

Zusammenfassung Robotik 3

Cand.-Inform. Michael Aschke

18. Oktober 2000

Kapitel 1

Einleitung

- Sensoren liefern nur partielle Information, weshalb Systeme notwendig sind, welche mit mehreren unterschiedlichen Sensoren ausgestattet sind.
- **Roboteranwendungen und Anforderungen an die verwendeten Sensoren:**
 - Gewöhnlich sind an jeder Achse eines Roboters Encoder angebracht, welcher die jeweilige Winkelstellung des Gelenkes anzeigt.
 - Transformation von Gelenkkorrdinaten in kartesische Koordinaten.
 - Telerobotik wird dort angewendet, wo der mensch nicht anwesend sein kann (z.B. Welt-raum).
 - Künstliche Haut stellt ein Feld von Sensoren dar, welche binär die Anwesenheit oder sogar Drücke messen können.
 - Der Ordnungsgrad kann in der Umgebung von autonomen fahrzeugen nur sehr schwer hoch gehalten werden. Drei prinzipielle Messprobleme sind:
 - * Die Tatsächliche Bewegung des Rades muss erfasst werden und in geschätzte kar-tesische Bewegung umgerechnet werden.
 - * Aufgrund der damit verbundenen Messfehler (Radschlupf), muss das Fahrzeug die Möglichkeit besitzen, sich anhand von äußeren Gegebenheiten zu orientieren. Flexi-bilität ist dadurch aber (z.B. bei Induktionsschleifen im Boden) stark eingeschränkt.
 - * Hindernisse. Hier reicht die Palette von Berührungssensoren bis hin zu berührungs-losen Sensoren, die die Position, Form etc. eines Hindernisses bestimmen können. Ggf. sind Ausweichreaktionen oder Situationsanalysen erforderlich. Bis heute ist es nicht gelöst, berührungsfrei beliebige Objekte sicher zu erfassen.
- **Struktur von sensorunterstützten Robotersystemen:**
 - Sensoren sind Systeme, die physikalische Größen und deren Änderungen in geeignete elektronische Signale umwandeln.
 - Steuerung, Regelung (bekannt, Abb 1.8)
 - Kennt man ein System vollständig und treten keine unkontrollierten Störungen auf, so kann man eine Steuerung verwenden.
 - Treten jedoch Störungen auf, so muss die Eingangsgröße unter Verwendung von Infor-mationen über die Ausgangsgröße entsprechend beeinflusst werden (Regelung).

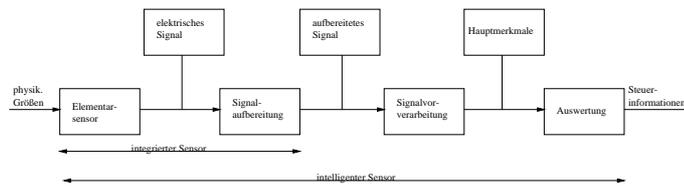


Abbildung 1.1: Informationsfluss in einem Sensorsystem

- **Elementarsensor**: Er nimmt eine Messgröße auf und wandelt sie in ein primäres Abbildungssignal um.
- Der **integrierte Sensor** beinhaltet zusätzlich noch die Signalaufbereitung.
- Der **intelligente Sensor** stellt die Kombination des integrierten Sensors mit einer rechnergesteuerten Auswerteeinheit dar. Es hat also die groben Schritte: Messgröße → Aufnehmen → Information verarbeiten + entscheiden → Ausgeben → Ergebnis.
- Komplexere Systeme haben verschiedene Aufnehmer, nach lokaler Informationsverarbeitung werden die Ergebnisse mit Hilfe eines Prozessmodells verknüpft und es entsteht eine komplexe Zustandsbeschreibung.
- Einzelne Sensorsysteme können auf Informationen anderer Sensoren angewiesen sein.

Kapitel 2

Technologie von Sensoren

Es existieren interne (Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung, INS) und externe (taktile, Näherung, Abstand, visuell, Position) Sensoren.

2.1 Interne Sensoren

- Erfassung der roboterinternen Systemzustände (Winkel, Positionen, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Gelenke).

2.1.1 Positionssensoren

Optische Codierer

- Prinzip: Ein auf einen Photodetektor ausgerichteter Lichtstrahl wird periodisch von einer Scheibe mit einem codierten Muster aus durchsichtigen und undurchsichtigen Stellen unterbrochen.
- Zwei grundlegende Arten:
 - **Inkrementaler Codierer:**
 - * Er misst die Rotationsgeschwindigkeit und schließt auf die relative Position.
 - * Die Spur 1 auf der Scheibe erzeugt eine bestimmte Anzahl von Sinus- oder Rechteckwellen für jede Achsenumdrehung. Die Anzahl der Ausgangsimpulse ist dabei proportional zu dem überstrichenen Drehwinkel. Aber: noch keine Richtungsinformation(!)
 - * Mit einer zweiten Spur, kann auch die Richtung der Rotation erkannt werden (Abb. 2.2)
 - * Für Anwendungen, die Drehungen von mehr als 360° enthalten, wird eine dritte Spur eingesetzt (ausser), wobei ein Referenzsignal für jede komplette Umdrehung bestimmt wird.
 - * **Problem** dieser Sensoren: Im Falle eines Stromausfalls gehen alle relevanten Positionsinformationen verloren und das System muss neu kalibriert werden!
 - **Absolute Codierer:**
 - * Gelenkposition direkt ablesbar.

- * Einsatz, wenn ein Verlust von Daten nach einem Stromausfall nicht toleriert werden kann.
- * Paralleles Licht geht durch eine Codierscheibe und geht in ein paralleles Signal über, das die absolute Winkelposition der Achse spezifiziert.
- * Der Unterschied zum inkrementalen Codierer ist, dass statt der seriellen Bitströme parallele Wortsignale mit einem individuellen Wortmuster für jede quantifizierte Achsenposition geliefert werden.
- * Muster: Gray-Code (es ändert sich immer nur ein Bit (auch von 255 zu 0)), Binär-Code, BCD

Potentiometer

- Prinzip: Spannungsteiler
- Durch die Bewegung einer Eingabewelle kann man den Widerstandswert des Potentiometers innerhalb des Intervalls $[0, R_{\max}]$ variieren.
- Misst man die Spannung, die zwischen dem Angriffspunkt und der Erde abfällt, so kann man daraus auf die Position schließen.

Differentialtransformer

- Der linear veränderliche Differentialtransformator (LVDT) besteht aus einer Primärspule und zwei identischen Sekundärspulen, die auf einem zylindrischen Wickelkörper mit einer zentrischen Bohrung aufgewickelt sind (Abb. 2.5). In der Bohrung kann sich ein ferromagnetischer Kern frei bewegen.
- Die Sekundärspulen sind über Kreuz mit einander verbunden, so dass die Ausgangsgröße effektiv die Differenz ihrer Spannung ist.
- In der Mittelstellung des Kerns heben sich die induzierten Spannungen gerade auf.

Resolver

- Bei einem Resolver besteht der Stator aus zwei senkrecht zueinander stehenden Spulen, welche mit einer um 90° phasenverschobenen Wechselspannung gespeist werden.
- Die Ausgangsgröße liegt in Form der Phasenverschiebung der Wechselstromsignale vor.
- Der Resolver ist damit unabhängig von Fehlern, die durch Spannungsabfall oder elektrisches Rauschen in den Leitungen des Oszillators und des Messkreises verursacht werden.

2.1.2 Gelenkgeschwindigkeitssensoren

Tachogenerator

- Im wesentlichen ein Gleichstromgenerator, dessen Ausgangsspannung proportional zur Eingangswinkelgeschwindigkeit ist.
- Arbeitsprinzip: Faradaysches Gesetz der elektromagnetischen Induktion.
- Tachogeneratoren erzeugen ein **analoges** Ausgangssignal und benötigen somit einen A/D-Wandler zur Weiterverarbeitung!

Optische inkrementale Codierer

- In Aufbau und Funktionsweise entspricht er im wesentlichen dem inkrementalen Codierer zur Positionsbestimmung.
- Für die Geschwindigkeitsbestimmung reicht eine Codescheibe aus. Eine einzige Spur auf dieser Scheibe reicht aus, da Drehzahl und Drehrichtung nicht von Bedeutung sind und eigentlich nur die Frequenz zählt, welche zur Geschwindigkeit proportional ist.
- Benötigt wird deshalb eine Ausgangsverstärkung und ein digitaler Zähler, der die Impulse zählt.

2.1.3 Beschleunigungssensoren

- Erforderlich: hohe Auflösung und hohe Genauigkeit.
- Für autonome mobile Roboter unbedingt notwendig.
- Piezoresistive und kapazitive Beschleunigungssensoren können wegen ihres vergleichbaren Aufbaus zu Silizium-Beschleunigungssensoren zusammengefasst werden:
- **Silizium-Beschleunigungssensoren:**
 - Die beschleunigung kann nicht direkt gemessen werden, sondern muss indirekt über ihre Wirkung auf eine träge Masse bestimmt werden.
 - Zur Messung einer Linearbeschleunigung mit einem Festkörper können drei grundsätzliche Prinzipien unterschieden werden:
 - * Wegmessung an Feder-Masse-System (Auswertung nach Ausschlag- (Messung des Federweges) oder Kompensationsverfahren (durch Steuerkraft, wird der Trägheitskomponente entgegengewirkt, so dass der Arbeitspunkt der Feder fest ist (Gewicht wird immer an einer bestimmten Position gehalten)))
 - * Geschwindigkeitsmessung an viskos gedämpfter Masse (für Stossmessungen, hohe Überlastsicherheit).
 - * Weg-Zeitmessung an frei schwebendem Körper (extrem hohe Auflösungen)
 - Feder-Masse-System für allgemeine Messaufgaben am häufigsten verwendet.
 - Allgemein ist das Messelement ein Siliziumchip, welcher im wesentlichen aus einer federnd gelagerten Masse besteht.
 - Bei resistiven Sensoren wird die Änderung eines Brückenwiderstandes auf dem Federelement detektiert.
- **Piezoelektrische Beschleunigungssensoren:**
 - polykristalliner Werkstoff PXE
 - Aufbau: Aufnehmer — PXE Wandler — Seismische Masse (Abb. 2.7)
 - Piezoelektrische Beschleunigungssensoren erzeugen bei Beschleunigungseinwirkung eine Ladung, die durch die Eingangs- und Isolationswiderstände innerhalb von Sekunden wieder abfließt.
 - Aus diesem Grund können keine statischen oder langsam veränderlichen Beschleunigungen gemessen werden.

2.1.4 Inertial Navigation System (INS)

- Richtungssensoren sind besonders wichtig für die Positionsbestimmung von mobilen Robotern.
- Jeder momentane Orientierungsfehler verursacht einen konstant wachsenden Positionsfehler (bei odometrisch(?) basierter Positionsbestimmung).
- Mechanisches Gyroskop (Abb.2.8): Rotationssensoren, die auf Trägheitseigenschaften eines schnell drehenden Rotors basieren.
- Da der Kreisel seine Drehimpulsrichtung beibehalten will, wird er gezwungen, mit der Winkelgeschwindigkeit der Erde zu präzessieren. Das resultierende Kreisdrehmoment versucht, den Kreisel immer in Richtung des Meridians auszurichten, weshalb man den Kreisel als Richtungsanzeigerät verwenden kann und somit den Orientierungsfehler sofort erkennen kann.

2.2 Externe Sensoren

2.2.1 Taktile Sensoren

- Binäre Aussage: Berührungssensoren. (Abb. 2.9)
- Schalmatten für sicherheitstechnische Einrichtungen gehören ebenso in diese Kategorie.
- Falls Gegenstände unterschiedlicher Festigkeit vom Roboter gegriffen werden sollen, reicht eine qualitative Bewertung nicht aus. Deshalb sind taktile Sensoren notwendig, mit denen die Kontaktkraft unterschieden werden kann.

Taktil tastende Sensoren

- Diese Sensoren sind während des Messvorganges nicht in Ruhe. Mit ihnen können Informationen aus der Umwelt durch direktes Berühren von Objekten aufgenommen werden.
- Matrixförmige Anordnung einzelner taktile Sensorelemente mit integrierter Sensordaten-Vorverarbeitung: *künstliche Haut*.
- Anwendungen:
 - Manipulation von Objekten
 - Erkennung von Werkstückprofilen
 - Auffinden stabiler Greifpositionen
 - erkennen des Verrutschens
- Roboterfinger (Abb. 2.10) (mit elastischem Überzug).
- **Dehnmessstreifen:**
 - Aufbau: Abb. 2.11
 - Prinzip: Widerstandsänderung durch Verformung (meist Längenverformung).
 - Je höher die Widerstandsänderung bei konstanter Verformung, desto empfindlicher der Sensor.

- **Piezoelektrischer Effekt:**

- beschreibt die Ladungserzeugung in einem Kristall mittels Druck. Wenn man auf den entgegengesetzten Seiten eines piezoelektrischen Materials Metallelektroden aufbringt, welche die Ladungsträger sammeln, so hat man einen Kraftsensor.
- Aufbau: Abb.2.12
- Für Drucksensoren: Nutzung des transversalen Effektes
- Für Kraftsensoren: Nutzung des longitudinalen Effektes
- Vorteile:
 - * Unempfindlichkeit gegenüber hohen Temperaturen
 - * keine äußere Spannungsversorgung benötigt
 - * Sehr hoher Wirkungsgrad der Energieumwandlung, hohe Ausgangsspannung, aber(!) hochohmig → zur elektrischen Weiterverarbeitung extrem hohe Isolation und Signalverstärkung notwendig
 - * Sensor mechanisch starr aufgebaut, daher wenig Eigenschwingungen oder Nachschwingungen, sehr geringe Hysterese

- **Druckempfindliche Materialien:**

- Häufig Elastomer mit Beimischung von leitfähigen Materialien (Kohlenstoff). z.B. Aufbau siehe Abb. 2.13
- Bei Druck rücken die leitfähigen Anteile dichter zusammen, wodurch sich der Widerstand verkleinert.
- Tekscan-Sensoren z.B. sehr dünn.
- FSR-Sensoren (Abb. 2.16)

Magnetische Effekte

- **Magnetoelastische Sensoren:**

- beruhen auf dem Effekt der Magnetoelastizität.
- Bei magnetoelastischen Sensoren: Primärspule (Erregerspule) und Sekundärspule (Messspule) z.B. über Kreuz. Ohne Krafteinwirkung, keine Induktion; unter Krafteinwirkung Änderung des Verlaufs der Magnetfeldlinien (nun in den Bereich der Sekundärspulen) → Induktion proportional zur Krafteinwirkung.

- **Bei magnetoelastischen Sensoren:**

- Effekt: bestimmte Ni-Fe-Legierungen ändern ihren spezifischen Widerstand unter Einfluss eines veränderlichen Magnetfeldes.
- Aufbau: Abb. 2.18

- **Anderes Prinzip: Elastomer zwischen Dauermagnet und Hall-Sensor. Spannung von Materialeigenschaften und Abstand Magnet – Sensor abhängig.**

Kapazitätseffekt

- Ein taktiler kapazitiver Sensor entspricht einem Plattenkondensator mit einem elastischen Dielektrikum. (Abb. 2.20)
- **Induktivitätseffekt:**
 - Aufbau: Spule um ein Elastomer.
 - Wirkt eine Kraft senkrecht auf die Sensorfläche, so ändert sich der Spulenquerschnitt und somit die Eigeninduktivität der Spule.
 - Messung: Spule als frequenzbestimmenden Teil eines Rechteckoszillators. Frequenzänderung mittels f/U-Wandler in ein analoges Signal umsetzen.

Optische Effekte

- Die meisten taktilen optischen Sensoren bestehen im Wesentlichen aus einer Lichtquelle und einem Lichtdetektor. Die von aussen einwirkende Kraft beeinflusst die Lichtmenge, die von der Lichtquelle emittiert wird und auf den Lichtdetektor fällt. (z.B. durch Änderung der Form und damit der Brechungseigenschaften des dazwischen liegenden Materials (z.B. Glasfaser))
- Weiteres Arbeitsprinzip: Mechanische Unterbrechung eines Lichtstrahls (Krafteinwirkung führt zum Einführen eines lichtundurchlässigen Materials (proportional zur Kraft) zwischen Lichtquelle und Lichtdetektor).
- Gebrauch von diffusen Reflexionen (Acrylplatte, Luftspalt, Silikon-Gummi. Seitliche Licht-einstrahlung in die Acrylplatte. Abb. 2.24)

Taktil gleitende Sensoren

- Durch das Darübergleiten gewinnt man zusätzliche Informationen, z.B. über die Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes.
- Zu diesem Zweck: gleitende taktile Sensoren.
- Vorteil: kleinere Fläche benötigt, da der Sensor über eine Fläche bewegt wird.
- Beispiel: Stress Rate Sensor.

Kraft-Momenten-Sensoren

- Dreidimensionale Kraft-Momenten-Sensoren erfassen simultan räumlich auftretende Kräfte und Momente zwischen Effektor und Handhabungsobjekt.
- Die Erfassung von Reaktionskräften und -momenten ermöglicht eine Funktionsprüfung und Fehlererkennung.
- Die Kraftmessdose besteht aus einer Kombination aus mehreren Kraftaufnehmern. Über eine Entkopplungsmatrix können einzelne orthogonale Kräfte- und Momentenvektoren berechnet werden.
- Als Messumwandler kommen Piezokristalle, Dehnungsmessstreifen sowie optische Effekte in Frage.
- **Kraft-Momenten-Sensor mit DMS:**

- Aufbau: Abb. 2.27
- Von aussen angreifende Kräfte und Momente führen zu einer Längenänderung der elastischen Stege. Zusätzlich werden zwei Dehnmessstreifen an starren Stellen des Sensors angebracht (so, dass sie keinerlei Auswirkungen auf das Messverhalten haben), um temperaturabhängige Fehler zu kompensieren.

- **Compliance Sensor:**

- Kraftmessung mittels optischen Messungen.
- Hauptbausteine: zwei zu einander bewegliche Platten. Wirkt eine äussere Kraft auf eine der Platten, stellt sich über elastische Biegeelemente ein Gleichgewicht ein. Die Ausweichbewegung kann mit Hilfe von Infrarotdetektoren optisch gemessen werden.

2.2.2 Näherungssensoren

- Primäre Funktion: Bestimmung, ob sich ein Objekt oder ein Teil eines Objektes innerhalb eines spezifischen Abstandes vom Endeffektor des Roboters befindet.
- Vorteil gegenüber taktilen Sensoren: Keine Beschädigung des Objektes und grössere Haltbarkeit.

Induktive Näherungssensoren

- Aufbau: Abb. 2.31
- Funktion: Spulenfeld induziert im leitfähigen Objekt Wirbelströme. Diese entziehen dem Schwingkreis Energie, die Sensoramplitude ändert sich. Diese Änderung liefert eine zum Abstand proportional stehende Spannung.
- Sensor ist gegenüber nichtleitenden Objekten blind!

Kapazitive Näherungssensoren

- arbeiten mit einem RC-Schwingkreis. Dringt ein Objekt in die Schaltzone des Sensors ein, so verändert sich die Schwingkreis Kapazität.
- Aufbau: Abb. 2.32
- Metalle erreichen größte Ansprechwerte.
- Während Infrarotsensoren und akustische Sensoren abhängig sind von der Farbe, Gewebe und der Oberfläche des Objektes, erkennt der kapazitive Sensor leitende und nichtleitende Hindernisse von willkürlicher Form und Farbe! Sie eignen sich auch für gefährliche Umgebungen.

Optische Näherungssensoren

- Messung der reflektierten Lichtintensität.
- Wenn kein Objekt im vom Strahlungsemitter (Lichtquelle) und Strahlungsdetektor überwachten Bereich ist, wird "kein Objekt anwesend" gemeldet.
- Überschreitet die Lichtintensität einen gewissen Schwellwert im Detektor, so wird von der Anwesenheit eines Objektes ausgegangen.

- Vorteil gegenüber induktiver und kapazitiver Anwesenheitsüberprüfung: wesentlich größer erreichbarer Ansprechabstand.

Akustische Näherungssensoren

- Echoprinzip.
- Ultraschallimpuls trifft auf ein schallreflektierendes Objekt. Es entsteht eine entfernungsabhängige Laufzeit. Die Detektion gibt die Existenz eines Objektes an. Zur Übertragung und Detektion kann derselbe Wandler benutzt werden.

2.2.3 Abstandssensoren

- Nicht nur qualitative Information, sondern auch quantitative (= genaue Bestimmung des Abstandes zwischen Sensor und Gegenstand)
- Neben der genauen Aussage besitzen sie eine frößere Reichweite und eignen sich zur Erfassung von geometrischen Umweltinformationen.

Optische Abstandssensoren

- Erweiterung der optischen Näherungssensoren
- Fremdeinflüsse ausgeschlossen, da optische Sensoren mit moduliertem Licht arbeiten.
- Üblicherweise LED als Transmitter und Phototransistor als Detektor.
- Infrarot-LEDs reduzieren die Störanfälligkeit weiter und haben den Vorteil der farbunabhängigen Abtastung und einer hohen Reichweite.
- Messverfahren.

– Laufzeitermittlung:

- * Gemessen wird die vom Übertragungsmedium abhängige Zeitspanne, die ein monochromatischer Lichtstrahl (Laser) benötigt, um von einem Objekt reflektiert zu werden. (Hin- und Rücklaufzeit).
- * Aufbau: Abb. 2.33

– Aktive Triangulation:

- * Anhand der Ablenkung eines Strahls kann auf den Abstand oder auf die Winkellage eines Objektes geschlossen werden.
- * Sender (Laser) und Empfänger (CCD-Zeile oder Feld mit Infrarotsensoren) sind in einem gemeinsamen Gehäuse untergebracht.
- * Entfernung = Höhe auf Hypotenuse (=Sensorort) im gleichschenkligen Dreieck (Abb. 2.34)
- * Sendewinkel lässt sich durch Spiegelstellung ermitteln, der Empfangswinkel aus der Spaltennummer des Detektorarrays.
- * Das Scannen kann durch Einsatz einer Lichtebene anstelle eines Einzelstrahls beschleunigt werden. (Methode: strukturiertes Licht) Ein Lichtmuster wird auf das Objekt projiziert und eine Kamera beobachtet die Verformung, die die Objektform dem Muster aufzwingt.

- * Durch eine gitterartige Struktur kann eine schlechte Auflösung für die Objektoberfläche vermieden werden. Dann ist nur eine Aufnahme für ein Tiefenbild notwendig. Schattierungseffekte können beseitigt werden durch das Verwenden von kegelförmig strukturiertem Licht.
- **Interferometrie:**
 - * Verwendung von zwei Lichtstrahlen unterschiedlicher Frequenz. (I. wird auch Phasenvergleichsverfahren genannt) (1 Referenzwelle und 1 Messwelle)
 - * Aufbau: Abb. 2.35
 - * Größerer eindeutiger Messbereich verglichen mit der Triangulation. Die Phasenverschiebung ist ein Maß für die zu messende Entfernung.
 - * Da eine Verschiebung um 360° einer Änderung der Entfernung um eine Wellenlänge entspricht, lassen sich Entfernungen nur im Bereich einer Wellenlänge absolut ermitteln.
- **Stereoskopie:**
 - * Zwei Kameras betrachten ein Objekt aus verschiedenen Winkeln. (auch passive Triangulation genannt).
 - * Prinzip: Abb. 2.36
 - * Korrespondenzproblem: Identifikation der Bildpunkte, die in beiden Bildern demselben Objekt zugeordnet werden sollen. Problem, da gewissen Oberflächen, die von einer Kamera gesehen werden können, für die andere Kamera verdeckt sein könnten.
 - * Werden spezifische Merkmale wie Ecken oder andere klar definierte Regionen zur Deckung gebracht, kann Korrespondenz herbeigeführt werden.

Radar-Sensoren

- Sehr kurze Wellenlänge, stark gebündelte Wellen.
- Die an einem Gegenstand reflektierten Wellen werden in der Pause zwischen zwei Sendepulsen empfangen.
- Bewegungsvorgänge lassen sich mit Radar-Sensoren erfassen, welche nach dem Doppler-Prinzip arbeiten.
- Vollständige Abbildung der Umgebung durch inkohärente Überlagerung von Radarkarten, welche an unterschiedlichen Orten vom Sensor aufgenommen wurden.
- Geeignet zur Erfassung geometrischer Umweltinformationen.

Akustische Abstandssensoren

- Die Intensität des Schalldrucks nimmt im Quadrat der Entfernung von der Schallquelle ab.
- **Abstandsmessung:**
 - Verfahren der kontinuierlichen Schallabstrahlung: Entfernung wird durch Phasenvergleich zwischen abgestrahlter und empfangener Wellenlänge ermittelt.
 - Puls-Echo-Verfahren: Entfernung wird über Laufzeit ermittelt.
 - Ultraschallimpuls fester Länge (“burst”)
 - Mit Laufzeitverfahren prinzipiell erreichbare Auflösung hängt vom Einschwingverhalten des US-Wandlers ab und beträgt ca. 0,1mm.

- Minimal messbare Entfernung 100mm.
 - Laufzeitverfahren ermöglicht durch Mehrfachecho-Auswertung die Bestimmung der Entfernung mehrerer hintereinanderliegender Objekte.
 - Probleme bei US-Sensoren:
 - * schlechte Ortsauflösung aufgrund des breiten Abstrahlkegels.
 - * Messung sehr kleiner Flächen aufgrund der Schallemission auf einen engen Raumwinkelbereich.
 - * Weitere Probleme: Abb. 2.38:
 - Mehrfachreflexion (US-Sensor zu Obj-A zu Obj-B zu US-Sensor *rightarrow* Messung einer virtuellen Entfernung). Vermeidung durch Bedingung, dass nur ein Objekt sich in der Schallkeule befinden darf.
 - Fehlende Reflexion: (Objekt reflektiert Schall am US-Wandler vorbei (= steht schräg zur Schallkeulennormale)). Vermeidung durch Bedingung, dass Oberfläche des Objektes ungefähr senkrecht zur Strahlrichtung stehen muss.
 - Mit dem Peilverfahren ist eine sehr genaue Ortsauflösung möglich. Nur **ein** Element sendet, mehrere ortsversetzte empfangen das Echo. Position des Reflektors durch Triangulation bestimmbar.
 - Sektorscanner mit rotierendem Schallwandler (meist Kreissektor mit 90° bis 120° Winkelbereich).
 - Sende-Array: Abstrahlung einer Wellenfront durch phasenverschobene Ansteuerung eines Sende-Arrays mit mehreren Elementen (Abb. 2.39). Stehen die Reflektoren deutlich vom Array abgewandt oder sind sie stark absorbierend, so sind sie nicht zu detektieren.
- In Konkurrenz zur Videokamera bietet das US-System eine direkte Tiefeninformation, also die Positionsbestimmung von Hindernissen an.

2.2.4 Visuelle Sensoren

- Liefern Information über die geometrischen Eigenschaften der Umgebung.
- physikalische Grundlage ist der innere Photoeffekt.
- Grundelemente sind positionsempfindliche Photodioden und darauf aufbauende Halbleiterdetektoren. Letztere geben auch Informationen über die Helligkeitsverteilung.
- Analoges Schieberegister: Alle Ladungsträger werden durch den Startimpuls gleichzeitig in das Schieberegister übernommen. Im Schieberegister wird die Ladung durch Taktimpuls gesteuert zum Signalausgang weitergeschoben.
- Digitale Schieberegister: Nacheinander Auslesen der Detektoren durch Start- und Taktimpuls. (Aufbau Abb. 2.40)
- **Positionsempfindliche Photodioden:**
 - Bei der segmentierten Photodiode werden mehrere getrennte p-Zonen auf einem gemeinsamen n-leitenden Grundsubstrat aufgetragen. Jede p-Zone fungiert als Photodiode und erzeugt einen Photostrom.
 - Es lassen sich Zeilen-, Quadranten-, Ring- oder Flächensensoren aufbauen.
- **CCD-Wandler:**

- Bietet Informationen über die Verteilung der Helligkeit
- Im CCD werden möglichst viele, kleine Elemente (Kondensatoren) auf engstem Raum untergebracht.
- Stellen ladungsträgergekoppelte Photodetektoren dar.
- Erste Komponente: **Photoelement**: Durch den photoelektrischen Effekt sammelt sich pro Pixel in einer Potentialmulde zur einfallenden Lichtintensität eine proportionale Ladung.
- Zweite Komponente: **Ladungstransport**: Ladungen werden durch analoge Schieberegister zur Ausleselektronik transportiert.
- Dritte Komponente: Auswertung: Ladungen werden in eine proportionale Ausgangsspannung umgewandelt.
- Als Schieberegister: Eimerkettenschaltung oder CCD
- Effekte:
 - * **Blooming**: Bei zu stark belichteten Bildern fließen Elektronen über die Potentialbarriere hinaus auf die Nachbarzelle (Pixel) ab. Folge: Aufblühen benachbarter Bezirke.
 - * **Smear**: Weitere Zunahme der Signalladung während des Auslesevorganges. Folge: Unerwünschte Lichtempfindlichkeit, durch Ladungen, welche trotz geschlossener Transfer-Gates vom lichtempfindlichen Sensorelement in das Schieberegister gelangen. Verschmierung der hellen Stellen.
- Bild-Detektor (CCD-Arrays): Drei verschiedene Ausleseverfahren:
 - * Frame Transfer (Abb. 2.43a): Bildaufnahme- und Speicherfläche; Ausleseregister. Während Integrationsphase wird die Speicherfläche zeilenweise ausgelesen und ein neues Bild in der Bildzone integriert. Verschmierungseffekte werden durch einen Shutter vermieden. Nachteil: hoher Platzbedarf.
 - * Zwischenzeilentransfer: ILT (Inter-Line-Transfer): Aufnahme- und Speicherzelle wechseln sich alternierend ab. Flächenhaft aufgenommenes Bild wird spaltenweise verschoben (in Speicherregister) und verlässt als zeitsequentielles Signal das Ausgaberegister. Vorteil: Ausschluss von Smear-Effekten.
 - * Zeilentransfer: LT (Line-Transfer): Vorteil: geringer Platzbedarf; Nachteil: zusätzlich erforderliche Zeilenadressierung und stärkere Verschmierungseffekte als beim FT.
- BCMD: Erhöhte Auflösung und Empfindlichkeit, geringes Rauschen und Wegfall von Blooming und Smearing. Das Eingangssignal wird unmittelbar an der Quelle in eine Spannung gewandelt und in einem Kondensator gespeichert.

2.2.5 Positionssensoren

- In autonomen Systemen werden meist absolute und relative Positionssensoren verwendet, da keine der beiden Gruppen allein verwendet ausreichend ist.
- GPS:
 - Zeit- und Streckenmessungen nach mindestens 4 Satelliten erlauben die 2- und 3-dimensionale Koordinatenbestimmung eines Punktes auf der Erde.
 - Alle Messgrößen kommen in Frage:

- * Codephase (Pseudoentfernung): Messung der Zeitdifferenz zwischen Abstrahlung und Registrierung. Zeitfehler, da die Geschwindigkeit nicht der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum entspricht, daher Pseudoentfernung (da konstanter Fehler).
- * Messung der Dopplerverschiebung; meist zur Bestimmung der aktuellen Geschwindigkeit.
- * Messung mit Trägermischphase: beruht auf dem Prinzip der elektronischen Streckenmessung mittels Phasenverschiebung.
- Aufbau eines GPS-Systems (Satelliten, Kontrollstationen, Benutzer; Abb. 2.46)
- Fehler (Standardabweichungen von 2-30m) hängen auch von der Anordnung der vier Referenz-Satelliten ab. (Abb. 2.48: ungünstigster Fall (alle in einer Geraden fast tangential zur Oberfläche (durch den Benutzer))). Dies führt zu einem Fehlermultiplikator (meist 2-3, kann aber auch unbeschränkt sein).
- **Differential GPS:**
 - Die Fehler des GPS können (bis auf Ausnahme der Mehrfachreflexion) durch Verwendung eines DGPS-Systems wesentlich verkleinert werden.
 - Konzept: Zwei GPS-Empfänger in relativ naher Entfernung (10km). Wenn der zweite Empfänger ortsinvariant ist, erhält man einen Fehlervektor. So kann man den Fehler effektiv unter 10m bekommen.
- **Bodenbasierte Funksysteme:**
 - An den zu beobachtenden Positionen: Vergleich der Ankunftszeit zweier identischer Signale, welche simultan von je einem Hochleistungssender gesendet werden.
 - Prinzip (Abb. 2.49): Master-/Slave-Sender empfangendes Fahrzeug.
 - Zwei oder mehr Paare von Sendern werden benötigt, um sich in einem zweidimensionalen Punkt (Breite, Länge) schneidende hyperbolische (im Bild: Kanten) Linien (ergeben sich für jede finite Zeitdifferenz) zu bekommen.
 - Genauigkeit: ca. 100m
- **Künstliche und natürliche Landmarken:**
 - Merkmale in der Umwelt, die der Roboter aus den Sensordaten erkennen kann. Sie unterscheiden sich von den Active Beacons dadurch, dass sie nicht aktiv sind, d.h. Radar, Licht oder andere Energie abstrahlen.
 - Müssen einfach zu lokalisieren sein und einen ausreichenden Kontrast zum Hintergrund haben. Im allgemeinen haben sie eine feste und bekannte Position anhand derer sich der Roboter lokale relativ lokalisieren kann.
 - Die Charakteristika müssen bekannt und im Speicher abgelegt sein.
 - Allgemeine Vorgehensweise: Aquisition von Sensorinformation → Detektion und Segmentierung der Landmarken → Matchen der Sensordaten mit gespeicherter Karte → Berechnung der Position des Roboters.
 - Schwierigkeiten sind Detektion und Matchen. Die Berechnung erfolgt über Triangulation oder geometrische Form der detektierten Landmarke.
 - Zwei Arten:
 - * künstliche Landmarken: dienen nur zum Zweck der Roboternavigation

- * natürliche Landmarken: sind bereits in der Umwelt vorhanden und haben Roboternavigation nur als sekundären Zweck. (Funktionieren am besten in hochstrukturierter Umgebung; Schwierigkeit ist das Finden eindeutiger Merkmale, anhand derer die Landmarken in den Sensordaten zu erkennen sind). z.B. vertikale Ecken, Deckenlampen.
- Viele künstliche Landmarken basieren auf bildverarbeitenden Systemen:
 - * reflektierende Targets (Retro-Targets)
 - * halb-weiße, halb-schwarze Kreise mit individuellem Barcode

Kapitel 3

Modellierung und Simulation von Sensoren

- Mathematische Beschreibung der Aufnahmecharakteristik eines Sensors.

3.1 Sensormodellierung

- Das Sensormodell beschreibt den Zusammenhang zwischen der Umgebung bzw. der Messsituation und dem Messergebnis, welches der Sensor in dieser Umgebung liefert.
- Es kann folgende Aufgaben erfüllen:
 - Interpretation von Messdaten, Prediktion von Erwartungswerten und Sensorsimulation.

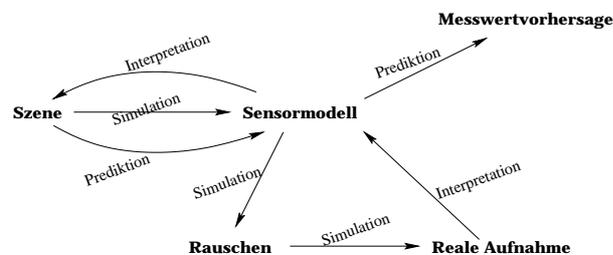


Abbildung 3.1: Aufgaben des Sensormodells

3.1.1 Allgemeines Sensormodell

- Es bildet den n -dimensionalen Umweltzustand in einen m -dimensionalen Bildraum ab.
-

$$z_m = h(\theta_n) + \nu_m \quad (3.1)$$

mit: ν_m : Rauschen (meist normalverteilt angenommen, Erwartungswert 0, Kovarianz $Q(t)$),
 h : Beobachtungsmodell

- Kovarianzmatrix reduziert sich durch statistische Unabhängigkeit der einzelnen Komponenten auf Diagonalmatrix $E(\nu_m) = 0$ also: $Q(t) = E(\nu_m \nu_m^T) = \text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_m^2)$
- Meist nicht linear. Im Falle eines linearen Sensors entfallen aus der Gleichung mit z die Indizes.

3.1.2 Kalibrierungs- und Steuerparameter

- Kalibrierungsparameter: h hängt vom eingesetzten Sensortyp aber auch von fest spezifizierten Parametern (z.B. relative Position einer fest installierten Kamera bzgl. Roboterframe (Mittelpunkt des Roboters)) ab. Diese festen Parameter stellen die Kalibrierungsparameter dar.
- Steuerungsparameter: Dynamischer Fall. Durch geeignete Veränderung wird Messeigenschaft modifiziert und das Beobachtungsmodell beeinflusst. (z.B. Fokus einer Kamera, Nickwinkel eines Stereo-Kamerakopfes)
- Jeder statische Sensor: Kalibrierungsparameter; jeder dynamische Sensor: Kalibrierungsparameter + Steuerungsparameter.

3.1.3 Modellierung einer Kraft-Moment-Messdose

- Approximation, da mögliche Verformungen der KM-Sensoren unberücksichtigt bleiben.
- Berechnung eines Spannungsvektors W (n-dim. bei n-Sensorelementen) aus Kraft-Momentenvektor F und Kopplungsmatrix C :
- $W_i = c_{i1}F_x + c_{i2}F_y + c_{i3}F_z + c_{i4}M_x + c_{i5}M_y + c_{i6}M_z; \quad W = CF$
- Auflösung nach F geschieht nach Methode der kleinsten Quadrate mittels pseudoinverser Matrix $R_F = (C^T C)^{-1} C^T$
- Eine empirisch orientierte Methode bei der Kalibrierung liefert die 6n Koeffizienten der Entkopplungsmatrix R_F .

3.1.4 Modellierung eines Ultraschallsensors

- Ein Ultraschallsensor bildet den dreidimensionalen Beobachtungsraum in einen eindimensionalen Bildraum ab. Dementsprechend gestaltet sich Formel (3.1)
- Die Wandlungseigenschaften von US-Sensoren sind nicht ideal, da die Schallgeschwindigkeit druck- und temperaturabhängig ist und die US-Keule einen Öffnungswinkel von 5°-40° hat.
- Dieser Öffnungswinkel ist sensorabhängig und wird (wie auch die umweltbedingte Schallgeschwindigkeit) durch Kalibration bestimmt. (Abb. 3.1 2.dim. Projektion des Blickfeldes eines Ultraschallsensors)
- Der Bereich, den die Reflexionsschallkeule darstellt ist von Objekteigenschaften (Oberfläche etc.) abhängig und ist kleiner, als die senderseitige US-Keule. Es wird auch nur der minimale Abstand eines Objektes in der **Reflexionsschallkeule** gemessen! Somit keine genaue Aussage über Position und Orientierung eines Objektes in einer Schallkeule möglich.
- Vermeidung dieses Problems durch rotierende US-Wandler.
- Die Abbildungsvorschrift h ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Sensorgeometrie
 - Öffnungswinkel
 - Reflexion, Mehrfachreflexion
 - 3D-Geometrie von Hindernisobjekten
 - Mikrostruktur
- Ist der Öffnungswinkel zu klein, besteht die Gefahr, kein Objekt wahrzunehmen.
 - Bei Objekten werden zuerst die Ecken gesucht, dann zur Strahlrichtung normale Flächen, dann nicht normale Flächen.
 - Gemessen wird immer der normale Abstand. (Abb. 3.5)

3.1.5 Modellierung einer Kamera und Kalibrierung

- Eine CCD-Kamera liefert ein zweidimensionales Feld der Lichtintensitäten im 3D-Beobachtungsraum. Ihre Modellierung gliedert sich in zwei gebiete:
 - Modellierung der Lichtintensität: (Abhängigkeit der Beleuchtung der Szene von Reflexionseigenschaften der Objekte)
 - Modellierung der Geometrie: optische Abbildung der 3D-Objekte auf die 2D-Bildebene.
- Physikalisches Kameramodell (Abb. 3.6): Objektpunkt (3D-Welt) → (Kameramodell, 3D-in-2D (Kameraparameter, Geometrie der Abbildung, Einfallendes Licht) → Bildpunkt (2D-Bild)
- $z = h(p) + \nu \quad z \in \mathbb{R}^2, p \in \mathbb{R}^3$
- Bei der Lochkamera kreuzen sich alle Lichtstrahlen im Lochmittelpunkt, womit der Strahlensatz anwendbar ist.
- Zur Anpassung der Welt- auf die Kamerakoordinaten sind noch Rotation und Translation notwendig. (Zuerst Ursprung des Weltkoordinatensystems durch Translation ins Projektionszentrum (= Ursprung des Kamerakoordinatensystems) verschieben, dann passend drehen, dass es mit dem Kamerakoordinatensystem zusammenfällt).
- $r_b = P(c)R(\varphi, \vartheta, \psi)T(x_0, y_0, z_0)r_w = Ar_w$ mit c =Brennweite und $P(c)$ =Zentralprojektion, T =Translation um x_0, y_0, z_0 und R =Rotation (Eulerwinkel!):

$$A = P(c)R(\varphi, \vartheta, \psi)T(x_0, y_0, z_0)$$

$$P(c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{c} & 0 \end{pmatrix}$$

$$R_0(\varphi, \vartheta, \psi) = ROT(z, \varphi)ROT(y, \vartheta)ROT(z, \psi)$$

$$R(\varphi, \vartheta, \psi) = \begin{pmatrix} R_0(\varphi, \vartheta, \psi) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Innere Orientierung (Brennweite), äußere Orientierung (Lage und Orientierung der Kamera in Weltkoordinaten)

- Bei einer CCD-Kamera bleibt die Gleichung $r_b = Ar_w$ gültig, nur ist die Matrix A von mehreren weiteren Faktoren ausser $x_0, y_0, z_0, \varphi, \vartheta, \psi, c$ (LKMParam).

$$\begin{pmatrix} ut \\ vt \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

- Die Parameter können aus den Herstellerangaben nicht genau genug bestimmt werden. Deshalb muss durch Kalibrierung entweder die LKMParam oder die Matrix A direkt abgeschätzt werden. Letzteres ist wesentlich einfacher.
- setzt man a_{34} auf 1, so kann man die Koeffizientenmatrix eindeutig bestimmen.

3.1.6 Bildpunktbestimmung

- Eine Mindestzahl von bekannten Referenzpunkten wird benötigt.
- Die Referenzpunkte werden mit Hilfe der Bildverarbeitung extrahiert und damit die Bildkoordinaten bestimmt.
- Im allgemeinen wird zum Kalibrieren ein Referenzobjekt mit einer Anzahl genau ausgemessener Referenzpunkte verwendet. Es werden mindestens 6 nicht koplanare referenzpunkte benötigt. Dazu bietet sich ein Würfel an. Bessere Ergebnisse bietet ein komplexeres Objekt z.B. in Stuhlform. (Abb. 3.8)
- Die Bildpunktbestimmung ist über verschiedene Verfahren möglich:
 - Schneiden von Kanten (Errechnen der Eckpunkte)
 - Manuelles Auswählen im Grauwertbild. (Ein Punkt in der Nähe des Eckpunktes wird selektiert.)

3.1.7 Modellierung einer Stereokamera

- Verwendung zweier Kameras als binokulares Stereo.
- Damit ein Punkt in beiden Bildern sichtbar ist, muss er im Schnittpunkt der Geraden liegen, der durch die unterschiedlichen Perspektiven festgelegt wird. (Abb. 3.9) Er wird durch Triangulation bestimmt.
- Wenn beide Kameras kalibriert sind, kann die Anordnung in homogenen Koordinaten beschrieben werden: $u_1 = A_1x$ und $u_2 = A_2x$. Dieses sind Geradengleichungen in Weltkoordinaten. Um den Schnittpunkt zu bestimmen muss ein überbestimmtes System der linearen Gleichungen gelöst werden: $Px = f$.
- Dieses System hat durch das Rauschen im allgemeinen keine exakte Lösung \rightarrow Methode der kleinsten Quadrate.
- Das Korrespondenzproblem ist der schwierigste Teil des binokularen Stereoverfahrens. Um Rechenaufwand zu vermindern, werden zu einem Punkt aus dem ersten Bild nur die Punkte zugeordnet, welche sich entlang der Epipolarlinie befinden. Diese können mit Hilfe der Kalibrierungsmatrizen berechnet werden.

3.2 Sensorsimulation

- Bei der Modellierung muss man Unsicherheiten in den Messungen berücksichtigen. Die wichtigsten Aspekte der Sensorsimulation sind:
 - Sensor-Aufnahmefähig: Welche Merkmale unter welchen Bedingungen?
 - Sensor-Zuverlässigkeit: Maß für Unsicherheit.
- Man unterscheidet fünf Klassen von Unsicherheiten:
 - Digitalisierungsfehler: n_d (bei jedem Sensor anwesend)
 - Systematische Fehler aufgrund ungenauer Fertigung des Sensors: n_s
 - Große Fehler wegen totalen Misserfolgs des Sensors (wenn z.B. das Korrespondenzproblem falsch gelöst wurde): n_g
 - Normalverteiltes Rauschen: n_n
 - Nichtnormalverteiltes Sensorrauschen: n_r
- Beitrag des Rauschens zur Messung eines Merkmals u : $u = \tilde{u} + n(u)$ $n(u) = n_d(u) + n_s(u) + n_n(u) + n_r(u) + n_g(u)$ dabei ist \tilde{u} die eigentliche Messung und $n(u)$ der Fehlervektor, der als Wahrscheinlichkeitsvektor mit Mittelwert 0 gegeben ist.
- Besseres Vorgehen: Alle Rauschen als normalverteilt annehmen ($n(u) = n_n(u)$)
- Nachteil: Fehler, welche nicht vom Rauschen verursacht werden, können nicht approximiert werden.
- Besseres Modell “gross error model”: $n(u) = (1 - \varepsilon)n_n(u) + \varepsilon n_g(u)$

Kapitel 4

Digitale Signalverarbeitung

Die mit Sensoren erfassten Signale sind analog und lassen sich im allgemeinen als eine Funktion mit kontinuierlichen Definitions- und Wertebereich darstellen.

4.1 Digitalisierung analoger Signale

- Abtastung (hier: Rasterung genannt), Quantisierung. (bekannt)

4.2 Fourier-Transformation

- Bei der Analyse linearer verschiebungsinvarianter Systeme spielt die Fourier-Transformation eine wichtige Rolle. Sie zerlegt das Signal in periodische Komponenten, bildet das Signal in den Frequenzraum ab und ist im allgemeinen eine komplexe Funktion.
- Umkehrfunktion: inverse Fourier-Transformation. Mit ihr erhält man aus dem Spektrum das ursprüngliche Signal.
- Bei der Abtastung ist das Abtasttheorem zu beachten (bekannt).
- Sind die Voraussetzungen für das Abtasttheorem nicht erfüllt, kommt es zu "Aliasing"-Effekten (siehe Bildgebende Systeme in der Medizin (BIM)). Diese Effekte lassen sich durch die Verwendung eines analogen (da aus digitalem Signal die hohen Frequenzen sich nicht mehr beseitigen lassen!) Tiefpassfilters beheben.

4.3 Digitale Bildverarbeitung

4.3.1 Histogramme und homogene Punktoperatoren

- Ein Histogramm $h(i)$ ist auf der Menge aller möglichen Grauwerte definiert. Jeder Wert $h(i)$ entspricht der Anzahl von Bildelementen mit dem Grauwert i .
- Punktoperationen dienen zur Korrektur oder Normierung der Helligkeit oder des Kontrasts, zur Korrektur nichtlinearer Kamerakennlinien und zum Ausgleich von Helligkeitsunterschieden.
- Homogene Punktoperatoren ändern einen Grauwert unabhängig von seiner Position im Bild.

- Abb. 4.4 (Ideales Histogramm mit einer bimodalen Verteilung (Minimum in Mitte (stellt auch Binarisierungsschwelle dar))).

4.3.2 Diskrete Fourier-Transformation und Faltung

- DFT:

$$G_{u,v} = F(g_{m,n}) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g_{m,n} e^{\frac{2\pi i m u}{M}} e^{\frac{2\pi i n v}{N}} \quad (4.1)$$

- Entsprechend die inverse DFT (Laufindizes u,v, Faktor 1/MN und negativer Exponent und g und G vertauscht)
- Die DFT ist eine lineare Transformation.

- Einer der wichtigsten Operationen in der Bildverarbeitung ist die Faltung:

$$f_{m,n} = g_{m,n} \star h_{m,n} = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} g_{m-k,n-l} h_{k,l} \quad (4.2)$$

- Die Matrix h wird als Gewichtsfunktion oder Faltungsmaske bezeichnet. Für die Berechnung des Wertes $f_{m,n}$ wird die Gewichtsfunktion h auf das Bildelement $g_{m,n}$ gelegt und am Punkt $h_{0,0}$ gespiegelt.
- Der Wert wird erhalten, wenn man die übereinanderliegenden Elemente der Bildmatrix und der Gewichtsfunktion multipliziert und aufsummiert. (Aufpassen beim Rand: am besten Bild um eine halbe Gewichtsmaskenbreite erweitern, da Bild um halbe Maskenbreite schrumpft!)
- Eine Faltung im Bildraum entspricht einer Multiplikation im Frequenzraum (deshalb DFT). Faltungstheorem ($F=GH$)

4.3.3 Digitale Filter

- Bandpassfilter (Hochpass-, Tiefpassfilter): Herausfiltern von Grauwerten bis zu einer gewissen Schwelle bzw. ab einer gewissen Schwelle.
- Glättungsfilter (Gaußfilter): Faltung der Bildfunktion mit einer Rechteckmaske (nxn gefüllt mit 1en), welche normiert ist. (Bei Gauss mit Glockenfunktion)
- Nachteil der Glättungsfilter ist, dass sie zu stark auf Ausreisser reagieren. Deshalb nimmt man **Medianfilter**. Dort werden die Grauwerte innerhalb eines Bildbereichs der Größe nach sortiert.
- Günstige Eigenschaften des Medianfilters: konstante Bildbereiche und Kanten bleiben erhalten.

4.3.4 Kantenextraktion

- Diskontinuitäten in der Bildfunktion werden als Kanten bezeichnet.
- Richtungsableitungen sind ein gutes Maß für die Änderung des Grauwertverlaufs.

- Im Frequenzraum wird die Ableitung zur Multiplikation der Transformierten mit einem der Ortsfrequenz proportionalen Faktor.
- Ableitungsoperatoren gehören zu den Hochpassfiltern. Mit diesen Operatoren ist die Kantendetektion schwierig, da die Ableitung schlecht zu berechnen sind und Messfehler in der Bildfunktion dabei noch vergrößert werden. Deshalb ist eine Glättung vor der Kantendetektion notwendig.

- Prewittoperator

$$P_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad P_y = \begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

- Sobeloperator:

$$S_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad S_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

- Die Rauschminderung wird bei diesen Operatoren durch Mittelung quer zur Ableitungsrichtung erreicht.
- Die Richtung und der Betrag des größten Anstiegs ist durch den Gradienten gegeben. Im Kantensbild können alle Pixel als Kantenelemente klassifiziert werden, in denen der Gradient einen bestimmten Schwellwert übertrifft.
- Schritte bei der Kanten hervorhebung: Grauwertbild \rightarrow Ableitungsoperatoren in verschiedene Richtungen \rightarrow (Gradient \rightarrow Aufsummierung) \rightarrow Binarisierung \rightarrow Kantensbild
- Der Laplace-Operator ist ein linearer, richtungsunabhängiger Operator und kann durch die Faltung mit der Maske

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

implementiert werden. Da er sehr rauschempfindlich ist, glättet man ihn meist zusätzlich mit einem Gaußfilter.

- Canny Operator: Geringe Wahrscheinlichkeit der Detektion falscher Konturpunkte, gute Lokalisierung der Kontur im Bild, Konturen genau einen Pixel breit.

4.3.5 Segmentierung

- Einheitlichkeitsprädikat P: Erfüllt, wenn Bereich dem Kriterium entspricht, sonst nicht.
- Die resultierenden Bereiche werden **Regionen** genannt, welche folgende Eigenschaften erfüllen müssen:
 - Jeder Bildpunkt ist genau einer Region zugeordnet
 - P erfüllt, für jede Region des Bildes
 - jede Region ist räumlich zusammenhängend
 - die Regionen sind maximal (d.h. Verschmelzung benachbarter Regionen liefern P=FALSE)

- Einfaches Verfahren ist Binarisierung (nur anwendbar, wenn Bild bimodal ist)
- Andere Möglichkeit: Kantenextraktion (Problem: Kanten oft nicht zusammenhängend). Deshalb Verfahren, die auf Kontinuitäten basieren:
- Regionenwachstum: Startpunkt spezifizieren (bekannt)
- Umgekehrtes Verfahren: Regionenteilung. Problem: Festlegung von P, Bestimmung der Anfangspunkte beim Regionenwachstum, richtige Teilungsstrategie
- Meist Kombination beider Verfahren: Split-and-Merge

Kapitel 5

Umweltmodellierung

- Das Weltmodell stellt für den Roboter eine Wissensbasis dar.
- Weltmodelle lassen sich nach verschiedenen Kriterien klassifizieren:
 1. nach Abstraktionsniveau:
 - geometrische Darstellung (sehr einfache Darstellungsmethode)
 - topologische Darstellung (berücksichtigt die Beziehungen der einzelnen Objekte)
 - semantische Darstellung (zusätzliche Informationen über Art und Struktur der betrachteten Objekte) Häufig wird ein **Entity-Relationship-Model** benutzt.
 2. Nach Operationsraum des Roboters:
 - 2-dimensional
 - $2\frac{1}{2}$ -dimensional: Sweeping Methode: Ebene Geometrien, die senkrecht zur Basisfläche stehen werden um einen bestimmten Betrag angehoben. (Schräge Kanten nicht darstellbar).
 - 3-dimensional
 3. Nach Umweltbedingungen des Roboters:
 - statische
 - dynamische
 - bekannt (alle Objekte im Weltmodell gespeichert)
 - unbekannt (noch keine Umweltinformationen im Weltmodell)
 4. Nach Anwendungsgebiet des Roboters:
 - strukturiert (nur wenige Arten verschiedenem Objekte; vorwiegend in geschlossenen Räumen)
 - unstrukturiert (häufig im freien Gelände)
 5. Nach Informationsgehalt:
 - Hierzu gehören Pfade, Freiraum, Objekte und gemischte Modelle.

5.1 Geometrische Modelle

5.1.1 Pfade

- einfachste Möglichkeit, Umwelt darzustellen. Auch partielle Modellierung genannt.

- keine geometrischen und topologischen Zusammenhänge erfasst.
- Kollisionsfreie Bewegung auf vordefinierten Pfaden oder Pfadlisten. Hindernisse werden nicht erfasst. Fahrkurse mittels Weltkoordinaten in Tabellen abgelegt.
- Eingabe per Teach-in oder mittels Grafikeditor.
- Automatische Generierung: Sichtgraphen:
 - siehe R1-Zusammenfassung
 - Spezielle Form: Tangentengraph. Reduzierung des Sichtgraphen auf Verbindungslinien, welche eine Tangente zwischen Hindernissen bilden (Abb. 5.2)

5.1.2 Freiraum

- Projektion auf zweidimensionale Grundrissdarstellung. Vorhandene Objekte und Hindernisse werden nicht berücksichtigt.
- Freiraumgraph: Knoten entsprechen Freiraumbereichen; Kanten den Verbindungen der Freiraumbereiche (Abb. 5.3)
- Verfahren zur Freiraumzerlegung unterscheiden sich in Darstellungsform der Freiräume (konvexe Polygone, allgemeine Kegel, Kacheln).
- **Konvexe Polygone:**
 - Dabei werden Freiflächen in konvexe Zellen (C-Zellen) zerlegt. (Abb. 5.4. mit zugehörigem Verbindungsgraph)
 - Vorteil: Disjunkte Polygone, welche den Raum in großflächige Zellen einteilen → verminderter Rechenaufwand bei Bahnplanung.
 - primitiveres verfahren: Zerlegung in Dreiecke (Abb. 5.5)
- **Allgemeine Kegel:**
 - siehe Abb. 5.6
 - Grundidee: Kursnetz aufbauen mit jeweils maximalen Abstand zu den Hindernissen.
 - Vorteil: Zusammenfassung möglichst großer Freiraumflächen
 - Nachteil: Orientierung an den Hindernissen (fraglich bei dynamischer Umgebung)
- **Kacheln:**
 - Objektorientierte Struktur, in der jedes Objekt der realen Umwelt durch eine Menge von Linien repräsentiert wird.
 - über die Karte werden parallel zur x-Achse Linien gezogen (und zwar durch die lokalen Maxima und Minima der Hindernisse). Die einzelnen Regionen bilden dann die Knoten des Freiraumgraphen (siehe Abb. 5.7).

5.1.3 Objekte

- Bei diesem Verfahren werden Objekte der realen Umwelt dargestellt (z.B. Türen, Wände, Hindernisse).

5.1.4 Gemischte Modelle

- Auch als Drahtmodelle (“wire frames”) bekannt.
- Markante Punkte des Objektes ermitteln (meist Ecken). Diese werden durch Kanten verbunden, welche auf der Objektoberfläche liegen. (meist sind dies auch die Kanten des Objektes)
- Neben Geraden auch Kreise, Kreisbögen oder Kegelschnitte als Kanten benutzt und mathematisch beschrieben.
- Auch sinnvoll, verdeckte Kanten zu entfernen. (siehe Abb. 5.8)

Oberflächenmodelle

- Nachbildung der Objektoberflächen, einzelne Oberflächenelemente (ebene(durch Kanten begrenzt) oder gekrümmte(mathematisch beschrieben(Zylinder, Torus etc.) oder Freiformflächen (näherungsweise beschrieben))) aneinandergesetzt.

Volumenmodelle

- Unterscheidung von Raumpunkten hinsichtlich ihrer Lage im Objekt.
- Repräsentationsmöglichkeiten:
 - **Begrenzungsflächenmethode:** Bestimmung der Flächennormale. Diese zeigt entweder ins Objekt hinein oder aus dem Objekt heraus. Diese Topologie und Geometrie werde hierarchisch getrennt gespeichert. (Abb. 5.10)
 - **Grundkörperzerlegung** (CSG (constructive solid geometry)): parametrisierbare Grundelemente (Kubus, Block, Prisma, Zylinder, Kegel, Kugel). Die jeweiligen Parameter müssen bekannt bzw. gespeichert sein (ausserdem deren Transformation zur Positionierung). Boolesche Verknüpfungen notwendig (Abb. 5.11) *Sehr hoher algorithmischer Aufwand.*
 - **cell decomposition:** umgekehrter Vorgang der Grundkörpermethode. Im Gegensatz zur CSG kennt die CD nur die Operation “kleben”, weiterhin durchdringen sich niemals zwei Objektkomponenten.
 - **Volumenapproximation** (spatial occupancy (SO)): Speichereffizient mit Octree (bekannt) (Abb. 5.12 (Stuhl mit runder Lehne))
 - **Einhüllende Quader:** Quader sind disjunkt und durch vier Eckpunkte im kartesischen Koordinatensystem genau beschreibbar.
 - **Erkennung bzw. Generierung von Geradensegmenten:** wichtige Methode ist die geeignete Zusammenfassung mehrerer Messwerte zu Regionen konstanter Entfernung (regions of constant depth RCD), die dann als Geradensegmente dargestellt werden können. Ein weiteres Verfahren verwendet den *Kalman Filter* zur Approximation von Geradensegmenten. dabei wird versucht aus mindestens drei Messungen die genaue Lage und Orientierung eines Geradensegmentes zu approximieren. Vorteilhaft ist die Möglichkeit der Fehlerabschätzung von position und Orientierung.

Gemischte Modelle

- Unterschied zu den bisherigen Verfahren: Es werden sowohl Freiräume als auch Objekte erfasst.
- **Gitter:**
 - Die Form der Hindernisse wird angenähert.
 - Verschiedene Gitterstrukturen:
 - * Gitter mit **einheitlicher Zellenzerlegung** (Attribute: frei, belegt, unbekannt):
 - Quadratische Gitter
 - Sphärische Gitter: Gitter ist auf Roboter zentriert. Vorteil: ebenfalls oft in sphärischen Koordinaten vorliegenden Sensordaten relativ einfach in das Gitter übertragen werden können.
 - * Gitter mit **hierarchischer Zerlegung:**
 - Quadtree oder Octtree. Erstellung der Bäume rechenaufwendig.
 - * Gitter mit **beliebiger Zerlegung** (Zellen beliebiger Form und Größe):
 - Zerlegung in rechteckige Zellen unterschiedlicher Größe: Durch vorrausschauende Zerlegung soll die Anzahl der gemischten Zellen möglichst klein gehalten werden (Abb. 5.15)
 - Zerlegung der Umwelt in Dreiecke: Ausgangspunkt: Berechnung eines Voronoi-Diagramms. Es unterteilt den Raum so in polygonale Zellen, dass in jeder Zelle eine Ecke liegt und dass weitere Punkte dieser Zelle diesem Eckpunkt näher liegen als allen anderen Hinderniseckpunkten! Grundlage ist der mittlere Abstand aller Hinderniseckpunkte zueinander. Flächenverbindungsgraph (Abb. 5.16; Abb. 5.17; Abb. 5.18)
- **Konfigurationsraum:**
 - Gesamtheit der Punkte, welche mit dem freien Ende des Roboters (meist TCP) oder mit dem Roboterfahrzeug selbst erreicht werden können. Unterschied zum Arbeitsraum sind die Anzahl der Dimensionen.
 - Der Arbeitsraum hat die Dimension des erreichbaren Raumes (1-, 2-, 3-dimensional).
 - Die Dimension des Konfigurationsraumes entspricht der Anzahl der Freiheitsgrade des Robotersystems.
 - Großer Berechnungsaufwand und Speicherbedarf.
 - Oft vereinfachter Konfigurationsraum (Roboter zu einem Punkt reduziert; Objekte in gleichem Maße aufgebläht). (Abb. 5.20)
 - In dynamischer Umgebung muss nach jeder Änderung der Konfigurationsraum neu berechnet werden!

5.2 Topologische Modelle

- Topologische Beziehungen sind als Graph- oder Baumstruktur darstellbar und unterstützen die globale Wegplanung.
- Topologische Modelle leiten sich aus den geometrischen Modellen ab. Sie gliedern sich in Pfade mit ihren Pfadgraphen und Pfadattributen. Pfade können z.B. aus Voronoi-Diagramm oder Potentialfeldern erzeugt werden. (Abb. 5.21)

- Treten auf einem berechneten Weg unerwartete Hindernisse auf, muss kurzfristig ein anderes Umweltmodell benutzt werden.

5.3 Semantische Modelle

- Semantische Darstellung stellt die letzte Abstraktionsebene der Modellierungsarten dar.
- Besondere Bedeutung im Rahmen der Mensch-Maschine-Kommunikation.
- Objekte lassen sich klassifizieren. Auch Objekteigenschaften (Dynamik von Türen etc.) sind von Bedeutung.
- Zur semantischen Umweltbeschreibung gehören weiterhin:
 - Funktion der Objekte
 - Landmarken
 - geometrische Objekte (Stationär, quasistationär, dynamisch)
 - topologische Umweltdarstellung
 - Bewegungssequenzen
 - Positionen (Speicherung bestimmter Positionen für Positionskorrektur, Sichtbereiche für Landmarken etc.)

Kapitel 6

Multisensorintegration und -fusion

- Einzelne Sensoren können jeweils nur sehr partielle Beschreibungen der realen Welt liefern.

6.1 Einführung in die Multisensordatenverarbeitung

- Multisensorsysteme, um die inhärenten Nachteile von Einzelsensoren zu verringern.
- Durch integrierten Einsatz mehrerer Sensoren können die Ungenauigkeiten besser erkannt und eventuell auch behoben werden.

6.1.1 Multisensorintegration

- Integrationsprozess beinhaltet: Kombination artfremder Sensoren, Kombination von Sensoren gleicher Spezifikation aus unterschiedlichen Positionen, Kombination der Sensorinformation eines Sensors zu unterschiedlichen Zeitpunkten.
- Dabei gibt es mehrere Möglichkeiten zur Sensorintegration:
 - **Konkurrierende Integration:** bzgl eines einzigen Merkmals. Ziel ist die Reduktion von Unsicherheiten.
 - **Komplementäre Integration:** bzgl unterschiedlicher Merkmale und/oder unterschiedlicher Objekte. Ziel: Vervollständigung von Informationslücken.
 - **Kooperative Integration:** Verarbeitung zusätzlicher Information, die gemeinsam von unterschiedlichen Sensoren gewonnen wird.
- Vorteile der Integration mehrerer Sensoren sind:
 - Redundanz (reduziert die Messunsicherheit, erhöht somit die Erkennungsgenauigkeit von Merkmalen, Erhöhung der Zuverlässigkeit im Falle von gestörten oder fehlerhaften Sensoren)
 - Komplementarität
 - Rechtzeitigkeit (Umweltinformationen deutlich schneller verfügbar, Möglichkeit der parallelen Berechnung einzelner Integrationschritte)
 - Geringe Kosten

6.1.2 Multisensorfusion

- Sensorfusion ist ein Prozess, durch den die Daten unterschiedlicher Sensorsysteme in verschiedenen Stadien der Integration in eine einheitliche Darstellungsform gebracht werden können.
- Teilgebiet der Sensorintegration.
- Mehrere Fusionsmethoden:
 - Entscheidung (Entscheidung für jeweils eine vorliegende Informationsquelle zu bestimmten Zeitpunkten. Grundlage: Beurteilung der Wahrscheinlichkeit oder Zuverlässigkeit einer Information)
 - Durchschnitt (Ergebnis: Mittelung aller Datenquellen, die eventuell entsprechend der Zuverlässigkeit oder des Informationsgehaltes einer Informationsquelle gewichtet wird.)
 - Führung/Leitung (gezielter Einsatz eines Sensorsystems der aus vorhandenen Informationen abgeleitet wurde. Z.B. bei zweistufiger Hinderniserkennung: zuerst eher qualitativ, dann genau vermessen)
- In der Robotik wird versucht, aus einer oder mehreren Sensorinformationen ein Umweltmodell zu erzeugen.
- In der Realität treten Störungen auf. Deshalb werden **Schätzverfahren** eingesetzt. In einem entscheidungs- oder Schätzprozess wird aus den verrauschten Messsignalen auf das wahrgenommene Ereignis geschlossen. Ereignisraum (Störungen/Verzerrungen) → Beobachtungsraum (fehlender Teil) → Entscheidungsraum.
- Problem: Ungenauigkeiten und Unsicherheiten. Besonders wichtig, wenn Ergebnis Grundlage weiterer Fusions Schritte ist (siehe Abb. 6.3) (Sensoreinsatzplanung, Umweltmodell, Datentransformation, niedrige Ebene (rohe Sensordaten) → hohe Ebene, Signal-zu-Symbol-Transformation)
- Wichtiges Problem: Justierung bzw. Zuordnung der Sensorinformationen der einzelnen Sensoren zu einem bestimmten Umweltmerkmal. In vielen Fällen kann der Messfehler als normalverteiltes, stochastisch unabhängiges Rauschen modelliert werden.

6.2 Architektur von Multisensorsystemen

- Motivation: Gesamtsystem soll autonom und dynamisch auf Vorgänge in der realen Welt reagieren.
- Wichtige Aspekte, die berücksichtigt werden müssen:
 - Robustheit (z.B. bei Ausfällen von Teilkomponenten)
 - Konfigurierbarkeit (leicht konfigurierbar!)
 - Spezifikation (Fähigkeiten einzelner Sensoren müssen genau definiert sein, ebenso die Informationen, die der Sensor liefert)
 - Validierung (Überprüfbarkeit der Fähigkeiten)
 - Leistungsfähigkeit (zeitliche und qualitative Anforderungen müssen überprüfbar sein).
- Hierarchische Systeme: (z.B. NASREM). Nachteil: unflexibel.
- Heterarchische Systeme: flexibler und fehlertoleranter. z.B. Blackboard-Systeme. Für Multi-sensorik: sehr einfache Integration unterschiedlicher Sensoren.

6.2.1 Verteiltes Sensor- und Roboterkontrollsystem

- siehe Abb. 6.5
- Netzwerk von Agenten (Sensing Agent (liefert Informationen über reale Welt), Action Agent (ändert Zustand der realen Welt), Reasoning Agent (Herleitung weiterer Informationen aus eigenem Wissen))
- Koordinator, Weltmodell, Bewegungskontrolle, Blackboard, Blackboard-Manager.
- Kommunikation zwischen allen beteiligten Partnern erfolgt über die Blackboard-Struktur.
- Jeder Agent besitzt ein lokales Weltmodell.

6.2.2 Wissensbasierte Roboter-Arbeitszelle der Purdue Universität

- Siehe Abb. 6.6
- Zentraler Supervisor: Koordination und Kontrolle der Aktivitäten des Gesamtsystems (gilt auch für direkte Interaktion zwischen den Subsystemen)
- Bewegungskontrolle: Aufgabe: Durchführbarkeit der verlangten Operationen zu überprüfen und zu überwachen.
- globale Wissensbasis: Enthält Informationen, die für eine automatische Montage notwendig sind (Modelle der Einzelteile, Montageanweisungen,...)
- Aktuelles Weltmodell: Beschreibung aller bekannten Objekte in der Arbeitszelle (auch deren Lage und Orientierung). Bei erkannten Veränderungen: Aktualisierung (auch als dynamisches Weltmodell benannt).
- Sensor-Subsystem: enthält alle Sensoren, deren Prozessorzyklus größer ist als der des Roboters. (=deren Verarbeitung viel Zeit benötigt. Rest wird von Bewegungsüberwacher kontrolliert).

6.2.3 Logische Sensoren

- Die Logische-Sensor-Spezifikationssprache führt zu einer geräteunabhängigen Beschreibung von Sensoren.
- Eigenschaften von Logischen Sensoren:
 - Ein Logischer Sensor ist ein Netzwerk, das aus Subnetzen besteht, die wiederum Logische Sensoren darstellen (Rekursivität)
 - Er wird nur aus Termen anderer Logischer Sensoren definiert.
 - Er generiert eine seinem Typ spezifische Ausgabe, d.h. die von ihm detektierbaren Merkmale.
 - Komponenten: Weltmodell, Multisensor Kernel (MKS), Reihe von Sensorsystemen (siehe Abb. 6.7)

6.2.4 das Multisensorkonzept der Universität Karlsruhe

- Die Struktur besteht im Wesentlichen aus vier Funktionsblöcken (Abb. 6.8):
 - Planung (Erstellt aus explizit formuliertem Handlungsauftrag für das Gesamtsystem die einzelnen Aktionspläne)
 - Exekutive
 - Überwachung (beinhaltet Multisensorsystem)
 - Steuerung (Effektoren)
- Das Multisensorsystem (Abb. 6.9) ist in drei Ebenen aufgeteilt:
 1. Vorverarbeitung der Sensordaten
 2. Vergleich mit Referenzdaten aus dem Weltmodell: Die Referenzdaten kommen aus dem Weltmodell, auf das nach dem Sichtenmodell für relationale Datenbankschemata zugegriffen wird.
 3. Diagnose mit wissensbasierten Techniken: Falls Vergleich in zweiter Ebene ungünstig → umfassende Analyse, um Neuplanung des Ablaufes zu ermöglichen. Analyse über Blackboard-Konzept.

6.2.5 Standard Reference Model for Telerobot Control System

siehe Robotik 1 Zusammenfassung

6.3 Komponenten eines Multisensorsystems

Sensormodell, Wissensbasis und Umweltmodell, Fusionsmethoden, Sensoreinsatzplanung

6.3.1 Sensormodelle

- Repräsentation der Fähigkeiten eines Sensors, die Informationen aus der realen Welt gewinnt.
- So werden z.B. physikalische Eigenschaften der Sensoren modelliert, welchen Arbeitsbereich sie haben, wie sie angesteuert werden. Andere konzentrieren sich auf die mathematische Beschreibung der Informationen, die ein Sensor liefert (besonders die Unsicherheiten).

Logische Sensoren

- Komponenten (Abb. 6.11):
 1. Eindeutiger Name
 2. Charakteristischer Ausgabevektor (Beschreibt den Datentyp)
 3. Interpreter
 4. Menge von Programmeinheiten, die aus den Daten der logischen Sensoren den Ausgabevektor berechnen.
 5. Selektor: Entscheidet und überwacht, welches Programmergebnis den jeweiligen Auftraggebern übergeben wird.
- Kommunikationsverbindungen definieren Netzwerk. Sensordatenverarbeitung somit hierarchischer Prozess.
- Abstraktion von unten nach oben (z.B. Abb. 6.12)

Hierarchische Integration

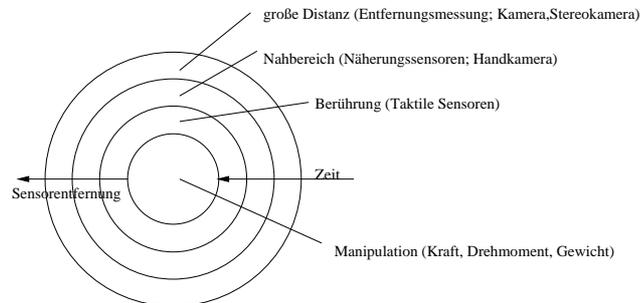


Abbildung 6.1: Vier Phasen der hierarchischen Integration

Entscheidungsträgermodell

- Team von Entscheidungsträgern. Jeder Sensor verhält sich als Mitglied eines Teams mit gemeinsamen Ziel.
- Drei Komponenten:
 - **Sensormodell (Beobachtungsmodell)**: beschreibt Messungen (Annahme: alle a-priori-Informationen gegeben; Zustand des Sensors bekannt); repräsentiert das Sensorrauschen und die Sensorfehler (gewichtet normalverteilt).
 - **Abhängigkeitsmodell**: beschreibt Informationsaustausch zwischen Sensoren. (Beispiel: Abb. 6.14)
 - **Zustandsmodell**: berücksichtigt die Fähigkeit bestimmter Sensoren, die Beobachtungscharakteristik (Messposition, -orientierung) zu ändern.
- Jeder Beobachter liefert eine Aussage über den Zustand der Umwelt in Form einer unsicheren Aussage.

6.3.2 Wissensbasis und Umweltmodell

- Aus geometrischen Modell werden z.B. Vorhersagen von Messungen abgeleitet, um aus dem Vergleich mit tatsächlichen Daten die Position des Fahrzeugs in dem Modell zu bestimmen.
- Zwei Prinzipien der geometrischen Umweltdarstellung:
 - Gitterdarstellung: definiert Rasterstruktur
 - parametrische Darstellung: approximiert Hindernisse durch ein Kanten-, Oberflächen oder Volumenmodell.
- Die geometrische Beschreibung kann entweder zu Beginn zur Verfügung stehen, oder in einer Kartographierungsphase erstellt werden.
- Adaption des Umweltmodells notwendig falls sich die Position eines Objektes verändert, die Beschreibung eines Objektes an sich nicht mehr richtig ist oder ein neues Objekt vorhanden ist.

6.4 Fusionsmethoden

Zentraler Teil eines Multisensorsystems.

6.4.1 Numerische Fusionsmethoden

Numerische Fusion ist die direkte Verknüpfung von Messdaten.

Stochastische Approximation

- wird beschrieben durch allgemeines Sensormodell.
- Nach einer erfolgten Messung wird die Differenz zwischen der realen verrauschten Beobachtung und der aufgrund der bisherigen Schätzung zu erwartenden Beobachtung berechnet. Dieser Fehler wird gewichtet auf den vorherigen Schätzwert addiert.
- Es lässt sich fast nichts über die Konvergenzgeschwindigkeit und über den Schätzfehler zu einem bestimmten Zeitpunkt aussagen. Damit Konvergenz erfüllt ist muss u.a. die Reihe der Gewichtungsfaktoren gegen 0 konvergieren.

Gewichteter Durchschnitt

- Redundante Sensorinformationen werden gemittelt. Methode sehr schnell → für zeitkritische Anwendungen anwendbar.
- Toleranzbereich: Nur Werte aus diesem Bereich werden akzeptiert. Intervallgrenzen können anhand von a-priori-Wissen über idealen Messbereich der Sensoren bestimmt werden.
- Nachteil: Fehlmessungen haben grossen Einfluss (deshalb Toleranzintervall); Unsichere Werte haben den gleichen Einfluss, wie sichere Werte (deshalb Gewichtung)
- Problem beider Ansätze: es wird nur ein Schätzwert gefunden, aber keine Aussage über die Qualität dieser Schätzung.

Bayes'scher Schätzer

- Der Bayes'sche Schätzer ist keine Fusionsmethode (Es wird kein Schätzwert ausgegeben). Es wird nur die Wahrscheinlichkeit einer Objekthypothese ausgegeben.
- Er ist Grundlage für die folgenden Verfahren und betrachtet die Ungenauigkeit als eine Wahrscheinlichkeit.
- Ausgangspunkt ist die bedingte Wahrscheinlichkeit der Sensormesswerte in Abhängigkeit von den Objektmerkmalen. Umgekehrt kann man aber auch anhand von n stochastisch unabhängigen Ereignissen auf die Objekteigenschaften schliessen.
- Voraussetzung: Um zu berechnen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Ereignis θ_i Ursache der Sensormessung z war, müssen die a-priori Wahrscheinlichkeit $P(\theta_i)$ eines Ereignisses und die Übergangswahrscheinlichkeit $P(z|\theta_i)$ bekannt sein.

Kalman Filter

- Optimaler rekursiver Datenverarbeitungsalgorithmus, der alle zur Verfügung stehenden Sensordaten entsprechend ihrer Genauigkeit verarbeitet.
- Für die aktuelle Schätzung wird folgendes Wissen verwendet:
 - Dynamik des Systems und der Messgeräte
 - statistische Beschreibung des Systemrauschens, der Messfehler und der Unsicherheit des dynamischen Modells
 - alle verfügbaren Informationen über die Anfangsbedingungen der zu bestimmenden Werte.
- Der Filteralgorithmus ist rekursiv.
- Der Einsatz des Filters wird erforderlich, wenn der Systemzustand nicht direkt gemessen werden kann, sondern nur aus den Daten, auf deren Erfassung die Messeinrichtung spezialisiert ist, bestimmt werden kann.
- Er erzeugt aus dem gesamten a-priori-Wissen eine Schätzung der gewünschten Variablen bei der der Fehler minimal ist.

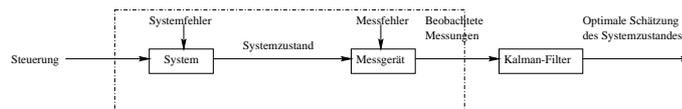


Abbildung 6.2: Typische Anwendung des Kalman-Filters

- Allgemeine System- und Zustandsbedingungen:

$$\begin{aligned}\vec{\theta}(t+1) &= A(t)\vec{\theta}(t) + B(t)\vec{u}(t) = G(t)\vec{\theta}(t) + K(t)\vec{y}(t) \\ \vec{y}(t) &= F(t)\vec{\theta}(t) + \vec{w}(t)\end{aligned}$$

- θ ist der innere Zustand des Systems zum Zeitpunkt t , u die Eingangsgröße, y die Beobachtungsdaten, A das Systemmodell, B das Rausch- bzw. Störungsmodell, F die Beobachtungsmatrix, w der Messfehler, K das Kalman-Gain und G eine weitere Gewichtungsmatrix.
- K ist hoch, wenn die Sensordaten sehr genau sind und der Schätzer sehr unsicher ist.
- Algorithmus:
 1. Initialisierung der Anfangswerte
 2. Berechne den Kalman-Gain für den Zeitpunkt t
 3. Berechne den Schätzwert $\hat{\theta}(t+1)$ unter der Benutzung der bekannten Sensordaten $\vec{y}(t)$
 4. Berechne die verbesserte Kovarianzmatrix des Schätzfehlers $P(t+1)$
 5. Wiederhole ab Schritt 2 für den Zeitpunkt $t := t + 1$.
- Kalman Filter als Spezialfall des Bayes'schen Schätzers:

- In jedem neuen Fusionsschritt wird nur die bisherige Gesamtunsicherheit und die Unsicherheit des neuen Messwertes berücksichtigt. Dadurch ist eine exakte Unsicherheitsabschätzung des Endergebnisses möglich.
- Weiterer Vorteil: Werte mit größerer Unsicherheit beeinflussen die aktuellste Schätzung weniger, als sehr exakte Werte.
- Vorteile des Bayes'schen Schätzers:
 - Sämtliche Messungen können mit Unsicherheiten versehen werden
 - Fehlerabschätzung des Endergebnisses leitet sich direkt aus den Fehlerabschätzungen der einzelnen Messungen ab
 - rekursiv
 - Fusionsergebnis ist bei Verwendung des Kalman-Filters optimal im statistischen Sinne.
- Bei Nichtlinearität: Erweiterter Kalman Filter
- Dezentralisierter Kalman Filter (an jedem Sensor wird eine lokale Zustandsschätzung berechnet): Jeder Sensor kommuniziert mit den anderen Sensoren und nimmt deren Daten auf.

Maximum-Likelihood-Schätzung

- Prinzip: Entscheidung für die Beobachtung bzw. das Ereignis, dessen Auftreten am wahrscheinlichsten ist.
- Ausgangspunkt hierbei ist die Dichtefunktion der Übergangswahrscheinlichkeit.

Methode der gewichteten kleinsten Quadrate

- Es wird auf vorhandene stochastische Informationen verzichtet.
- Das Schätzproblem wird wie ein deterministisches Optimierungsproblem behandelt.

Evidentes Schließen (Dempster-Shafer-Reasoning)

- Hier werden keine a-priori Informationen vorausgesetzt. Einer Menge von Aussagen wird eine Zuverlässigkeit zugeordnet, im Gegensatz zum Bayes'schen Prinzip, bei dem jede Einzelaussage bewertet werden muss.
- Als Ergebnis erhält man die Aussage, wie glaubwürdig die Zusammenfassung aller Einzelmessungen ist und somit die wahrscheinlichste Kombination aus den Einzelmessungen.
- Die Methode unterscheidet sich von der Bayes'schen dadurch, dass ein Unsicherheitsintervall berechnet wird, wodurch ein Mangel an Vorinformation ausgeglichen wird.

Fuzzy-Set Theorie

- Fuzzy-Logik orientiert sich sehr stark an der menschlichen Denkweise sowie an der natürlichen Sprache.
- Es gibt zwei Zugehörigkeitsfunktionen: Eine numerische (besteht aus einem Vektor, dessen Dimension vom Grad der Feinheit abhängt) und eine funktionale (Zugehörigkeit wird durch mathematische Funktion beschrieben (Glockenkurve, Trapez, Dreieck..)).
- Zuordnung eines Sensordatums zu einer Fuzzymenge wird Fuzzyfikation genannt. Die gebräuchlichsten Operationen sind Vereinigung, Durchschnitt und Komplement.

6.4.2 Geometrische Fusionsmethoden

- Hier wird kein Eingabevektor zu einem Ausgabevektor verrechnet, sondern in eine Darstellung integriert, die dann erst bei Bedarf auf geeignete Art und Weise interpretiert wird.

Gitterbasierte Ansätze

- Methode zur Darstellung von Hinderniswahrscheinlichkeiten in einem Gitter (CMU-Methode).
- Eignet sich besonders für verrauschte ungenaue Sensordaten wie z.B. die Abstandsmessungen des US-Sensors.
- Die Systeme verwenden kein a-priori-Wissen
- **Vorverarbeitung der Sensordaten:**
 - Grundvoraussetzung: Bekanntsein der Roboterposition
 - Sinnvolle Messentfernung = Minimum aus Abstand des Sensors vom Boden und maximaler Messentfernung.
- **Besetzungswahrscheinlichkeiten:**
 - Bei CMU-Methode bleibt Roboter fest und Ring von Sensoren macht eine Messung. Dabei wird dem Messwert in Abhängigkeit seiner Position innerhalb der Schallkeule ein Wahrscheinlichkeitswert zugeordnet.
 - Der Bereich zwischen Sensor und Messbereich wird als wahrscheinlich leer angenommen. Der eigentliche Messbereich beinhaltet die Unsicherheit über die Lage des Objektes (Werte nahe der akustischen Achse besitzen eine höhere Wahrscheinlichkeit als die in der Peripherie gelegenen). (Abb. 6.17 oben)
- **Vereinigung mehrerer Messungen bzw. Aktualisierung einer bereits gespeicherten Karte:**
 - Liefern verschiedene Messungen die Aussage, dass eine bestimmte Zelle frei ist, so vergrößert sich die Wahrscheinlichkeit, dass diese Zelle unbesetzt ist.
 - Gegensätzliche Sensoraussagen schwächen sich ab.
 - Ablauf der Kartographierung:
 - * Initialisierung der Karte (alles unbekannt)
 - * Überlagerung der unbesetzten Bereiche
 - * Überlagerung der besetzten Bereiche
 - * Schwellwertprozedur zur Erstellung der endgültigen Karte.
 - siehe Abb 6.18 (3D-Karte; frei = Minimum; Ebene = unbekannt; besetzt = Maximum)
- **Das Wahrscheinlichkeitsgitter zur Echtzeitkartographierung:**
 - Dieses Wahrscheinlichkeitsgitter unterscheidet sich nur in der Art der Eintragung und Aktualisierung von den bisherigen Wahrscheinlichkeitsgittern.
 - Belegungswerte sind natürliche Zahlen aus dem Intervall $[0,15]$. Hohe Belegungswerte: Zelle wahrscheinlich belegt; niedrige Belegungswerte: Zelle entweder frei oder keine Information.

- Zwei Bereiche des Sensorblickfeldes:
 - * Im ersten Bereich befindet sich das reflektierte Objekt
 - * Der zweite Bereich liegt zwischen dem ersten Bereich und dem Sensor.
- Im Gegendatz zur CMU-Methode werden aber nicht alle Zellen des Blickfeldes berücksichtigt, sondern nur die Zellen, die sich auf der akustischen Achse befinden.
- Siehe dazu Abb. 6.19 und 6.20. Dekrementierung (zweiter Bereich) viel kleiner, als Inkrementierung (erster Bereich).
- Verfahren sehr schnell.

- **Gitterbasierte Kartographie mit Vertrauenswerten:**

- Nur ein Ultraschallsensor, welcher eine rotierende Antenne besitzt.
- lokales Modell: nur die Bereiche, welche sich in der Nähe des Roboters befinden und die im Blickfeld des Sensors liegen.
- globales Modell: Vereinigung aller lokalen Modelle.
- Sekundäre Echos stellen eine Hauptfehlerquelle dar. Um deren Einfluss zu verringern wird eine Vorfilterung (Beziehung zwischen zwei Sensorwerten eines Objektes aus unterschiedlicher Position) der Sensordaten vorgenommen.
- Vertrauen in die Sensoraussagen wird durch eine ganze Zahl im Intervall $[0,100]$ angegeben. Höchste Besetztwerte ergeben sich, wenn mehrere Messungen ein Objekt erkennen, dessen Orientierung senkrecht zur Strahlrichtung des Sensors ist.

- **Gitteraktualisierungsmethode mittels Funktionalbeziehung:**

- Belegungswerte von 0 (frei) über 50 (unbekannt) bis 100 (besetzt)
- Die Aktualisierung orientiert sich an Methoden, denen Bayesformeln zugrunde liegen, d.h. der aktuelle Belegungswert ist eine Funktion des bisherigen Zellwertes und der neuen Sensordaten.
- Kurve zur Aktualisierung: Abb. 6.22 (“Murmelmuster” x-Achse: alte Belegungswerte, y-Achse: neue Belegungswerte)

Parameterbasierte Ansätze

- Wichtigsten Ansätze. Methode der Regionen konstanter Entfernung und die Erkennung von Geradensegmenten mittels Kalman Filter.
- **Regionen konstanter Entfernung RCD:**
 - Die Entfernung einer RCD ergibt sich als Mittelwert aller Abstandswerte der in der RCD enthaltenden Echos.
 - Schwelle für Abstandsdifferenz (max - min). Wenn Wert oberhalb dieser Schwelle liegt, wird eine neue einelementige RCD erzeugt.
 - Abb. 6.23 (Sonaraufnahme eines bekannten Raumes (aehnelt einer Laserscanneraufnahme um 360°)) und Abb 6.24 (RCDs mit Mindestbreite von 10° (Abstandslinien zu Kreissegmenten mit 10° Winkel))
 - Zwei Bedingungen:

- * Kreis-Test: Alle RCDs, die zu einer ebenen Fläche gehören, haben diese Fläche als Tangente, während alle zu einer Ecke zugehörigen RCDs sich in genau einem Punkt (der Ecke) schneiden.
- * Grenzwinkel-Test: Die Richtung des vermuteten Objektes muss innerhalb der Grenzwinkel α_u und α_l liegen (Abb. 6.26)
- Mehrere beobachtete Segmente werden anschliessend zu Objekten gruppiert.
- Objekte gelten solange als unbekannt, bis mindestens drei RCDs die entsprechende Objekthypothese bestätigen, bzw. bis der Prozentsatz der Paarkombinationen, die eine alternative Objekthypothese unterstützen, unter 70% abgesunken ist.
- Konsequenzen für die Beobachtung von RCDs:
 - * Auf Basis einer einzigen Umweltaufnahme ist es unmöglich, zwischen verschiedenen Objektmerkmalen bzw. Objekttypen zu unterscheiden
 - * Jede RCD kann durch einen einzigen Abstandswert und durch die Richtung zum RCD-Mittelpunkt parametrisiert werden.
- **Erkennung von Geradensegmenten mittels Kalman Filter:**
 - Die Geradensegmente werden dabei in einem externen Koordinatensystem angegeben, was den Vorteil hat, dass auch Abstandsmessungen eines sich bewegenden Roboters integriert werden können.
 - Erst nach Generierung eines Segmentes wird die Unsicherheit des Roboterposition zur Segmentunsicherheit addiert.
 - Es wird erst dann ein Segment erzeugt, wenn mindestens drei aufeinander folgende Messungen innerhalb eines Toleranzbereiches liegen. Aus diesen drei Messungen wird der senkrechte Abstand zum Ursprung des Koordinatensystems und die Orientierung des Geradensegmentes berechnet.
 - Die Anpassung dient der Kombination mehrerer Segmente zu einem zusammengesetzten Modell. Hier wird versucht, Ähnlichkeiten in der Orientierung und der Kolinearität, sowie Überlappungsbereiche zu finden.
 - Abb. 6.29 (3 Sensorpositionen haben einen jeweils größeren Echobereich detektiert. Ein-gezeichnete mögliche Lagen der Liniensegmente)
 - Nachteil: kurze Liniensegmente (z.B. Tischbeine) werden nicht erkannt, da keine zeitliche Integration von einzelnen Sensordaten, sondern nur von bereits erzeugten Liniensegmenten erfolgt.