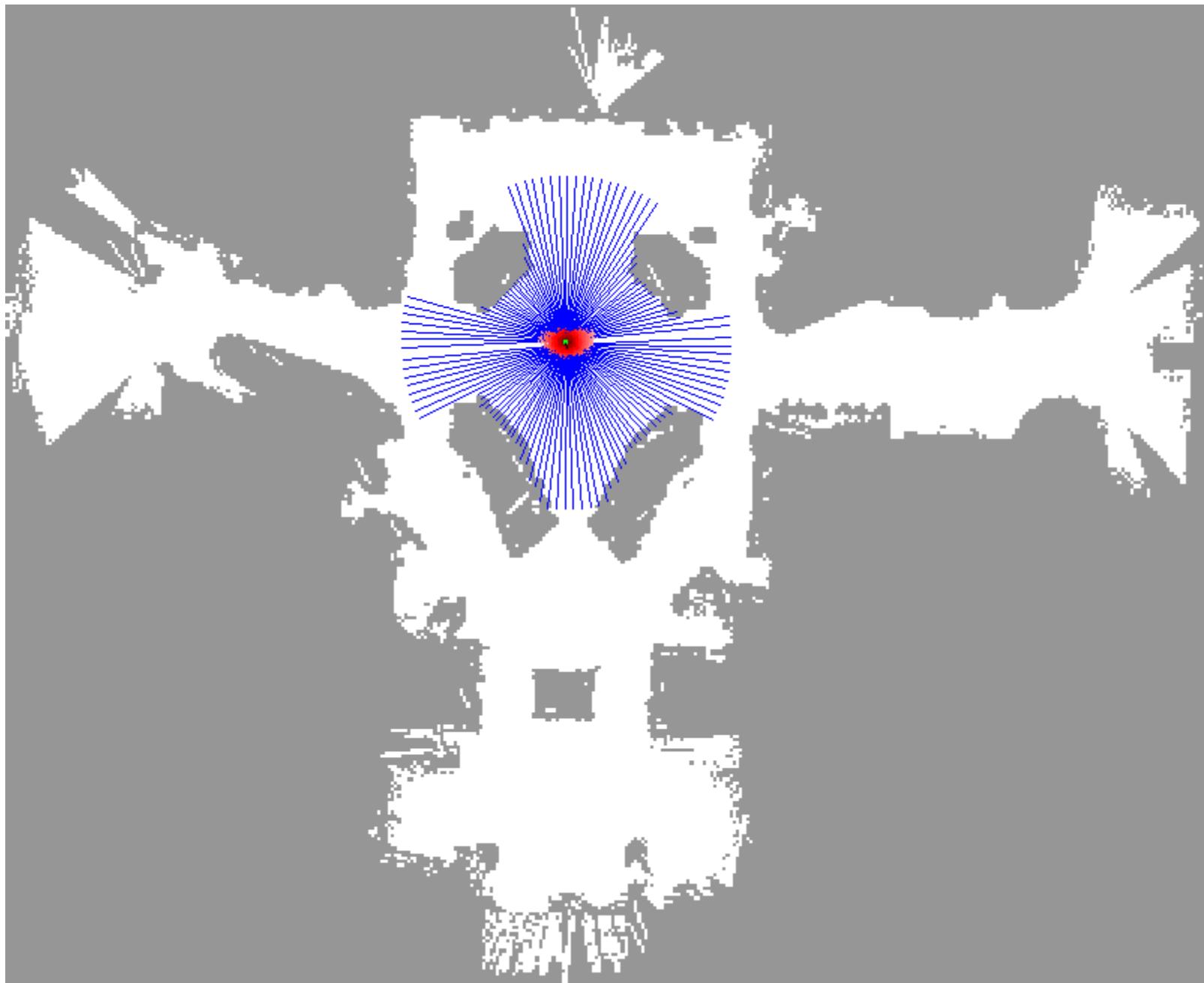


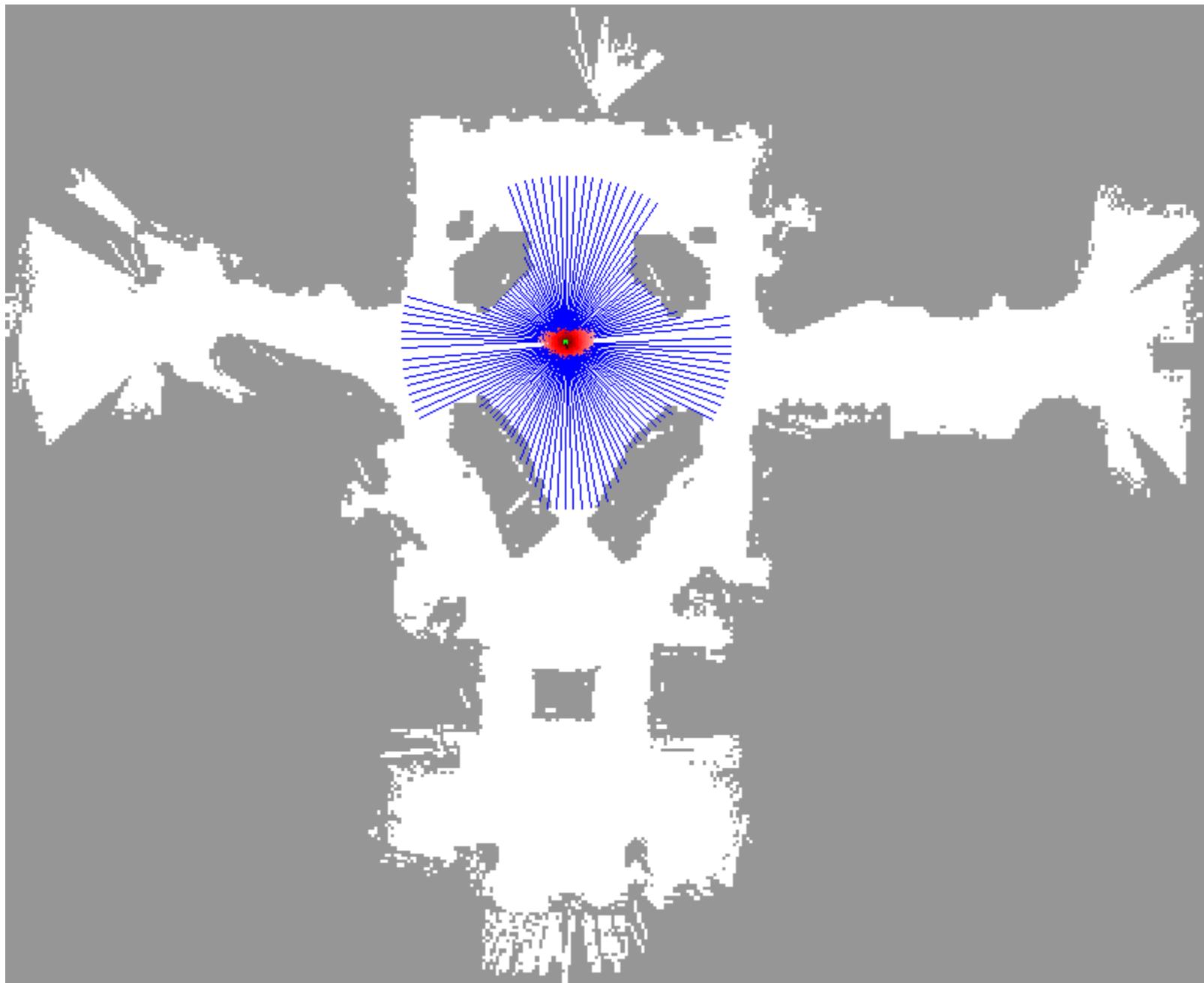




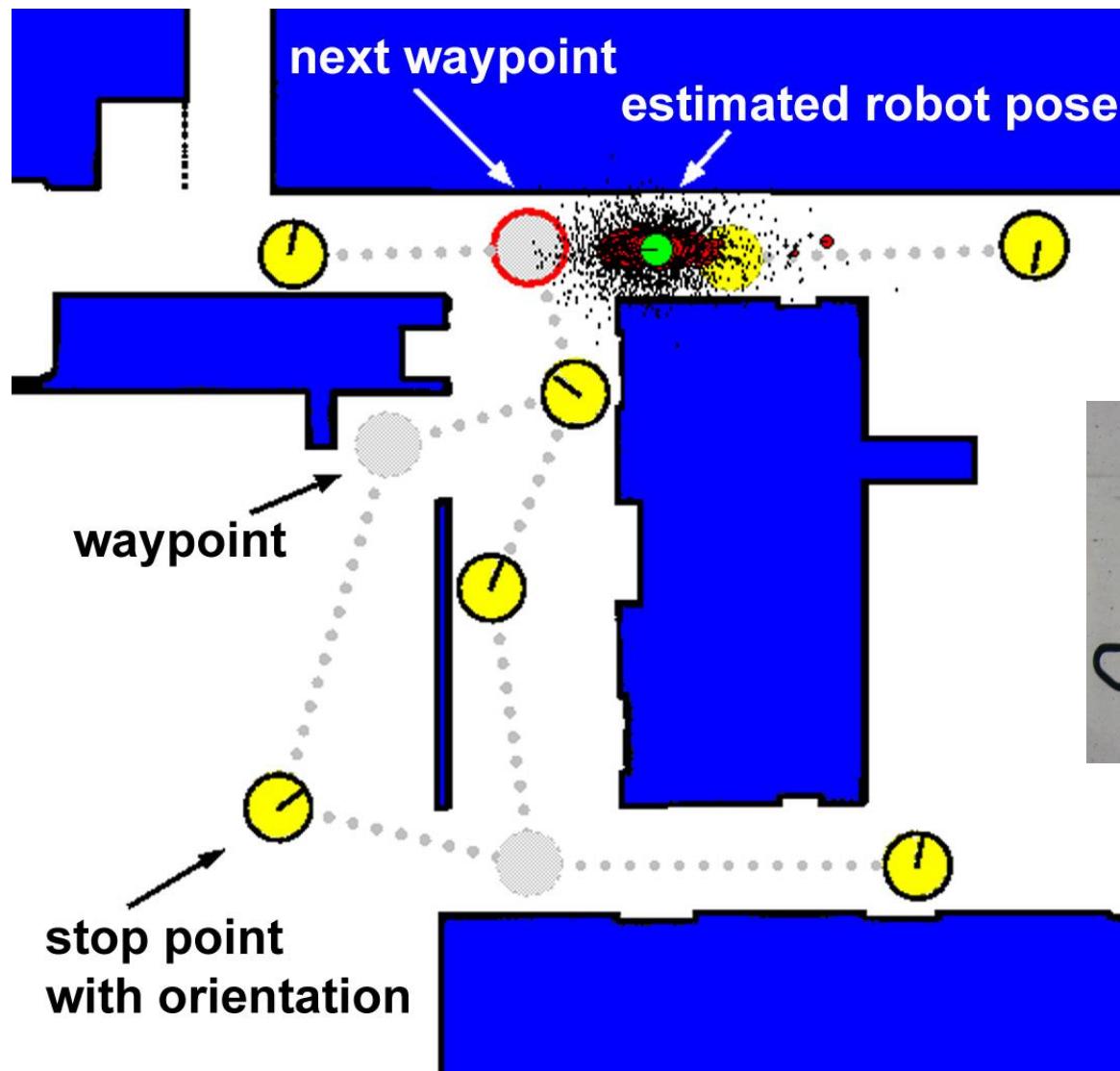






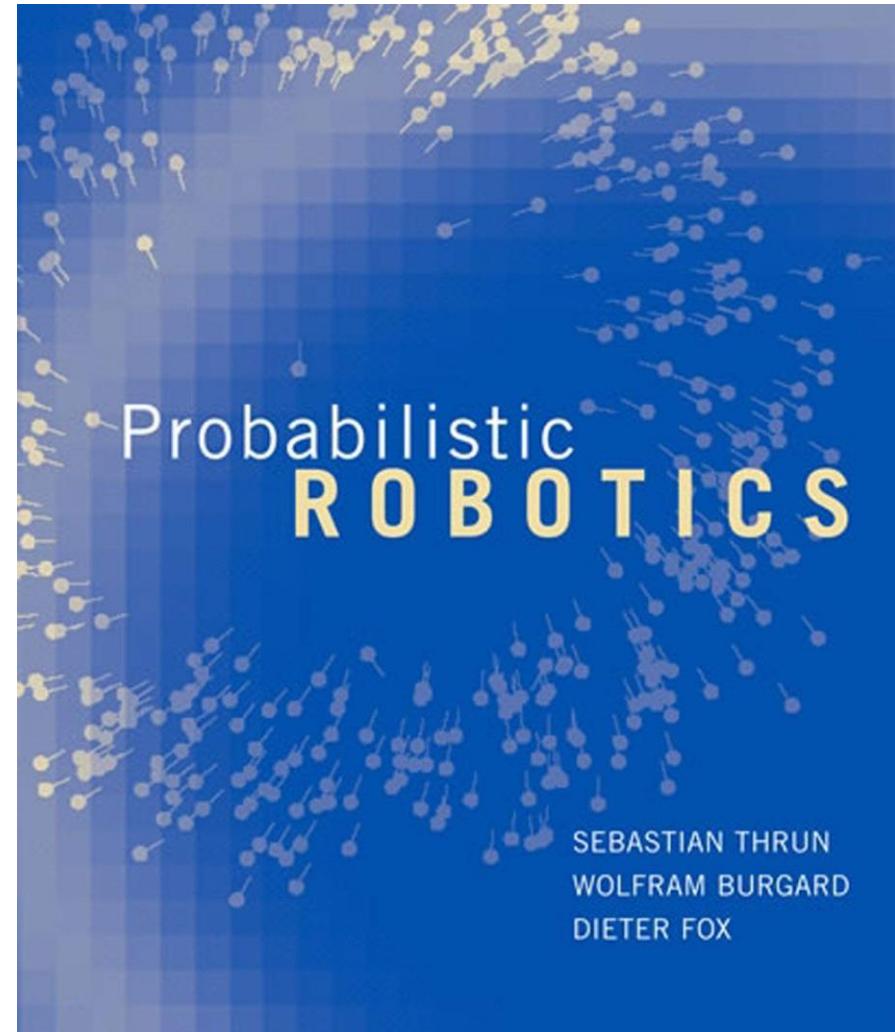


Lokalisierung für Kommunikationsroboter

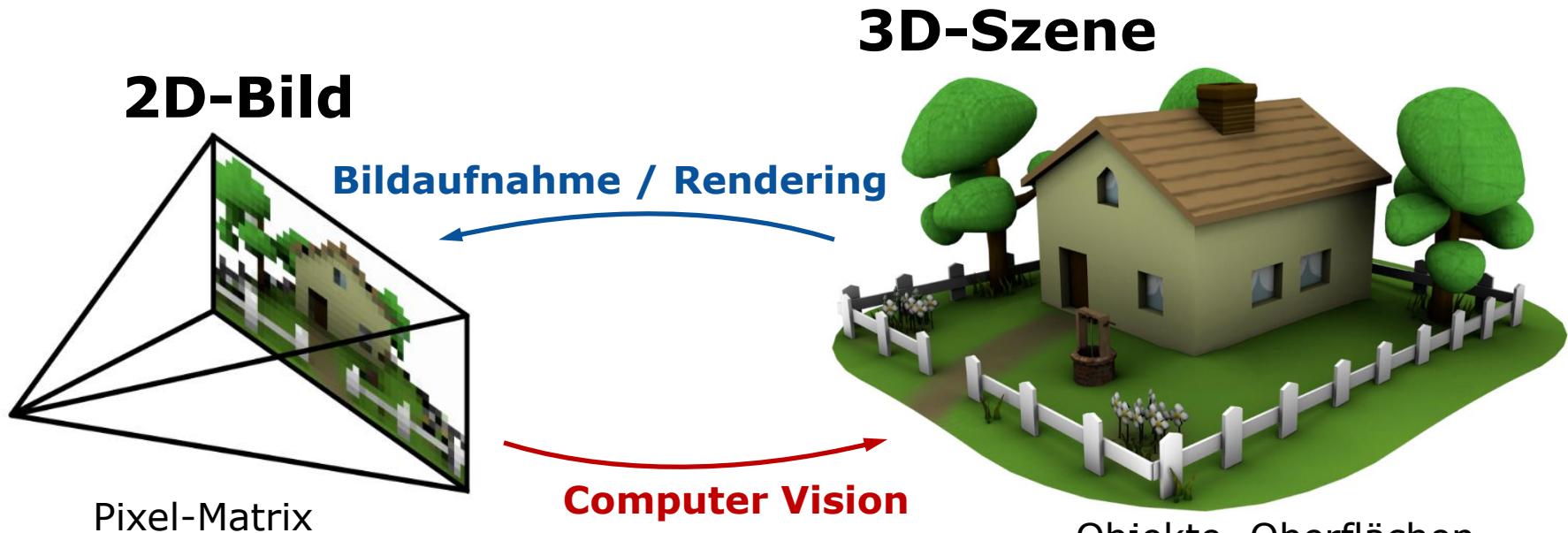


Wird in Master-Vorlesung Cognitive Robotics behandelt

- Grundlagen wurden in Bonn gelegt:



Computer Vision



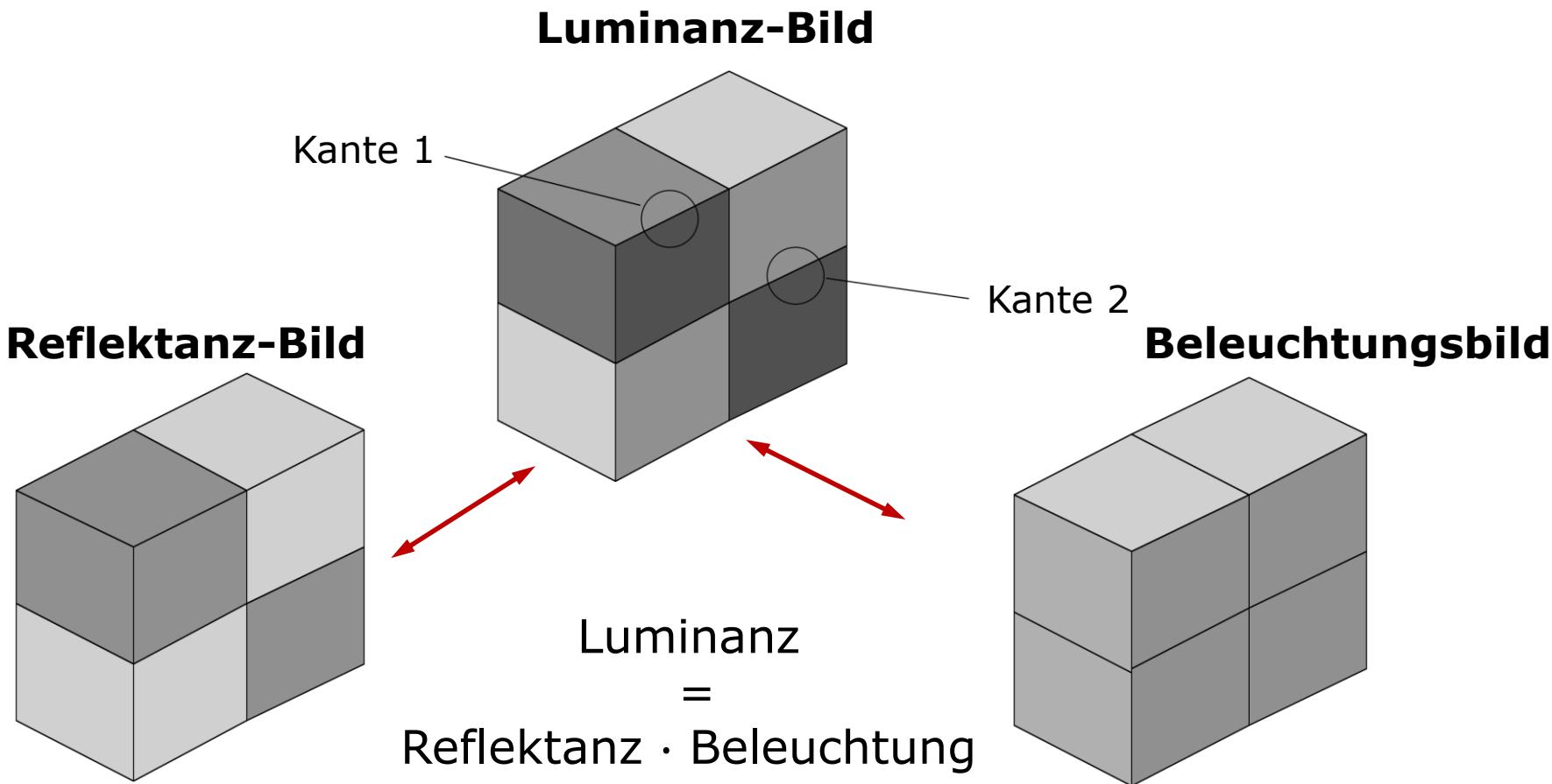
Pixel-Matrix

217	191	252	255	239
102	80	200	146	138
159	94	91	121	138
179	106	136	85	41
115	129	83	112	67
94	114	105	111	89

- Objekte, Oberflächen
- Geometrie, 3D-Pose
- Form, Aussehen, Materialeigenschaften
- Semantik

- Computer Vision ist ein schlecht gestelltes, inverses Problem:
 - Viele 3D-Szenen erzeugen das selbe 2D Bild
→ Weitere Nebenbedingungen (Weltwissen) erforderlich

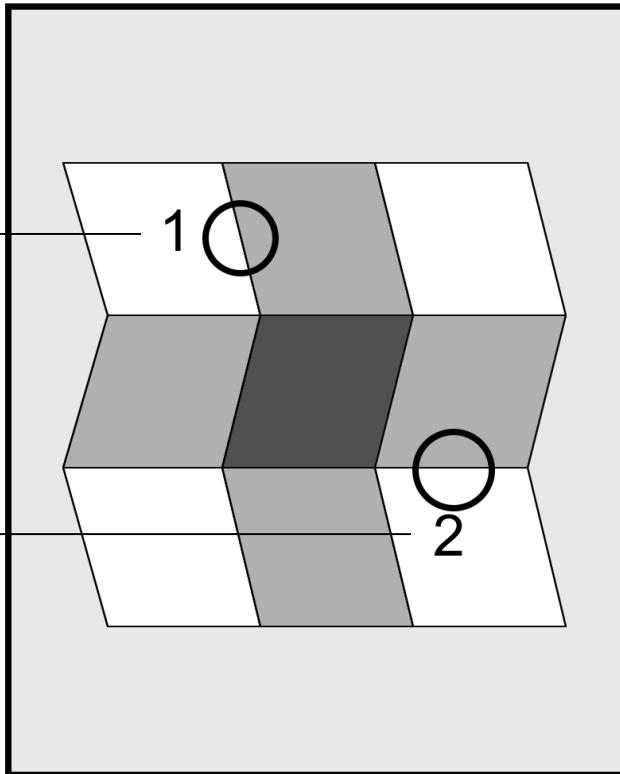
Luminanz, Reflektanz und Beleuchtung



Luminanz, Reflektanz und Beleuchtung

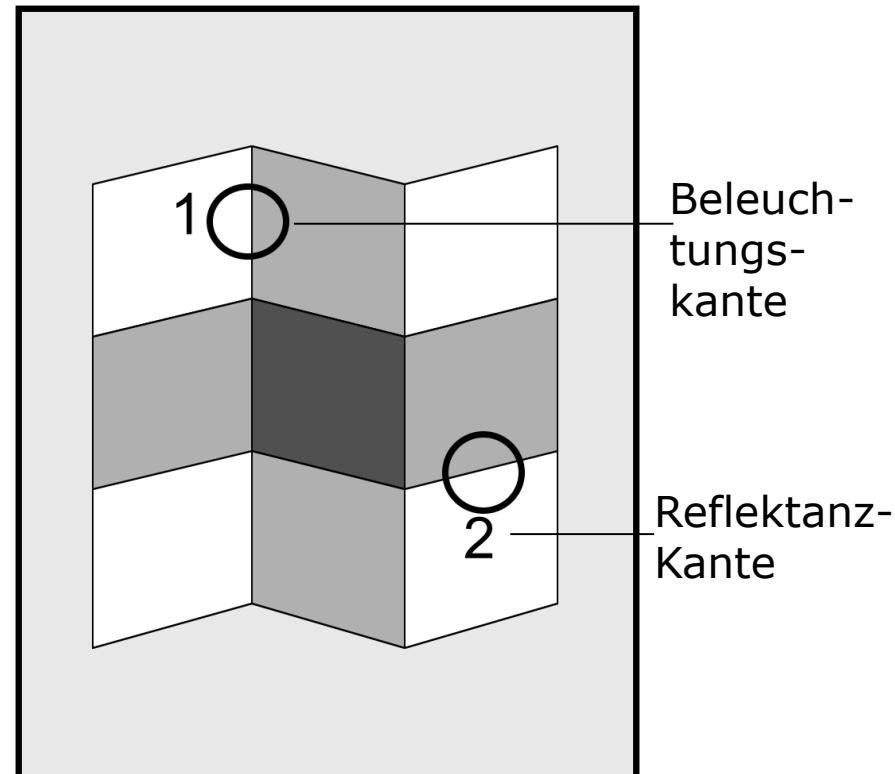
Reflektanz-Kante

Beleuchtungs-kante



Beleuch-tungs-kante

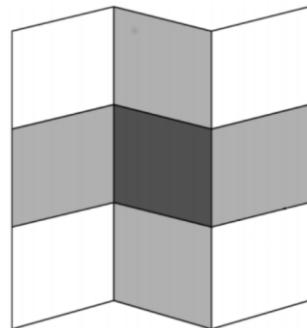
Reflektanz-Kante



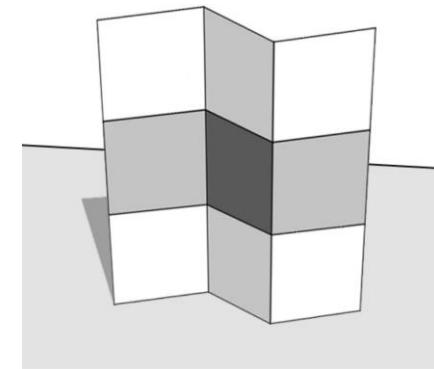
- Wahrgenommene Geometrie bestimmt Interpretation der Luminanz-Kanten

Luminanz, Reflektanz und Beleuchtung: Werkstatt-Metapher

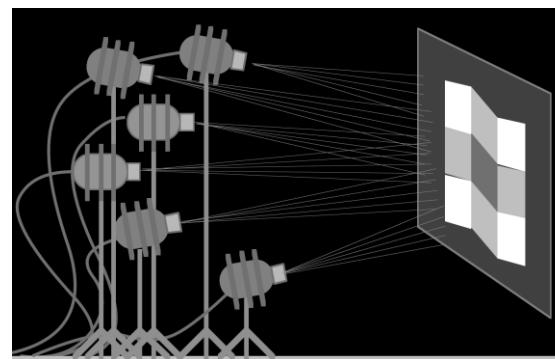
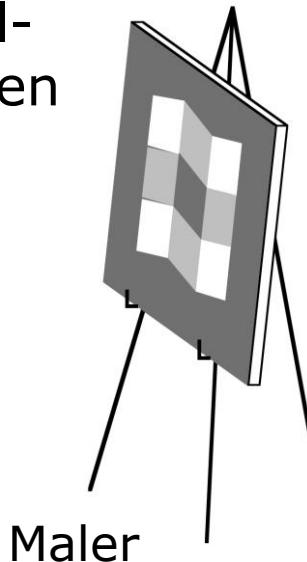
- Zu erklärendes Bild



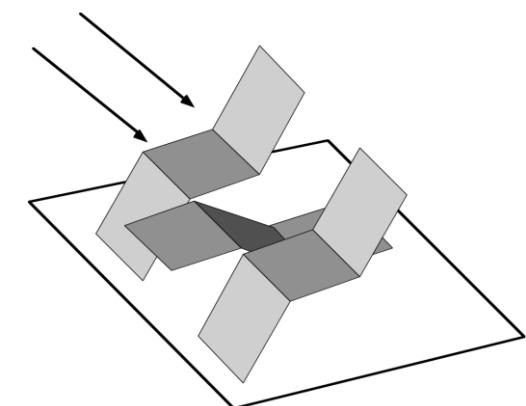
■ **Wahrscheinliche Erklärung** ist **einfach** und verwendet **Vorwissen**



- Speziallösungen



Lichttechniker

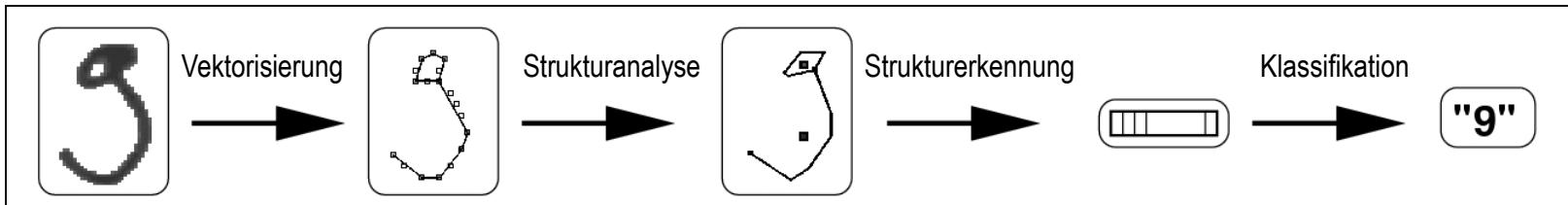


Metallkünstler

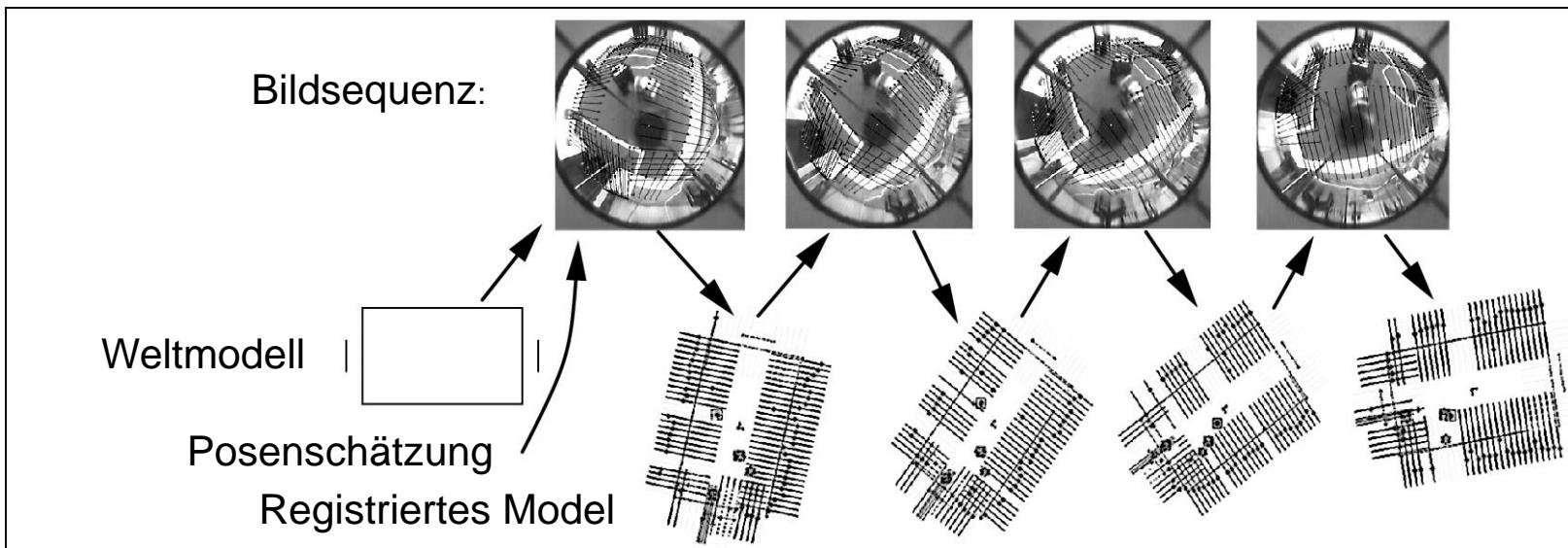
[Adelson & Pentland, 1996]

Computer Vision- Informationsfluss

■ Datengetrieben



■ Modelgetrieben



■ Wir benötigen beide Richtungen!

Klausurplanung

- Erster Termin:
Mittwoch, 21.02.2024, 10:00-12:00
HSZ, Friedrich-Hirzebruch Allee 5, HS1
- Nachklausur:
Donnerstag, 14.03.2024, 10:00-12:00
Meckenheimer Allee 176 (Eingang vom Katzenburgweg aus), Hörsaal IV
- 90 Minuten Bearbeitungszeit, Closed Book
- Es gibt eine Probeklausur (auf AIS-Webseite und eCampus).

Vorlesungsumfrage

- Organisiert von der Fachschaft
- Teilnahme bis ? 7.2. ? möglich
- Link zum Fragebogen:
<https://limesurvey.informatik.uni-bonn.de/index.php/292431?lang=de>



Projektgruppe Kognitive Robotik

- In der Projektgruppe werden in Kleingruppen Softwaremodule für unsere kognitiven Roboter entwickelt.
- Teilprobleme für solche Roboter umfassen:
 - Lokalisierung und Navigation
 - Manipulation von Objekten
 - Intuitive multimodale Kommunikation mit dem Benutzer
- Gute Vorbereitung für Abschlussarbeit
- Im Block nach der Vorlesungszeit: 26.2.24 - 15.3.24, Präsentation: 22.3.24
- Vorbesprechung: Freitag 02.02.24 11:00 c.t. in Raum 0.016
- Updates auf Webseite:
https://wwwais.uni-bonn.de/WS2324/PG_Kognitive_Robotik.html
- Kontakt: Raphael Memmesheimer
memmesheimer@ais.uni-bonn.de>

