

INHALTSVERZEICHNIS

1 Sensoren	4
1.1 Definition	4
1.2 Charakteristische Größen eines Sensors	4
1.3 Klassifikation von Sensoren	5
2 Interne Sensoren	5
2.1 Positionssensoren	5
2.1.1 Potentiometer	5
2.1.2 Optische Codierer	5
2.2 Geschwindigkeitssensoren	6
2.3 Beschleunigungssensoren	6
2.3.1 Piezoresistiv	7
2.3.2 Piezoelektronisch	7
2.4 Inertial Navigation System (INS)	7
2.4.1 Gyroskop (Kreiselkompass)	8
2.4.2 Mikromechanische Vibrationskreisel	8
3 Externe Sensoren	8
3.1 Taktile Sensoren	8
3.1.1 Tastende & gleitende Sensoren	9
3.1.2 Kraft-Momenten-Sensoren	9
3.2 Näherungssensoren	9
3.2.1 Optische Sensoren	9
3.2.2 Akkustische Sensoren	10
3.3 Abstandssensoren	10
3.3.1 Laufzeitbasiert	10
3.3.2 Triangulationsbasiert	10
3.4 Visuelle Sensoren	11
3.4.1 Photodioden	11
3.4.2 CCD (Charge coupled devices, unterschiedliche Übertragungstechniken)	11
3.4.3 CMOS (Frontkamera Smartphone, Complementary Metal Oxide Semi-conductor)	12
3.4.4 Farbverarbeitung	13
3.4.5 Kamerasysteme	13
3.4.6 Bildrepräsentation	14
3.5 Positionssensoren	14
3.5.1 Global Positioning System (GPS)	14
3.5.2 Natürliche/künstliche Landmarken	15
4 Sensormodellierung	15
4.1 Mathematischen Sensormodell	16

4.2	Modellierung	16
4.2.1	Kraft-Momenten-Messdose	16
4.2.2	Datenhandschuh	16
4.2.3	Modellierung einer Kamera	16
4.2.4	RotatingSick	17
4.3	Sensorsimulation	17
5	Signalverarbeitung	17
5.1	Digitalisierung	18
5.2	Fourier-Transformation	18
5.3	Abtasttheorem	18
6	Optische 3D Sensoren	19
6.1	Lochkameramodell	19
6.2	Erweitertes Kameramodell	19
6.3	Stereogeometrie/Epipolargeometrie	20
7	Bildverarbeitung	21
7.1	Histogramme	21
7.2	Filter	21
7.3	Glättung - Tiefpass	21
7.4	Kantendetektoren - Hochpass	21
7.5	Segmentierung	22
8	Merkmalsextraktion	22
8.1	Korrelationsfunktionen	22
8.2	Eckendetektoren	23
8.2.1	Moravec-Operator	23
8.2.2	Harris Corner Detector	23
8.2.3	Good Features To Track	24
8.3	Einfache Deskriptoren	24
8.4	Aktuelle Merkmale (Detektor + Deskriptor)	24
8.4.1	Scale Invariant Feature Transform (SIFT)	24
8.4.2	Speeded Up Robust Features (SURF)	25
8.4.3	Maximally Stable Extremal Regions (MSER)	25
8.5	Matching von Merkmalen	25
8.6	Objekterkennung auf der Basis von Punktmerkmalen	26
8.7	6-DoF Lageschätzung	26
9	Umweltmodellierung	27
9.1	Abstraktionsniveau: Sensordaten <-> Semantik	27
9.2	Operationsraum des Roboters: 2D <-> 3D	27
9.3	Umweltbedingungen des Roboters: Statisch <-> Dynamisch	27
9.4	Anwendungsgebiet des Roboters: Strukturiert <-> Unstrukturiert	28

9.5 Informationsgehalt	28
9.5.1 Pfade	28
9.5.2 Freiraum	28
9.5.3 Objekte	28
9.5.4 Gemischte Modelle	29
10 Multisensorintegration und -fusion	30
10.1 Multisensorintegration	30
10.2 Multisensorfusion	30
10.3 Architekturen von Multisensorsystemen	31
10.4 NASREM	31
10.5 Komponenten Multisensorsystem	31
10.6 Kalman Filter	32

1 SENSOREN

1.1 DEFINITION

- Sensoren sind Geräte, die physikalische Eigenschaften der Umgebung wahrnehmen und messen können (z.B. Temperatur, Helligkeit, Gewicht, Entfernung, etc.)
- Sensoren liefern low-level Informationen über die anliegende Umwelt des Roboters. Diese sind limitiert, ungenau, verrauscht.
- Also liefern Sensoren eine nicht komplette Beschreibung der Welt
- Sensoren sind physikalische Geräte, die ein Signal oder einen Reiz empfangen und darauf mit einem elektrischen Signal reagieren
- Jeder Sensor ist ein Energiewandler. Egal, was Sie messen, es geht immer um den Energietransfer vom Messobjekt zum Sensor.
- Die Sensorik reicht von einfach bis komplex in der Informationsmenge.
- Sensoren bilden das Wahrnehmungssystem eines Roboters
- Sensoren ermöglichen das Schließen von Regelkreisen, die den effizienten und autonomen Betrieb von Robotern in der Praxis sicherstellen.

1.2 CHARAKTERISTISCHE GRÖSSEN EINES SENSORS

- Messbereich (range): [min, max]
- Auflösung (resolution): kleinstes Inkrement eines Signals, das detektiert werden kann (Ein inkrementeller Encoder, der 1024 Impulse pro Umdrehung liefert hat eine Auflösung von $\frac{1\text{Umdrehung}}{1024\text{Impulse}} \cdot \frac{360\text{Grad}}{1\text{Umdrehung}} = 0.3516 \frac{\text{Grad}}{\text{Impuls}}$)
- Empfindlichkeit (Sensitivity): Änderung des Ausgangs in Abhängigkeit von Änderung des Eingangs (Ein Sensor mit linearem Verhalten hat eine konstante Empfindlichkeit über den gesamten Messbereich)
- Fehler (Error): Differenz zwischen gemessenem Wert und tatsächlichem Wert (Systematische Fehler - bias oder Genauigkeitsfehler)
- Wiederholgenauigkeit (Repeatability): Fähigkeit identischen Output bei gleichem Input zu liefern
- Linearität und Genauigkeit (Linearity und Accuracy): Genauigkeit \sim Fehler eines Sensors (sehr genauer Sensor produziert sehr kleine Fehler), oft wird die Genauigkeit durch die Linearität ausgedrückt

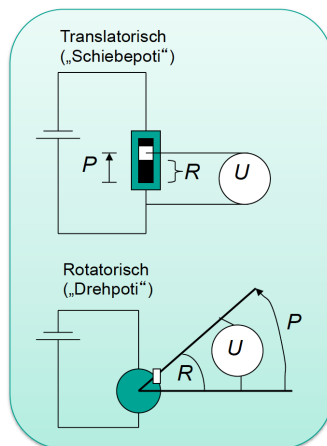
1.3 KLASSEIFIKATION VON SENSOREN

- Interne Sensoren: Erfassung innerer Zustände (z.B. Geschwindigkeitssensoren)
- Externe Sensoren: Information über Zustand der Umwelt (z.B. Taktile Sensoren, Abstandssensoren)

2 INTERNE SENSOREN

2.1 POSITIONSENSOREN

2.1.1 POTENTIOMETER



- elektronisches Widerstandsbaulement, Widerstandswert mechanisch veränderbar, Spannungsteiler
- lineare Position oder Drehposition
- Messung der abgefallenen Spannung U oder des Widerstands $U = \frac{R}{R_{ges}} * U_{ges}$ mit R_{ges} als Gesamtwiderstand und U_{ges} als Gesamtspannung
- Widerstand proportional zur Position $P \rightarrow R \sim P$
 $\rightarrow U \sim P$

2.1.2 OPTISCHE CODIERER

- Information über Position von rotatorischen oder translatorischen Gelenken oder über die relative Position eines Fahrzeuges
- Inkrementelle optische Codierer
 - Lichtstrahl wird auf Photodetektor ausgerichtet, auf einer Schreibe angebrachtes codiertes Muster (Code) unterbricht periodisch den Strahl (Schreibe mit durchsichtigen und undurchsichtigen Stellen)
 - Unterbrechungen werden gemessen und evtl. der Code festgestellt
 - Vorteile: einfache Kodierscheiben, einfache Zählung
 - Startposition unbekannt (Kalibrierung notwendig)
 - 1-spurige Codierscheibe (Winkel): Anzahl der Impulse \sim gefahrener Winkel, bei kontrollierter Fahrt: ok, bei Störeinfluss: Richtung der Störung? \rightarrow Regelung nicht möglich aber für Steuerung geeignet
 - 2-spurige Codierscheibe (Winkel und Richtung): versetzte Dioden bzw. Codes (Phasenverschiebung gewöhnlich $90^\circ/270^\circ$ zwischen Diodensignalen, Richtung aus

- Phasenverschiebung, Regelung möglich), Problem: Initialisierung/Wiederauffahren (Position unbekannt?) -> Kalibrierung notwendig, aber nicht unmöglich
- 3-spurige Codierschreibe (Winkel, Richtung, Anfang/Ende): zusätzlich Anfang/Ende-Markierung, kontrolliertes Fahren in Initialposition (falls 1 Umdrehung genügt), Initialisierung der Regelgrößen
- Problem: bei Stromausfall gehen alle Positionssensoren verloren, so dass eine Kalibrierung nach jedem Systemstart notwendig ist
- Absolute optische Codierer
 - Position absolut codiert, d.h. jederzeit bekannt, keine Initialisierung
 - Statt serielle Bitströme (inkrementellen Sensoren) werden parallele Wortsignale mit einem Wortmuster (Code) für jede Achsenposition geliefert
 - Vorteile: diskretes Ablesen der Gelenkposition, kein Datenverlust durch Stromausfall
 - Nachteil: aufwendiger Aufbau
 - Unterschied zum inkrementellen Codierer: jede quantifizierte Achsposition enthält ein individuelles Wortmuster (-> Gray-Code ist fehlertoleranter als Binärcode)

2.2 GESCHWINDIGKEITSENSOREN

- Gleichstromtachogenerator
 - Ausgangsspannung V_0
 - Winkelgeschwindigkeit ω_s
 - $V_0 = K_t \cdot \omega_s$
 - Arbeitsprinzip: elektromagnetische Induktion (Faradays Gesetz)
 - Ausgangsspannung in großen Bereichen proportional zu Geschwindigkeit
- Wechselstromtachogenerator: Gleichrichtung erforderlich
- Tachometer auf Basis eines optischen Codierers: Frequenz der gemessenen Impulse proportional zu Geschwindigkeit

2.3 BESCHLEUNIGUNGSENSOREN

- Beschleunigung ist nur durch Wirkung auf träge Masse messbar
- Anwendungen: Airbag, Neigungsmessung, Vibrationsmessung, Stabilisierung von Flugzeugen, ...
- Messprinzipien

- Wegmessung an Feder-Masse-System: häufigstes Messprinzip, Ausschlagverfahren -> Messung des Federwegs (ausgelöst durch Masseträgheit), Kompensationsverfahren -> Messung der Kraft zum Halten der Feder in Mittellage/Nulllage
- Geschwindigkeitsmessung an viskos gedämpfter Masse: gut geeignet für Stoßmessungen wegen Überlastsicherheit
- Weg-Zeit-Messung bei frei schwebenden Körpern: geeignet für sehr hohe Auflösungen z.B. Messungen an Satelliten (über Zeit hinweg wird immer wieder zurückgelegter Weg gemessen)
- Damped spring-mass system: $\ddot{x} = K(g - x) - D\dot{x}$ mit goal attractor - damping term

2.3.1 PIEZORESISTIV

- Messprinzip: Seismische Masse
- Mikrosystemtechnik: Ätzen einer trägen Masse und deren Aufhängungen in Silizium (Auslenkung ändert mechanische Spannungen, welche den piezoresistiven Widerstandswert ändern, Widerstandswert mechanisch erfassbar)
- Anwendung in der Robotik: Auslenkung zur Erdanziehung oder Lage im Raum

2.3.2 PIEZOELEKTRONISCH

- Messprinzip: Seismische Masse (Testmasse mit definiertem Wert)
- Werkstoff PXE mit piezoelektrischen Eigenschaften
- Piezokeramischer Wandler verbindet freischwingende Masse M mit Aufnehmerboden
- Beschleunigung wirkt als Kraft über der Masse M
- Ausgangsspannung abhängig von Beschleunigung
- Piezoelektrischer Effekt: wird ein piezoelektrisches Material mechanisch belastet, treten durch Verformung der Elementarzellen an dessen Oberfläche elektrische Ladungen auf.
- Umwandlung in proportionale Spannung über integrierten Verstärker/Elektrometerverstärker

2.4 INERTIAL NAVIGATION SYSTEM (INS)

Lagesensoren

- beziehen sich immer auf inertiales Koordinatensystem (zumeist auf Erdkugel)
- Kompass: Magnetometer, Kreiselkompass
- Gravimeter: Messung des Erdschwerefeldes -> Neigungssensor

2.4.1 GYROSKOP (KREISELKOMPASS)

- Kreisel, kardanisch aufgehängt, schnell drehend
- Aufgrund des Drehimpulserhaltungssatzes behält er seine Orientierung im Raum bei
-> Drehwinkel zwischen Kreisel und Käfig messbar

2.4.2 MIKROMECHANISCHE VIBRATIONSKREISEL

- Mikromechanische Drehratensensoren beruhen auf Resonanzstrukturen und Energieübertragung zwischen den genutzten Schwingmoden (Primär- und Sekundärmode) durch die Coriolisbeschleunigung -> Foucault-Pendel
- Antriebsprinzipien: elektrostatisch, elektromagnetisch, piezoelektrisch
- Messprinzipien: kapazitiv, piezoresistiv, piezoelektrisch

3 EXTERNE SENSOREN

3.1 TAKTILE SENSOREN

- Umweltinformationen durch direktes Berühren von Objekten (physikalischer Kontakt zwischen Roboter und Werkstück)
- Einsatz: Ermittlung geometrischer Größen (Lage, Orientierung, Form), Ermittlung physikalischer Größen (Kräfte, Momente, Druck), einfachste Berührungssensoren: Mikroschalter (binäre Aussage über Kontakt)
- Dehnungsmessstreifen: verformt sich bei Krafteinwirkung, Veränderung des ohmschen Widerstands, Problem: Dehnungsempfindlichkeit von Leitern gering, Lösung: Messsignal erhöhen durch mäanderförmige Struktur
- Piezoelektrische Sensoren: Vorteile: unempfindlich gegenüber hohen Temperaturen (bis 1000°C), keine äußere Spannungsversorgung notwendig, hoher Wirkungsgrad der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie, geringe mechanische Eigenschwingung und Hysterese durch starren Aufbau
- Force Sensing Resistor (FSR)
 - Folienschalter, halbquantitative Sensoren
 - Aufbau: FSR-Schicht (Trägerschicht mit halbleitendem Polymer), elastische Klebeschicht als Abstandshalter, Elektroden (kammförmige Trägerfolie mit Elektroden)
 - Bei Druck berührt FSR-Schicht die Elektroden, es bilden sich Widerstandsbrücken
 - Widerstandsänderung abhängig von Kraft (exponentiell)

- Vorteile: preiswert, dünn, sehr haltbar, widerstandsfähig
- Nachteil: nicht hochgenau
- Messbereich: 10g bis 10.000g
- Drucksensitive Materialien: Verkürzung von oder Entstehung neuer Strompfade bei Belastung (z.B. Elastomer mit Kohlenstoffbeimischung), Verstärkung des Effekts durch Schicht, die aus teilweise leitfähigem Silikon besteht, das durch Abstandshalter von einer leitfähigen Leiterplatte getrennt wird

3.1.1 TASTENDE & GLEITENDE SENSOREN

- Magnetoelastischer Sensor: magnetisch isotropes Material wird unter Druck anisotrop (Aufbau: 2 zueinander orthogonale Spulen in ferromagnetischem Material)
- Magnetoresistiver Sensor: Änderung des spezifischen Widerstands unter Einfluss eines veränderlichen Magnetfeldes (Aufbau: Ni-Fe-Element, stromführender Leiter, Gummi)
- Hallsensor: Wirkung eines magnetischen Feldes auf stromdurchflossenen Halbleiter -> Umwandlung der Druckkraft in Wegänderung und Ausgangsspannung
- Taktile gleitende Sensoren: Information über Oberflächenbeschaffenheit und geometrische Struktur

3.1.2 KRAFT-MOMENTEN-SENSOREN

- Erfassung der Kräfte zwischen Effektor und Handhabungsobjekt
- aktiv: Feststellen ausgeübter Kräfte/Momente (Sicherheit/Genauigkeit)
- passiv: Führen des Roboters durch den Benutzer (Teach-In/Interaktion)

3.2 NÄHERUNGSSENSOREN

- erkennen Objekte in gewisser Reichweite vom Roboter
- liefern binäres Signal
- kontaktfreie Geräte die für Hinderniserkennung verwendet werden

3.2.1 OPTISCHE SENSOREN

- basieren auf Lichtreflektion
- Lichtschwelle: binäre Ausgabe
- Vorteile: größere Entfernungen, kontaktfrei, einstellbarer Schwellwert
- Reflektion von Licht (Rotlicht-LED)

- Laufzeit-/Triangulationsmessung
- Standard in Automation, sehr teuer

3.2.2 AKKUSTISCHE SENSOREN

- Verschicken Ultraschallwellen (20-200 KHz) und messen Reflektion anhand von Energieänderung
- Vorteile: Emission und Detektion mit gleichem Converter, sehr hohe Reichweite
- Rauschen

3.3 ABSTANDSSENSOREN

- Messung der Distanz zwischen Sensor und Objekt
- Vorteile: größere Reichweite als Näherungssensoren, exakte Distanz als Ausgabe statt binärem Wert, anwendbar zur Erkennung von geometrischen Informationen über die Umwelt
- aktive Abstandssensoren: Verwendung einer Lichtquelle zur Beleuchtung der Umwelt (Laser scanner, TOF Kamera, Laserstreifen, Musterprojektion)
- passive Abstandssensoren: benötigen keine Lichtquelle -> verwenden Umgebungslicht (Stereo-Kamera-Systeme)

3.3.1 LAUFZEITBASIERT

- messen die benötigte Zeit eines Laserimpulses vom Emitter zum Objekt und zurück
- Distanz berechnet sich mit $d = \frac{1}{2}ct$ mit Ausbreitungsgeschwindigkeit c und der messbaren Zeit t , der Faktor 0.5 um die Entfernung in eine Richtung zu bestimmen
- erreicht mittels Radar, Sonar, Lichtwellen
- Mögliche Fehlerquellen: Variationen in der Ausbreitungsgeschwindigkeit (z.B. bei Temperaturunterschieden), Unsicherheiten bei der Zeitbestimmung, Interaktion zwischen Schallwelle und Objektoberfläche

3.3.2 TRIANGULATIONSBASIERT

- In einem Stereo-Kamera-System wird eine der Kameras mit einer aktiven Lichtquelle versehen
- Projiziere den Laserstrahl in die Szene und nehme in mit einem positionssensitiven Sensor auf
- Vereinfachung des Korrespondenzproblems

3.4 VISUELLE SENSOREN

- Anwendungen: Mobile Robotik, Humanoide Robotik, Industrie-Robotik, Sicherheitssysteme, Qualitätskontrolle, Objekterkennung ...
- Probleme: Kamerabewegung, unscharfe Kamerabilder, Objekterkennung nicht erfolgreich
- Lösungsansätze: Gaze Stabilization, Active Vision

3.4.1 PHOTODIODEN

- Innerer Photoeffekt (Halbleiter in eine Richtung durchlässig, bei Licht wird Halbleiter durchlässig und Strom fließt -> Photonenenergie) -> verwendet in Photodiode, CCD, CMOS
- Rückschluss von Strom auf Licht (ca. linear)
- Aufbau: Laserstrahl, Halbleiter mit 2 Elektroden, konstante Spannung, Lichtstrahl auf Diode -> Position des Lichtstrahls bestimmbar
- Quadranten-Photodiode: 2-dimensionale Bestimmung des Lichtstrahls (z.B. CD-Spieler, Blue-ray-player)

3.4.2 CCD (CHARGE COUPLED DEVICES, UNTERSCHIEDLICHE ÜBERTRAGUNGSTECHNIKEN)

- Analoger Speicherbaustein, Prinzip Eimerkette (linke Seite Ladung -> Transport durch Anlegen von Spannung)
- Bild zeilenweise nach unten verschoben und horizontal ausgelesen
- Bestandteile: Photodioden und elektronische Schaltung (Lichtstärke analog in digitales Bild, Clock/Taktgeber, Vorschaltung (Gain) - höheres Rauschverhältnis, umgewandelt in digitales Signal liefert digitales Bild)
- CCD als Framesensor (nach unten verschoben - horizontales Ausgaberegister) -> Problem: Belichtung während Auslesen (Bild verschmiert -> Shutter), große Sensorfläche, einfach, Anwendung in der Astronomie
- doppelte Sensorfläche, untere Hälfte z.B. lichtunempfindlich mit z.B. Aluminiumüberzug -> Nachteil: doppelter Platz aber kein Shutter nötig, schnell, einfach
- Interline-Transfer-Sensor: jeder 2. Sensor ist mit Alu-Schicht lichtunempfindlich, Ladung nach links -> unten -> ... Vorteil: sehr kurze Belichtungszeiten, elektronischer Shutter, Nachteil: doppelte Sensorfläche, größerer Füllfaktor, lichtempfindliche und lichtunempfindliche Zellen nah beieinander -> Einsatz von Linsen über Sensorzellen, damit Licht an ungenutzter Sensorzelle eingefangen werden kann -> höherer Dynamikumfang, Sensoren empfindlicher, zusätzliche Linsen nötig (sehr kleine Linsen)

- Interline-Transfer: Auslesen streifenförmiger Anordnung, 2 Pixel zusammen + 4-Phasen-Zellen-Schieberegister + Anlegen von Spannung -> Verschiebung der aufgefassten Lichtimpulse
- Betriebsarten: Field- vs Frame-Integration: Zeileneinweises Auslesen
- Interlaced: erst gerade Zeilen, dann ungerade Zeilen, Bilder als Habbild übertragen (gerade Zeilen und ungerade Zeilen)
- Non-Interlaced: nicht mehr nötig heutzutage
- Field Integrations Interlaced: Speicherzellen mit örtlichem Zeitversatz auslesen, Takt getrennt, elektronischer Shutter kann verwendet werden (zusätzliches Löschen nötig -> besseres Bild)
- Frame Integration Interlaced: versetzte Beleuchtung ergibt zeitlichen Überlappungsbereich, bei dem analoges Signal ausgelesen wird
- Progressive: Vorteil der Halbbilder fällt weg, Zellen nacheinander ausgelesen, teilweise parallelisierbar
- Blooming-Effekt: starke Lichtquelle strahlt auf Nachbarpixel über (örtlich begrenzt)
- Verschmiereffekt bei Full-Frame-Sensor: während Auslesen wird Sensorfläche belichtet erzeugt Streifen im Bild

3.4.3 CMOS (FRONTKAMERA SMARTPHONE, COMPLEMENTARY METAL OXIDE SEMICONDUCTOR)

- Ladungs-/Spannungskonvertierung pro Pixel bringt digitales Signal (CCD nur analog)
- Vorteil: einzelnes Ansprechen der Pixel möglich -> Auflösung reduzieren und größere Daten übertragen, Windowing einfach realisierbar
- Nachteile: Ladungs-/Spannungskonvertierung nötig, wenig Bauteilfläche, Fehler: Rolling Shutter: zeitliche Verschiebung bei Beleuchtung der Pixel -> Lösung: zusätzliche Transistoren bei Pixeln -> Global Shutter

Eigenschaft	CCD	CMOS
Windowing / ROI	nur zeilenweise	beliebig
Dynamikumfang	hoch	mittel
Stromverbrauch	mittel	gering - mittel
Störungen durch Blooming	ja	nein
Lichtempfindliche Fläche	mittel - hoch	mittel
Framerate	mittel	hoch
Signal am Pixelausgang	Ladung	Analogspannung
Signal am Sensorausgang	Analogspannung	Digitalsignal

- CCD sehr zuverlässig, Trend zu CMOS

3.4.4 FARBVERARBEITUNG

- 3-Chip-Methode: Prisma davor, Licht trennen mit unterschiedlichen Wellenlängen (RGB), Vorteil: hohe Auflösung, Schärfe, Nachteil 3 Sensoren, teures Prisma
- 1-Chip-Methode (Bayer-Pattern): Pixel in unterschiedliche Farben aufgeteilt (RGB) -> Filtermaske in unterschiedliche Wellenlängen, jeder Pixel liefert andere Farbinformation, nicht so globig, Bandbreite kann eingespart werden

3.4.5 KAMERASYSTEME

- Bildaufnehmer-Formate
 - Zoll Format: alt, bezog sich auf Röhrentechnik, Vidiconschlauch mit Außendurchmesser von 1 Zoll besaß ein rechteckiges, lichtempfindliches Fenster mit einer Diagonalen von 16mm (1/3", 1/2", 1/1.8", 2/3", 1", 4/3")
 - APS Format: folgt dem "Advanced Photo System", wenn Bild-Sensoren das Format 4/3" übersteigen wird der APS Formatstandard verwendet
- Objektive
 - C-/CS-Mount: normiertes Objektivanschlussgewinde
 - Objektive haben i.d.R. einstellbaren Fokus
 - Brennweite fest oder variabel (Zoom)
 - Blende: Blendenzahl beschreibt relative Öffnung der Blende, preiswerte Objekte besitzen u.U. keine Blende
 - Mini-Objektive (keine Blende, fester Fokus, feste Brennweite, sehr klein, sehr günstig)

- Analog- und Digitalkamera
 - Analogkameras: ausschließlich CCD, kein CMOS, Spannungen am Sensorausgang des CCD-Chips werden seriell übertragen, Anschluss über Frame-Grabber-Karte an den PC, Frame-Grabber führt A/D-Wandlung durch
 - Digitalkameras: Anschluss über Firewire, USB, Camera Link, Ethernet, liefern direkt digitalisierte Bilddaten

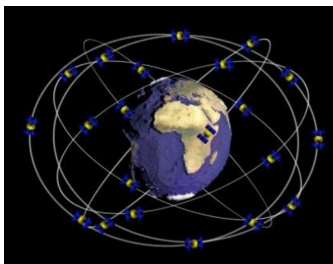
3.4.6 BILDREPRÄSENTATION

- Bild ist 2D Gitter von diskreten Punkten (Pixeln)
- Farbe eines Bildpunktes kann auf unterschiedliche Weise repräsentiert werden
- Graustufenbilder: Helligkeitswert [0,255] für jeden Pixel
- Farbbild: verschiedene Farbmodelle für unterschiedliche Anwendungen, Klassifikation nach erreichbarem Farbraum (z.B. RGB/HSV)
- RGB zu Grau: menschliches Auge ist am empfindlichsten gegenüber der Farbe grün -> $g = 0.299 \cdot R + 0.587 \cdot G + 0.114 \cdot B$

3.5 POSITIONSENSOREN

- Grundlage: aktive beacons
- Anwendung: Navigation von Schiffen, Flugzeugen, Fahrzeugen

3.5.1 GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)



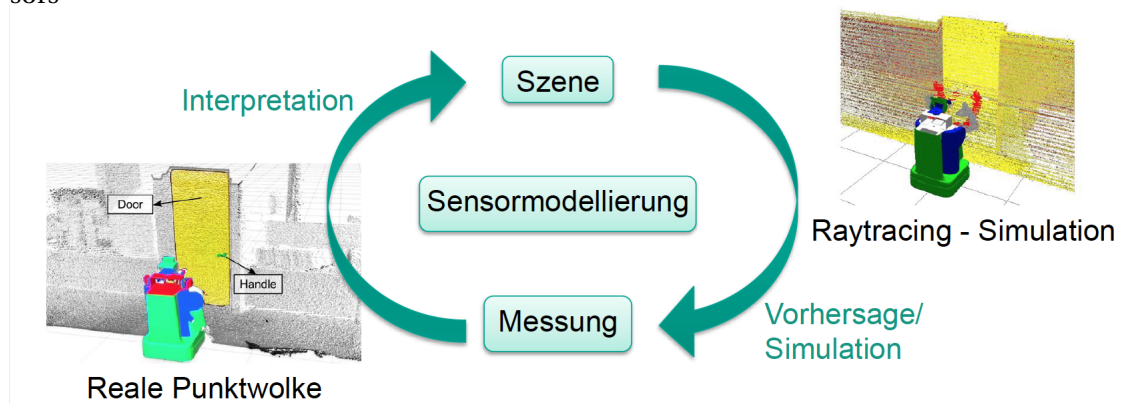
- Satellitengestütztes Navigations- und Punktbestimmungssystem, 24 Satelliten, Umlaufzeit 12 Stunden, Entfernung 20051 Kilometer, 6 Bahnebenen
- Bedingung: mindestens 4 Satelliten in Reichweite
- Messung: Codephase (Pseudoentfernung), Doppler-Count (Geschwindigkeitsmessung), Trägermischphase (Messung der Strecke mittels Phasenverschiebung)
- Aufgaben der Master-Control-Station: Vorausberechnung Bahnephemeriden, Beobachtung Satellitenuhren, Vorausberechnung Satellitenverhalten, Weitergabe von Daten

3.5.2 NATÜRLICHE/KÜNSTLICHE LANDMARKEN

- nicht aktiv
- einfach zu identifizieren
- feste und bekannte Position
- Problem: Detektion, Matchen
- künstliche Landmarken: speziell auf Umgebung abgestimmt

4 SENSORMODELLIERUNG

- Zusammenhang zwischen realer Welt und Messergebnis
- Sensormodell: mathematische Beschreibung der Aufnahmecharakteristik eines Sensors



- Aufgaben
 - Interpretation von Messaten (Reale Aufnahme \rightarrow (Sensormodell) $^{-1}$ \rightarrow Szenenbeschreibung)
 - Vorhersage von Messdaten (Szenenbeschreibung \rightarrow Sensormodell \rightarrow Aufnahmeerwartung)
 - Sensorsimulation (Szenenbeschreibung \rightarrow Sensormodell \rightarrow Fehlermodell/Rauschen \rightarrow Messergebnis)
- jeder Sensormesswert ist fehlerbehaftet, aber Fehler lässt sich mathematisch modellieren
- setzt sich zusammen aus systematischem Fehler und Restfehler
- Kalibrierung behebt systematischen Fehler
- Robuste Algorithmen beheben Restfehler

4.1 MATHEMATISCHEN SENSORMODELL

- Abbildung des Umweltzustands in den Bildraum $z_m(\Theta_n) + v_m$ mit Beobachtungsmodell h , normalverteiltem Rauschen v_m und Umweltzustand Θ_n
- h hängt vom Sensortyp (KMS, Datenhandschuh, Kamera) und von festen spezifischen Parametern (Position der Kamera im Raum) ab
- Feste Kalibrierungsparameter charakterisieren Übertragungseigenschaften eines Sensors
- Dynamische Sensorparameter, auch Steuerparameter genannt, beschreiben veränderliche Eigenschaften eines Sensors.

4.2 MODELLIERUNG

4.2.1 KRAFT-MOMENTEN-MESSDOSE

- Prinzip: Kräfte/Momente \rightarrow Deformation des Dehnungsmessstreifens \rightarrow Änderung des Widerstands, Spannungsabfall
- Näherung: Linearer Zusammenhang Kraft \leftrightarrow Spannung
- N-Sensorelemente $W = c_{i1}F_x + c_{i2}F_y + c_{i3}F_z + c_{i4}M_x + c_{i5}M_y + c_{i6}M_z$ mit W_i : Spannung an Sensor i , F_x : Kraftkomponente, M_x : Momentenkomponente und c_{ij} : Koppelfaktoren
- Kalibrierung C gesucht: Messung der W bei bekannten Kräften F , Aufstellen eines (überbestimmten) LGS für C , Lösung des LGS nach C (kleinste Quadrate) mit pseudoinverser Matrix R_F der Kopplungsmatrix

4.2.2 DATENHANDSCHUH

- 22 Sensorelemente (DMS) mit jeweils affinem Modell: $W_i = c_i \cdot \alpha_i + t_i$
- 22 DMS werden getrennt kalibriert, Daten jedoch simultan erhoben
- Griffe von Kalibrierobjekt liefern für alle i Gelenkwinkel jeweils n Messungen
- Bestimmung der Parameter aus überbestimmten LGS

4.2.3 MODELLIERUNG EINER KAMERA

- Modellierung der Lichtintensität abhängig von Beleuchtung der Szene und Reflexionseigenschaften der Objekte
- Modellierung der Geometrie: dreidimensionale Szene wird abgebildet auf zweidimensionale Fläche

4.2.4 ROTATING SICK

- besteht aus SICK LMS 200 Laserscanner
- über Drehdurchführung an Dunker-Motor-Kombination gekoppelt
- Prinzip des LMS 200: Ausstrahlung - Modul. Signal -> Reflexion an Objekt -> Empfang - Phasenverschobenes Signal
- Entfernung des Reflexionsobjekts: $d = \frac{1}{2} c \cdot t$

4.3 SENSORSIMULATION

- mit gutem Modell können Sensoren simuliert werden
- Nutzen: Prädiktion (verbessert Ungenauigkeiten durch Fusionierung mit zusätzlichem virtuellen Messwert, kann Ausreißer erkennen), Simulation (Ausprobieren ohne Hardwareaufwand)
- Deterministisches Modell kann nie vollständig Sensor simulieren (Messung immer fehlerbehaftet, größter Simulationsaufwand: korrekte Fehlerstimulation)
- Sensor-Aufnahmefähigkeit: Welche Merkmale unter welchen Bedingungen?
- Sensor-Zuverlässigkeit: Maß für die Unsicherheiten der Messung (Beitrag des Rauschens zur Messung eines Merkmals)

Gross Error Model

- Annahme hier: Messungen verhalten sich in der Regel normalverteilt, in seltenen Fällen aber falsche Messungen nach Modell n_g -> Wahrscheinlichkeitsdichte für $n(u)$:
$$p(u) = \frac{1-\epsilon}{(2\pi \det(A_1))^{m/2}} e^{-\frac{1}{2}(u-\tilde{u})^T A_1^{-1}(u-\tilde{u})} + \frac{\epsilon}{(2\pi \det(A_2))^{m/2}} e^{-\frac{1}{2}(u-\tilde{u})^T A_2^{-1}(u-\tilde{u})}$$
- Annahmen: Kovarianzmatrix A_1 bekannt, $0.01 \ll \epsilon \ll 0.05$, $\det(A_1) \ll \det(A_2)$

5 SIGNALVERARBEITUNG

- Sensor: Ein System, das eine physikalische Größe und deren Änderung in geeignete elektrische Signale umwandelt
- Digitale Signalverarbeitung (analog -> digital): Signalerfassung -> Aufbereitung (Verstärkung) -> Digitalisierung
- Signal: physikalische Repräsentation von Information, meist physikalische Größe als Funktion von Zeit und/oder Ort
- Analoges Signal: Amplitude kann kontinuierlich jeden Wert zwischen Minimum und Maximum annehmen -> wert- und zeitkontinuierlich, i.d.R. Spannungssignale

- Digitales Signal: Wertebereich und Zeit/Ort diskret (erlauben komplexere Signalumformungen für Sprach- und Bildverarbeitung)
- Signalverstärkung: Ausgangsgröße des Sensors (i.d.R. Spannung/Strom) verstärken

5.1 DIGITALISIERUNG

- Verarbeitungsschritte: Abtastung/Rasterung (Amplitudenmessung zu diskreten Zeitpunkten), Quantisierung (Abbildung des kontinuierlichen Wertebereichs auf diskreten Wertebereich)
- Analog/Digitalwandlung: Bereich des analogen Signals wird in 2^n gleichgroße Abschnitte eingeteilt, liegt ein Spannungswert in einem der durch Digitalisierung erzeugten Teilabschnitte vor, so ordnet man ihm den Digitalwert der unteren Abschnittsgrenze zu, Schaltungen zum Realisieren einer A/D-Wandlung: Dual-Slope-Wandler, Sukzessiver Approximationswandler, FlashWandler/Parallelwandler

5.2 FOURIER-TRANSFORMATION

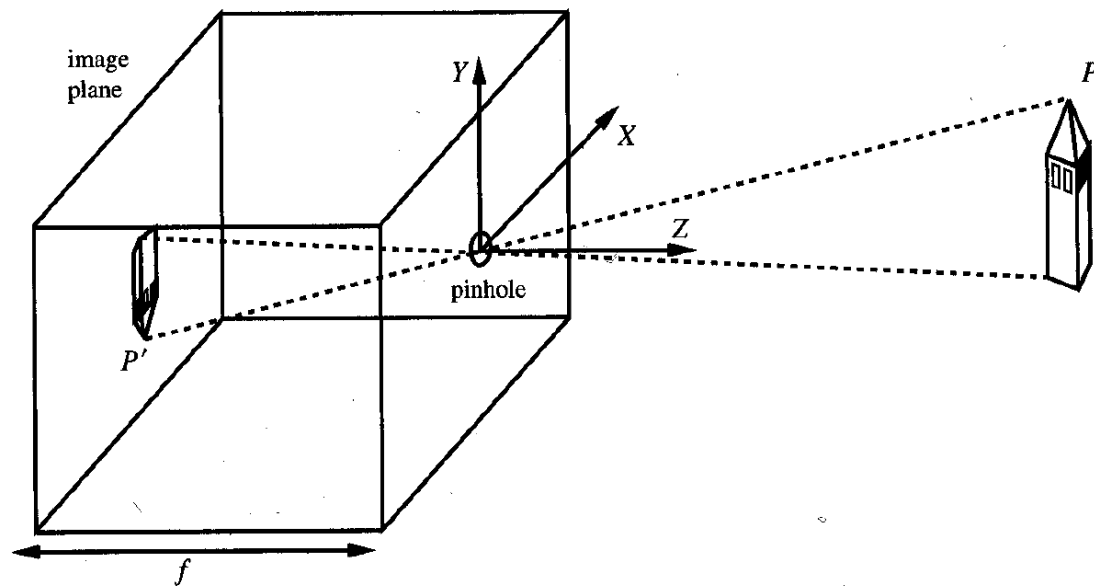
- Digitale Signalverarbeitung: Umformung von Zahlenfolgen aus Abtastung analoger Signale
- transformiert die Darstellung einer Eingabefunktion zwischen Ortsraum und Frequenzraum
- von Ortsraum zu Frequenzraum: Berechnung der Anteile periodischer Strukturen in der Eingabefunktion (Projektion der Eingabe auf $\sin()$ und $\cos()$ für verschiedene Frequenzen)

5.3 ABTASTTHEOREM

- Rekonstruierbarkeitsproblem (Abtastwerte -> kontinuierliches Signal)
- Notwendige Abtastfrequenz nach Shannonschem Abtasttheorem: Abtastfrequenz > doppelte maximale Signalfrequenz
- bei geringerer Abtastfrequenz: Aliasing-Effekt

6 OPTISCHE 3D SENSOREN

6.1 LOCHKAMERAMODELL



Internal parameters: focal length f ("focal distance")

Projektion eines Szenenpunkts $P = (X, Y, Z)$ auf einen Pixel $P = (u, v, w)$:

$$-\frac{u}{f} = \frac{x}{z}, -\frac{v}{f} = \frac{y}{z}, w = -f$$

$$p = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ -f \end{pmatrix} = -\frac{f}{z} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = -\frac{f}{z} P$$

Rückprojektion: $x = -\frac{uz}{f}, y = -\frac{vz}{f}$

6.2 ERWEITERTES KAMERAMODELL

- Lochkameramodell vereinfacht stark, praktisch nicht realisierbar -> Anpassung
- Optische Achse: geht durch Projektionszentrum, senkrecht zur Bildebene
- Principal point C : Schnittpunkt der optischen Achse mit Bildebene
- Koordinatensysteme
 - Bildkoordinatensystem: 2D Koordinatensystem mit der Einheit [pixel], Ursprung (0,0) links/oben, u- und v-Achse
 - Kamerakoordinatensystem: 3D Koordinatensystem mit der Einheit [mm], Ursprung im Zentrum der Projektion, Achsen parallel zu denen des Bildes (+ 3-Finger-Regel)

- Weltkoordinatensystem: 3D Koordinatensystem mit der Einheit [mm], beliebig im Raum
- Parameter
 - intrinsisch: Brennweite, Bildpunkt, Parameter zur Beschreibung der Linsenverzerrung, definieren Beziehung zwischen Kamerakoordinaten und Bildkoordinaten
 - extrinsisch: definieren Beziehung zwischen Kamerakoordinaten und Weltkoordinaten durch eine Rotation R und eine Translation T
- Vereinfachungen des Lochkameramodells: Principle point ist in der Mitte der Bildebene, Pixels sind quadratisch, keine Modellierung der Linsenverzerrung, kein Weltkoordinatensystem (oder gleich wie Kamerakoordinatensystem) -> keine extrinsischen Parameter
- Die Bildkoordinaten sind dann bestimmbar durch: $\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_x \\ c_y \end{pmatrix} + \frac{1}{Z} \begin{pmatrix} f_x \cdot X \\ f_y \cdot Y \end{pmatrix}$
 oder als Matrixmultiplikation mit der Kalibrierungsmatrix K in homogenen Koordinaten: $\begin{pmatrix} u \cdot w \\ v \cdot w \\ w \end{pmatrix} = K \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$ mit $K = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$
- Extrinsische Kamerakalibrierung
 - definiert durch durch eine Koordinatentransformation mit Rotation R und Translation T
 - Koordinatentransformation vom Weltkoordinatensystem ins Kamerakoordinatensystem: $x_c = Rx_w + t$
 - Ergebnis ist eine 3x4 Projektionsmatrix P (mit intrinsischen und extrinsischen Parametern) in homogenen Koordinaten: $\begin{pmatrix} u \cdot w \\ v \cdot w \\ w \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}, P = (KR|Kt)$
- Linsenverzerrung: Bildgebung bei realen Linsen ist nicht perfekt linear, Linsen mit kurzer Brennweite bilden Verzerrung
- Kamerakalibrierung: Bestimmung der Parameter bezüglich eines Kameramodells, Bestimmung der intrinsischen Parameter ist unabhängig von der Struktur, Bestimmung der extrinsischen Parameter abhängig vom Weltkoordinatensystem

6.3 STEREOGEOMETRIE/EPIPOLARGEOMETRIE

- Stereo-Rekonstruktion: mit 2 Kameras und 2 Bildern eines Punktes, kann dieser Punkt rekonstruiert werden
- Epipolargeometrie beschreibt die Verbindung zwischen 2 Kameras

- Epipolarlinien definieren alle Schnittpunkte der Epipolarebene mit der Bildebene
- Fundamentalmatrix ist eine mathematische Beschreibung der Epipolargeometrie, 3x3 mit Rang 2
- Korrespondenzproblem lösbar durch
 - Time coded methods / Temporal Coding: viele (binär codierte) Streifen werden nacheinander projiziert
 - Phase shift method: Sinusförmige Grauwerte werden auf die Szene projiziert
 - Frequency encoding: Coding über Farbe (RGB -> HSV (verwende V-Wert))

7 BILDVERARBEITUNG

7.1 HISTOGRAMME

- Wie bildet man ein Histogramm? -> Zählen der Farb-/Grauwerte
- normalisiertes Histogramm -> Teilen durch Anzahl an auftretenden Werten liefert Wahrscheinlichkeit
- Histogrammausgleich: bilde akkumuliertes Histogramm und berechne $\frac{255}{N} H_a(x)$ (für Grauwerte)

7.2 FILTER

7.3 GLÄTTUNG - TIEFPASS

- Median-Filter: verwende Median von Nachbarschaft

- Mittelwert-Filter: $\frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$

- Gauß-Filter: $\frac{1}{16} \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$

7.4 KANTENDETEKTOREN - HOCHPASS

- Prewitt: z.B. $p_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

- Prewitt-Operator: $M = \sqrt{P_x^2 + P_y^2}$

- Sobel: z.B. $s_y = \begin{pmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$
- Laplace: entweder $\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ (invariant ggü. Rotation in 90°) oder $\begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ (invariant ggü. Rotation in 45°)
- Laplacian of Gaussian: $LoG(g(x, y)) = \nabla^2(f(x, y) * g(x, y))$
- Canny Edge Detector
 1. Glättung: Gauss
 2. Kantendetektion in x- und y-Richtung (Prewitt/Sobel)
 3. Non-Maximum Suppression
 4. Hysteresis thresholding

7.5 SEGMENTIERUNG

- Aufteilung des Bildinhalts in sinnvolle Elemente (z.B. Vordergrund/Hintergrund)
- Schwellwert auf Graubild
- Region Growing (angrenzende Pixel: $|Img(p_0) - Img(q)| \leq \epsilon$)
- Segmentierung mit Farbwerten z.B. für Hautfarbe (HS-Histogramm)
- Hough Transformation ($r = x \cos \theta + y \sin \theta$) liefert Repräsentation der geometrischen Struktur

8 MERKMALSEXTRAKTION

8.1 KORRELATIONSFUNKTIONEN

- Sum of Squared Differences (SSD): pixelweise Unterschiede quadriert und aufsummiert
- Sum of Absolute Differences (SAD): pixelweise Unterschiede aufsummiert (weniger anfällig ggü. Ausreißern)
- weitere Ansätze: ZSAD (Subtraktion des Mittelwerts), NSSD (Division durch die Frobeniusform), ZNSSD (Kombination beider)

8.2 ECKENDETEKTOREN

8.2.1 MORAVEC-OPERATOR

- Ziel: Ähnliche Bereiche in aufeinanderfolgenden Kamerabildern wiederfinden
- Konzept der Punktmerkmal (Interest Points)
- Punktmerkmal wird als ein Punkt definiert, von dem aus sich die Intensität in alle Richtungen stark verändert
- Nutzen von Autokorrelationsfunktion
- Vorgehen: Verschiebe quadratisches Fenster in 4 Richtungen (horizontal, vertikal, beide Diagonalen) und berechne jeweils SSD -> geringer Wert: (nahezu) homogener Bereich, Wert ist für Verschiebung längs einer bestimmten Richtung R aus S gering, für Verschiebungen senkrecht zu R jedoch hoch -> Kante entlang R, D überall hoch -> Ecke (Punktmerkmal)
- Nachteile: Anisotropische Antwort des Operators (nicht invariant gegenüber beliebigen Rotationen), verrauschte Antwort des Operators (Pixel in den Ecken können wegen quadratischem/binären Aufbau das Ergebnis verfälschen), starke Antwort bei Kanten (Operator findet Ecken bei Kanten, die nicht exakt entlang der vordefinierten Verschiebungsrichtungen laufen)

8.2.2 HARRIS CORNER DETECTOR

- Ziel: Ersetzung der vier vordefinierten Richtungen durch ein Verfahren, welches eine feinere Schrittweite erlaubt
- Ausgangsbasis ist Taylorentwicklung erster Ordnung (Richtungsableitungen benötigt -> Prewitt oder Sobel)
- Approximation von Autokorrelationsfunktion durch quadratische Form über Matrix M (d.h. Gradienten)
- M enthält Information über die Struktur des Bildbereichs (Ellipse konstanter Grauwertänderung)
- Struktur lässt sich aus Eigenwerten von M ableiten
 1. beide Eigenwerte klein -> große Ellipse -> (nahezu) homogener Bereich
 2. ein EW groß, der andere klein -> gestreckte Ellipse -> Kante
 3. beide EW groß -> kleine Ellipse -> Ecke (Punktmerkmal)
 4. Zusammenfassung der EW in Concerness $C(u, v) = m_{11}m_{22} - m_{12}m_{21} - \kappa(m_{11} + m_{22})^2$

8.2.3 GOOD FEATURES TO TRACK

- Verbesserte Fassung des Harris Corner Detektors durch explizite Berechnung der Eigenwerte der Matrix $M(u, v)$
- Bedingung für Merkmale: $\min(\lambda_1, \lambda_2) > \lambda$ (Schwellwert) statt Concerness

8.3 EINFACHE DESKRIPTOREN

- Einfachster Ansatz: Beschreibung der lokalen Umgebung durch ein Quadrat um den zu betrachtenden Bildpunkt (Bildausschnitt als Merkmal), Vergleich zweier Ausschnitte durch Anwendung einer Korrelationsfunktion
- Vorteile: einfach zu realisieren, geringer Rechenaufwand
- Nachteil: keine Invarianz bzgl. Rotation und Skalierung
- Erweiterung nach Lepetit
 - Modellierung jedes Bildausschnitts durch ein sog. view set
 - Generierung von z.B. 100 Ansichten des lokalen Ausschnitts welche den Raum der möglichen Erscheinungen abdecken (Skalierung, Rotation, Verzerrung)
 - Abgleich (Matching) eines Bildausschnitts aus der aktuellen Szene mit der Datenbank durch Vergleich mit allen Ansichten aller eingelernten Bildausschnitte
 - Ansichten können synthetisch generiert werden durch Verzerrungsabbildung (affine Transformation, texturiertes 3D-Modell und Rendering)
 - Nachteil: hoher Speicher- und Rechenaufwand
 - Lösungsansatz: PCA -> Reduktion von 1024 auf 20 Dimensionen beschleunigt und reduziert Speicheraufwand

8.4 AKTUELLE MERKMALE (DETEKTOR + DESKRIPTOR)

8.4.1 SCALE INVARIANT FEATURE TRANSFORM (SIFT)

- Generieren verschiedener Bildauflösung äquivalent zu sukzessivem Gaußglätten und Unterabtasten (sonst: Aliasing)
- Detektor arbeitet auf der Basis einer Skalenraum-Analyse mit Difference of Gaussians (DoG)
- Deskriptor besteht aus in Teil-Quadrate unterteiltem Gradientenhistogramm
- Verfahren ist invariant bzgl. Rotation und in einem kleinen Bereich bzgl. Verzerrung
- Merkmalsdetektor
 - Skalenraum wird aufgebaut durch Faltung mit der Gauß-Funktion

- Stabile Merkmalspunkte werden durch Bestimmung von Extrema der DoG-Funktion berechnet
- DoG-Funktion ist eine effiziente Approximation des skalennormalisierten LoG-Operators, der ein Blob Detektor ist. LoG erkennt Blob nur bei passender Skalierung
- Deskriptor
 - Tiefpass-gefiltertes Bild entsprechend der Skala, auf welcher der Keypoint detektiert wurde, wird für die Berechnung der Deskriptors verwendet
 - Berechnung der Gradienten in einem quadratischen Fenster (gewichtet mit Gauß-Funktion)
 - Berechnung des Betrags und der Richtung
 - Berechnung eines Gradientenhistogramms mit 10° Diskretisierung (36 Bins) über θ und m als Gewichtung
 - Berechnung des globalen Maximums. Ausgabe dessen und aller Einträge mit Werten $\geq 85\%$ des Maximums sind Richtungen
 - Für jede der berechneten Richtungen wird das Bild rotativ entsprechend der Richtung ausgerichtet (Rotationsinvarianz) und ein Deskriptor berechnet

8.4.2 SPEEDED UP ROBUST FEATURES (SURF)

- Motivation: Geschwindigkeitssteigerung gegenüber SIFT bei vergleichbaren oder verbesserten Eigenschaften
- Ansatz: Verwendung von Rechteckfiltern (beschleunigte Berechnung durch Integral Images) anstatt DoG, Deskriptor um Faktor 2 kleiner: 64 Dimensionen

8.4.3 MAXIMALLY STABLE EXTREMAL REGIONS (MSER)

- Idee: stabile, homogene Regionen (mit kontrastierendem Rand) detektieren, ohne Vorgabe eines Schwellwerts
- Ansatz: Analyse der Folge aller durch Schwellwertfilterung berechneter Binärbilder, Finden von Bildregionen, die über hohe Anzahl von Schwellwerten ihre Form & Ausdehnung nicht ändern

8.5 MATCHING VON MERKMALEN

- Vergleich der Merkmalsvektoren mit entsprechendem Fehler- bzw. Korrelationsmaß
- Nearest-Neighbor
- k-Nearest-Neighbor
- Matching-Strategien

- zu jedem Merkmal im Anfrage-Bild ordne ein entsprechendes Merkmal aus der Datenbank zu
- zu jedem Merkmal aus der Datenbank ordne ein entsprechendes Merkmal aus dem Anfrage-Bild zu
- oder Kombination der beiden o.g. Strategien

8.6 OBJEKTERKENNUNG AUF DER BASIS VON PUNKTMERKMALEN

- Bag of Features
 - Zählen der Korrespondenzen für eine gegebene Objektrepräsentation bestehend aus einer Menge von Punktmerkmalen
 - Zuordnung erfolgt ausschließlich auf der Basis der Merkmalsvektoren
 - Objekt gilt als erkannt, wenn eine erforderliche Mindestanzahl an Korrespondenzen berechnet wurde
 - Vorteil: einfach zu realisieren
 - Nachteil: nicht robust, fehleranfällig
- RANSAC
 - iteratives Verfahren, um eine bezüglich eines gegebenen Modells konsistente Untermenge einer Menge robust zu bestimmen
 - Haupteinsatzzweck: Filtern von Ausreißern
- Least Squares
 - Anwendng für die Berechnung einer Homographie bzw. Affintransformation
 - Gegeben: Menge von Punktkorrespondenzen
 - LGS lösen zur Bestimmung von Homographie/Affintransformationen

8.7 6-DOF LAGESCHÄTZUNG

- Bestimmung der 3D-Transformation welche die 6-DoG Lage des Objektkoordinatensystems (gegebenes 3D-Modell) im Weltkoordinatensystem beschreibt
- Monokulare Lageschätzung
 - 2D-3D Punktkorrespondenzen (3D-Punkte des Modells und 2D-Punkte aus der aktuellen Ansicht (Bildkoordinaten))
 - Korrespondenzen müssen beim Einlernen für das Trainingsbild bzw. die Trainingsbilder bestimmt werden
 - Über die bei der Erkennung berechnete Homography können die 2D-3D Punktkorrespondenzen propagiert werden oder Propagation durch Tracking der 2D-Punkte

- Stereo-basierte Lageschätzung
 - Eine Möglichkeit: Berechnung von 3D-Koordinaten für Merkmalspunkte über Korrelation und Stereo-Triangulation, anschließend: Fitting eines geometrischen 3D-Primitivs, Registrierung eines 3D-Objektmodells
 - Vorteile: robust aufgrund von Stereo-Triangulation, je nach Aufbau höhere Genauigkeit
 - Nachteile: Ungenauigkeiten bei starken Linsenverzerrungen

9 UMWELTMODELLIERUNG

- Roboter benötigt Weltmodell, das die reale Welt auf innere Repräsentation abbildet (Information über Umweltbeschaffenheit, Sammlung von räumlichen Beziehungen)
- Notwendige Informationen zur Aufgabenbewältigung: Navigation, Positionsbestimmung, Sensordatenverarbeitung

9.1 ABSTRAKTIONSNIVEAU: SENSORDATEN <-> SEMANTIK

- Geometrische Darstellung: Anwendung in Bahnplanung (feinkörnig), aktives Mesen, Objekterkennung, Fahren von P_1 nach P_2
- Topologische Darstellung: Anwendung in Planung (Manipulationsplanung, mittlere Körnigkeit, Bahnplanung, "Fahre von Raum 1 nach Raum 5")
- Semantische Darstellung: Anwendung in Planung auf Aufgabenebene, "Fahre durch alle Büros"

9.2 OPERATIONSRAUM DES ROBOTERS: 2D <-> 3D

- 2-dimensional: Anwendung in Bahnplanung mobiler Roboter, Werkstückanalyse, 2D-Bearbeitung
- 2.5-dimensional: Anwendung bei Approximation unbekannter Objekte, niedrigere Komplexität als 3D, einfache 3D-Welten -> Bahnplanung einfach
- 3D-Szene: komplexere Umweltmodellierung, realistische Modellierung, komplexe Sensorik, komplexe Planung

9.3 UMWELTBEDINGUNGEN DES ROBOTERS: STATISCH <-> DYNAMISCH

- Statisch: bekannte Umwelt -> alle Objekte in Weltmodell vorhanden, selten reale Anwendung
- Dynamisch: unbekannte Umwelt -> Umweltinformationen durch Kartografierung, Berücksichtigung der Positionsänderung von Objekten

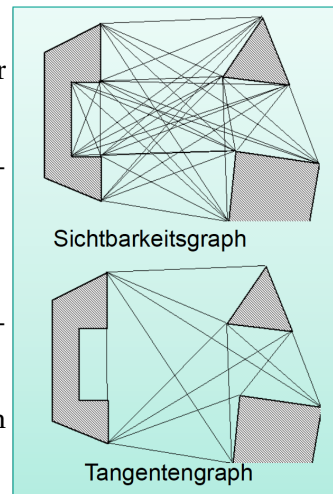
9.4 ANWENDUNGSGEBIET DES ROBOTERS: STRUKTURIERT <-> UNSTRUKTURIERT

- Strukturiert: wenige verschiedene Objekte, gut wahrnehmbare Bewegungsgrenzen & Fahrflächen, meist in geschlossenen Räumen
- Unstrukturiert: häufig im freien Gelände, wichtige Fehlerquellen: unebener, rutschiger Untergrund, fehlende Landmarke

9.5 INFORMATIONSGEHALT

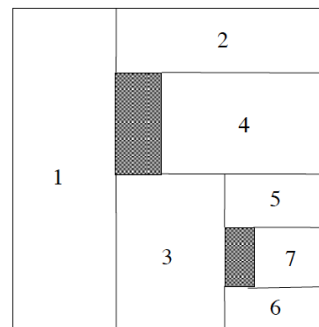
9.5.1 PFADE

- normal 2 bis 2.5-dimensionaler Raum
- polygonale Beschreibung der Objekte
- Pfad: lineare oder nichtlineare Verbindung zweier Punkte im Operationsraum
- Speicherung der Umwelt- und Planungsinformationen
- Repräsentation als ungerichteter Graph
- einfache Umweltdarstellung, partielle Modellierung
- kollisionsfreie Bewegung nur auf gespeicherten Pfaden
- Sichtbarkeitsgraphen zur automatischen Generierung von Pfaden



9.5.2 FREIRAUM

- Projektion der realen Welt in 2-dimensionale Grundrissdarstellung
- Kollisionsfreie befahrbare Freiräume in geeignete Bereiche zerlegt
- Vorhandene Objekte und Hindernisse nicht berücksichtigt



9.5.3 OBJEKTE

- Darstellung der Objekte der realen Umwelt (Türen, Wände, Hindernisse)

- 3-dimensionale Darstellung der Umgebung aus Sensorwahrnehmung
- Projektion auf x-y-Ebene für Navigation bodengebundener Roboter ausreichend
- Verschiedene Darstellungen
 - Kantenmodelle: Ermittlung von markanten Punkten, Verbinden durch geeignete Kanten auf Oberfläche des Objekts
 - Oberflächenmodelle: Nachbildung der Objektoberflächen, Darstellung ebener Flächenelemente mit Polygonen, gekrümmte Flächenelemente: mathematisch beschreibbar (Zylinder, Kegel, Torusfläche), näherungsweise durch Freiformflächen (patches)
 - Volumenmodelle: Unterscheidung von Raumpunkten hinsichtlich ihrer Lage zum Objekt (innen- außenliegend), verschiedene Repräsentationsmöglichkeiten
 - * Begrenzungsflächenmethode: Beschreibung des Körpers durch umgebende geometrische Elemente (Flächen, Kanten, Punkte)
 - * Grundkörperdarstellung: Zusammensetzung von Körpern aus parametrierbaren Grundelementen (die bekannt oder gespeichert sein müssen)
 - * Cell Decomposition: Zusammensetzung aus Einzelementen -> Zerlegung komplizierter Körper in einfache Teile
 - * Volumenapproximation: Objektbeschreibung durch Würfel
 - * Einhüllende Quader: Objektbeschreibung durch Quader unterschiedlicher Größe, Geradensegmente: Erkennung bzw. Generierung von Geradensegmenten (Parametrische Umweltdarstellung aus Sensormessungen, Zusammenfassen von Messwerten zu Regionen konstanter Entfernung, Darstellung als Geradensegmente, Erkennung von zylindrischen Hindernissen, konvexen und konkaven Ecken)

9.5.4 GEMISCHTE MODELLE

- In der Forschung am häufigsten eingesetzt
- Unterschied zu bisherigen Modellen: Erfassung von Freiräumen und Objekten
- Wichtigste Methoden
 - Gitter- bzw. Rasterdarstellungen
 - * Zwei bzw. dreidimensionale Rasterstruktur
 - * Annäherung der Form des Hindernisses durch Anzahl zugehöriger Zellen
 - * Hierarchische Zerlegung möglich (Octrees, Quadrees)
 - Methode des Konfigurationsraumes
 - * Dimensionszahl entspricht Anzahl der Freiheitsgrade des Robotersystems
 - * hoher Rechenaufwand und großer Speicheraufwand

- * vereinfachte Darstellung: Reduktion beschreibender Geometrien auf Referenzpunkt
- * Aufblähen der Objekte

10 MULTISENSORINTEGRATION UND -FUSION

- Komplexe Aufgabenstellungen erfordern mehr als einen Sensor
- Multisensorsystem integriert unterschiedliche Informationsquellen und fusioniert Informationen in einheitliches Repräsentationsschema
- Messungen von Einzelsensoren sind ungenau, partiell, gelegentlich falsch, häufig geometrisch und geographisch unvergleichbar, entstehen mit unterschiedlichem Aufwand zu verschiedenen Zeitpunkten -> Kompensation durch Einsatz mehrerer komplementärer Sensoren

10.1 MULTISENSORINTEGRATION

- Synergetische Kombination von Informationen mehrerer Sensorsysteme
- Kombination artfremder Sensoren, Sensoren gleicher Spezifikation aus unterschiedlichen Messposition, Kombination der Information eines Sensors über einen längeren Zeitraum (Bsp.: Tracking)
- Konkurrierende Integration: Informationsverarbeitung bzgl. eines einzigen Merkmals zu einem Objekt oder Ereignis mit dem Ziel zur Reduktion von Unsicherheiten im überlappenden Bereich
- Komplementäre Integration: Informationsverarbeitung bzgl. unterschiedlicher Merkmale und/oder unterschiedlicher Objekte oder Ereignisse mit dem Ziel zur Vervollständigung von Informationslücken
- Kooperative Integration: Verarbeitung zusätzlicher Information, die gemeinsam von unterschiedlichen Sensoren gewonnen wird -> 3D-Information aus Überlappungsbereich
- Vorteile der Integration: Redundanz (reduziert Messunsicherheit), Komplementarität (voneinander unabhängige Merkmale), Rechtzeitigkeit (höhere Geschwindigkeit), geringere Kosten als äquivalente Information aus nur einem Sensor

10.2 MULTISENSORFUSION

- Entscheidung: zu bestimmtem Zeitpunkt Entscheidung für eine Informationsquelle, Grundlage: Beurteilung der Wahrscheinlichkeit oder Zuverlässigkeit
- Durchschnitt: Mitteilung aller Datenquellen, Gewichtung nach Zuverlässigkeit oder Informationsgehalt

- Führung/Leitung: Geführter Einsatz der Sensorik, abgeleitet aus vorhandener Information, z.B. zweistufige Hinderniserkennung
- Ziel: Einheitliche Darstellungsform der verschiedenen Eingabeinformationen (z.B. Umweltmodell)

10.3 ARCHITEKTUREN VON MULTISENSORSYSTEMEN

- Robustheit: Fehler/Ausfälle von Teilkomponenten kompensieren
- Konfigurierbarkeit: Einfügen neuer Sensoren, Austauschen von Sensoren, Entfernen von Sensoren
- Spezifikation: Definition der Fähigkeiten der Sensoren, Definition der Informationen die Sensoren liefern
- Validierung
- Leistungsfähigkeit: zeitliche/qualitative Anforderungen

10.4 NASREM

- Standard Reference Model for Telerobot Control System Architecture
- Entwickelt von NASA für ISS (Manipulator "Flight Telerobotic Servicer (FTS)")
- Zweiarmer Roboter mit je 7 Freiheitsgraden
- Telerobotik -> Autonome Robotik
- Beschreibt funktionale Anforderungen an hochsprachliche Spezifikation des Kontrollsystems

10.5 KOMPONENTEN MULTISENSORSYSTEM

- Sensormodell: Fähigkeit der Sensoren reale Welt zu beobachten
- Fusionsmethoden: Beruhen auf Sensordaten oder -informationen unterschiedlichen Charakters
 - Zentraler Teil des Multisensorsystems
 - Numerische Methoden
 - * Stochastische Approximation (Schätzung eines realen konstanten Zustands)
 - * Gewichteter Durchschnitt (redundante Messungen werden gemittelt, Ausreißer haben verhältnismäßig großen Einfluss)
 - * Bayes'scher Schätzer (Ungenauigkeit als Wahrscheinlichkeit, interpretiert als relative Häufigkeit, A-priori und Übergangswahrscheinlichkeiten müssen gegeben sein)

- * Kalman Filter (siehe nächstes Kap.)
 - * Evidentes Schließen
 - * Fuzzy-Set Theorie
- Geometrische Methoden
 - * Gitterbasierte Ansätze
- Sensoreinsatzplaner: wählt basierend auf Sensormodell geeignete Sensoren aus
- Umweltmodell und Wissensbasis: gemeinsame Repräsentation der Sensordaten

10.6 KALMAN FILTER

- A-priori Zustandsschätzung basierend auf vorherigem Zustand
- A-posteriori Zustandsschätzung unter Einbeziehung der Messung
- Berechnung aus a-priori Schätzung und gewichteter Differenz zwischen Messung und Messvorhersage
- Algorithmus
 - Time Update (“Prädiktion”): Schätzungen von Systemzustand und Fehlerkovarianzmatrix des vorherigen Zeitschritt auf den jetzigen Zeitschritt
 - Messungsupdate (“Messwerterneuerung”): Kalman Gain Berechnen, Schätzwert aktualisieren, Fehlerkovarianzmatrix aktualisieren