

Tracking, Teil 2: Methoden und Systeme

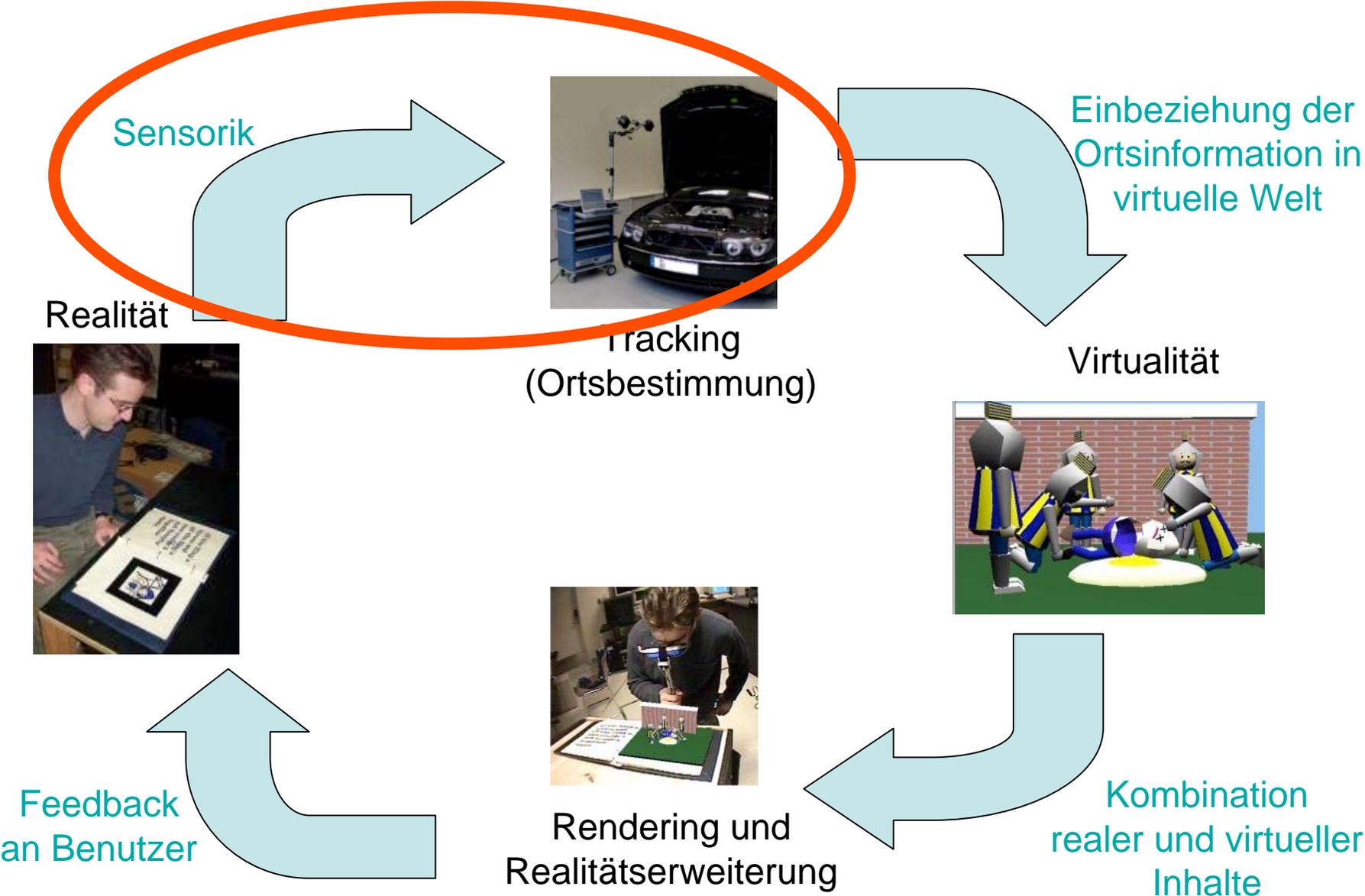
Vorlesung „Augmented Reality“

Prof. Dr. Andreas Butz

WS 2006/2007

Folien teilw. von Dr. Martin Wagner

Ein Generisches AR-System



Wiederholung: Transformationen in 3D

- Verschiedene Rotationsdarstellungen
 - Matrizen
 - Eulerwinkel
 - Axis/Angle
 - Quaternionen
- Homogene Darstellung zur vereinfachten Akkumulation von Transformationen
- Absolute vs. relative Ortsbestimmung
- Abgeleitete räumliche Beziehungen: Geschwindigkeit, Beschleunigung

Wiederholung: Fehler beim Tracking

- Latenz am schwerwiegendsten
- Klassifikation von Fehlern:
 - Statische Fehler (→ Kalibrierung)
 - Rauschen (Jitter)
 - Dynamisch (→ nicht verbesserbar)
- Fehlermodellierung sehr schwierig, problematisch bei hohem Berechnungsaufwand

Wiederholung: Anforderungen Tracker

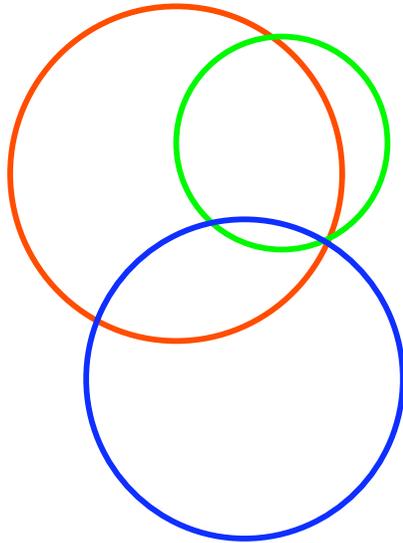
- Hohe Genauigkeit
- Geringe Latenzzeit
- Hohe Wiederholrate (min. 10 fps)
- Kleine Baugröße, v.a. von mobilen Bestandteilen
- Meist 6 DOF, absolute Messung
- Simultane Unterstützung mehrerer Objekte/Benutzer
- Niedriger Preis

→ Gesucht: eierlegende Tracking-Wollmilchsau.

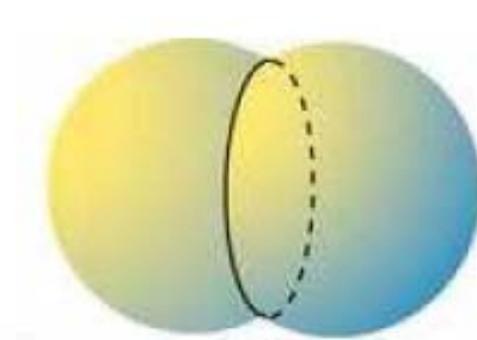
Überblick

- Akustisches Tracking
- GPS etc.
- Inertialtracking
- Magnetisches Tracking
- Optisches Tracking (basierend auf Bildverstehen)
- Sensorfusion

Akustisches Tracking: Prinzip

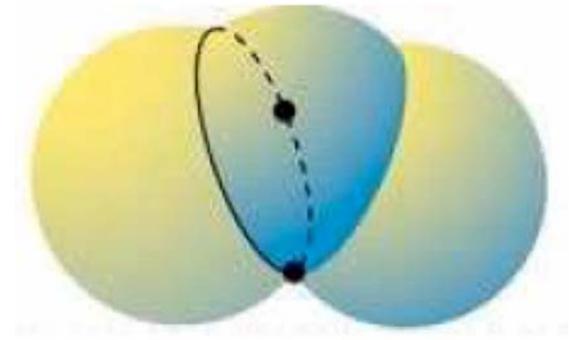


2D:
3 Kreise bestimmen
eindeutigen Punkt



[Bishop et al. 2001]

3D:
2 Kugeln bestimmen
eindeutigen Kreis



[Bishop et al. 2001]

3D:
3 Kugeln bestimmen zwei
Punkte

→ Ausschluss eines Punkts
durch geometrische
Einschränkungen

Akustisches Tracking: Rekonstruktion (1)

- 3 Kugeln mit Radius r_i und Zentrum (x_i, y_i, z_i)

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r_0^2$$

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = r_1^2$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = r_2^2$$

- Trick: Koordinatensystem verschieben

- Kugel 0 im Ursprung $(0,0,0)$

- Kugel 1 an Position $(1,0,0)$

- Kugel 2 an Position $(0,1,0)$

→ „Kugelsystem“ kann in Labor-/Zielsystem zurücktransformiert werden

Akustisches Tracking: Rekonstruktion (2)

- Vereinfachte Gleichungen:

$$x^2 + y^2 + z^2 = r_0^2$$

$$(x-1)^2 + y^2 + z^2 = r_1^2$$

$$x^2 + (y-1)^2 + z^2 = r_2^2$$

- Lösung:

$$x = \frac{r_0^2 - r_1^2 + 1}{2}$$

$$y = \frac{r_0^2 - r_2^2 + 1}{2}$$

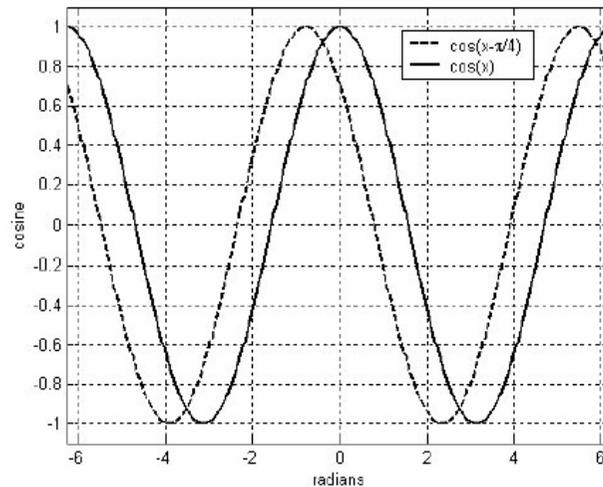
$$z = \pm \sqrt{r_0^2 - x^2 - y^2}$$

Akustisches Tracking: Laufzeitmessung

- Positionsabschätzung durch Kenntnis der Schallgeschwindigkeit: $d[m] = v[m/s] \times t[s]$
- Triggern des Senders nötig (per Funk oder Lichtsignalen)
- Schallgeschwindigkeit hängt ab von
 - Temperatur
 - Luftdruck
 - (Medium !!)
- Störanfällig durch Reflektionen
- Multi-Objektbetrieb: verschiedene Frequenzen und/oder Round-Robin-Verfahren

Akustisches Tracking: Phasenkohärenz

- Phasenverschiebung durch Laufzeit



[Bishop et al. 2001]

- Problem: Verschiebung Φ nicht unterscheidbar von $(\Phi + 2n\pi)$, dadurch max. Verschiebung zwischen zwei Messungen

z.B. bei 40 KHz:
$$\delta[m] = \frac{c[m/s]}{f[Hz]} = \frac{331[m/s]}{40[kHz]} = 8,275[mm]$$

Akustisches Tracking: Systeme



[Sutherland 1968]



Intersense IS-900
[Intersense Inc. 2005]

Akustisches Tracking: Diskussion

Vorteile:

- Recht einfache Berechenbarkeit
- Kleine Bauform

Nachteile:

- Sichtverbindung („Line of Sight“) zum Sender nötig
- Fehlerakkumulation bei Phasenkohärenzverfahren
- Abhängig von variablen Umweltfaktoren (Temperatur, Druck, Feuchtigkeit)
- Nur Positionsbestimmung

GPS: Geschichte

ca. 1940: **LORAN** (Long Range Aid to Navigation) als erstes System zur Schiffsnavigation durch Laufzeitmessung von Radiosignalen (Nachfolger noch heute im Betrieb)

1960: **Transit** (US Navy) als erstes satellitengestütztes Navigationssystem v.a. für U-Boote

1967: **Timation** (US Navy) als erstes System mit Atomuhren auf Satelliten

1972: **System 612B** (US Air Force) nutzt Pseudozufallssignale zur 3D-Lokalisierung

1974-1979: **GPS NAVSTAR** (US Air Force) kombiniert Ideen, Testphase

1980-1994: Aufbauphase, erster „erfolgreicher Test“ im ersten Golfkrieg

Seit 1982: **GLONASS** (**G**LObal'naya **N**AVigatsionannaya **S**putnikovaya **S**istema) als sowjetische Variante von GPS

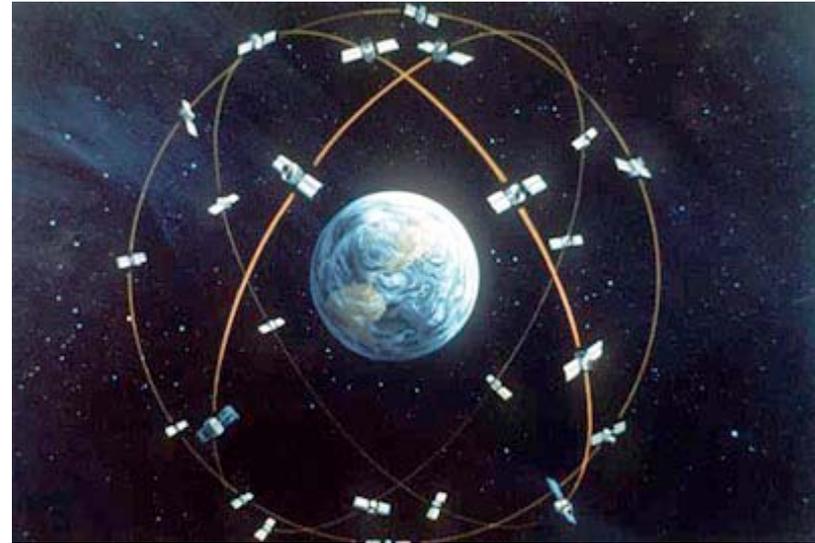
ca. 1985: Erste kommerzielle Anwendungen

2000: Aufhebung der künstlichen Störung von GPS für zivile Empfänger

2004: EU-Beschluss zum Bau von GALILEO

GPS: Grundprinzip

- 24 Satelliten auf 6 Ebenen in 20km Höhe
- Empfänger bekommt Pseudo-Zufallssignale
 - Zeitstempel
 - Position des Satelliten
- Laufzeit der Signale als Basis für Triangulation
- Genauigkeit: > 10m



[US DoD]



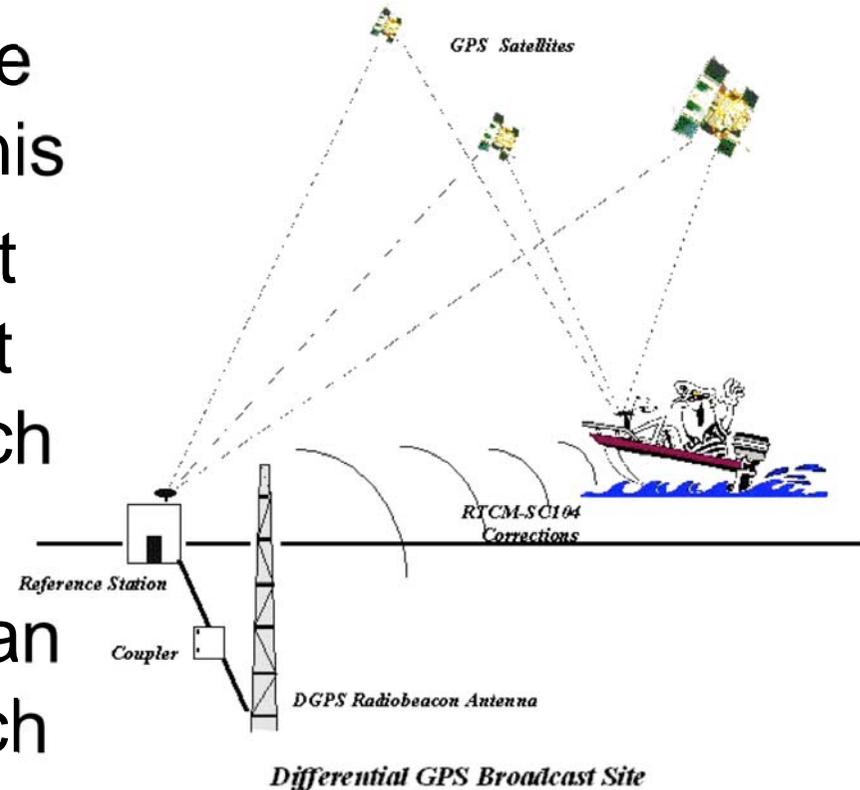
[NASA]

GPS: Zeitprobleme

- Satelliten haben (hochgenaue) Atomuhren
- Empfänger hat (billige) Quarzuhr
- Drift d der Empfängeruhr als zusätzliche Unbekannte in Positionsgleichung
- Somit:
 - 4 Unbekannte (X, Y, Z, d)
 - 4 Laufzeitmessungen
 - 4 Satelliten nötig
- Wahl der Satelliten (bei mehr als 4) ist Optimierungsproblem

Differential GPS (DGPS)

- Störungen in Atmosphäre verfälschen GPS-Ergebnis
- Idee: Referenzstation mit bekanntem Ort empfängt Signale und kann dadurch Störungen bestimmen
- Übermittlung der Werte an (mobile) Empfänger durch UKW-Funk oder GSM/UMTS
- Genauigkeit: 1-5m



Realtime Kinematic DGPS

- Idee: Bestimmung Phasenverschiebung
- Sowohl Referenzempfänger als auch mobiler Empfänger bestimmen Phase des Trägersignals
- Sehr aufwendig und teuer
- Früher v.a. offline (Vermessungsaufgaben)
- Genauigkeit bis auf Zentimeter
- Hohe Wiederholrate (20 Hz)

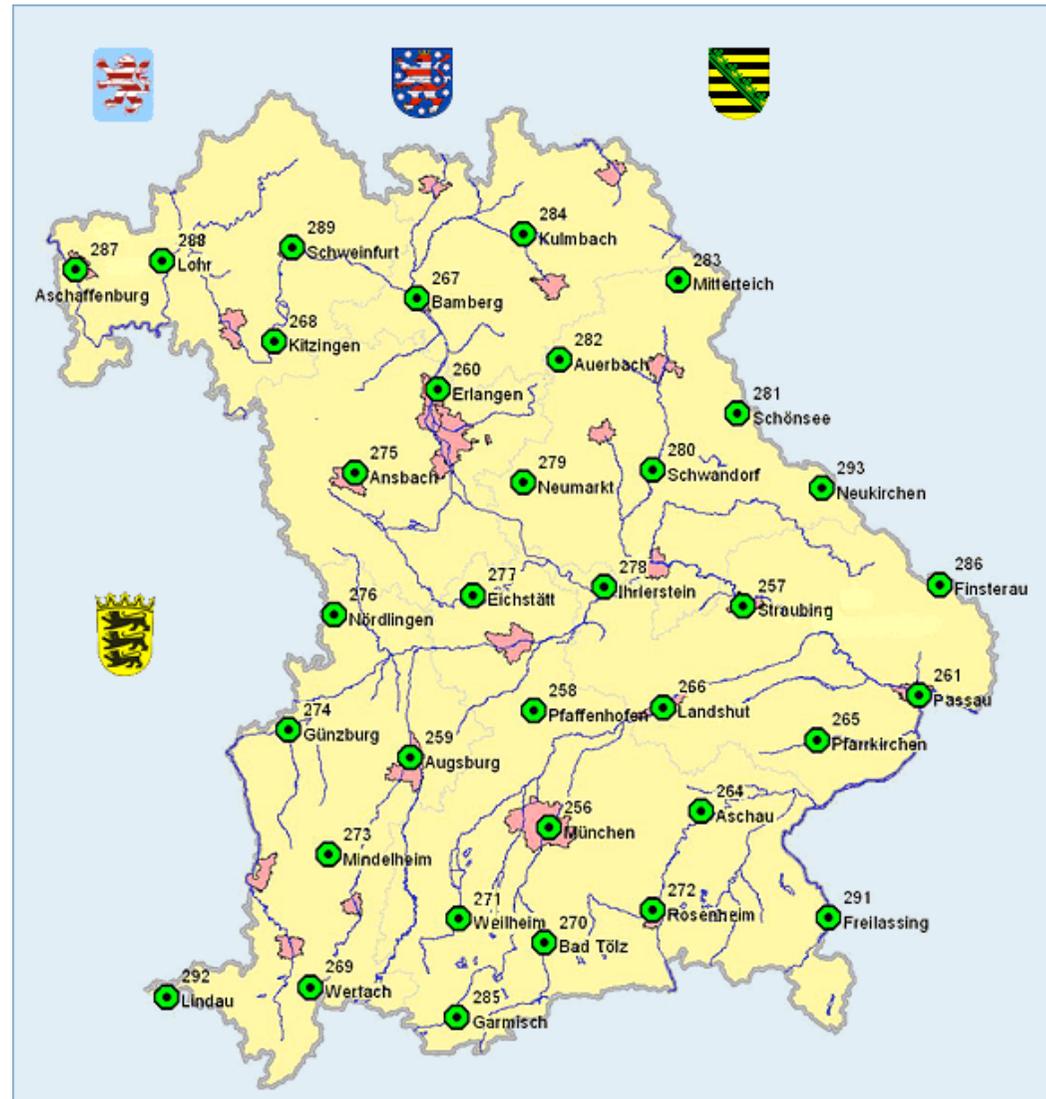
Referenzsignale für (RTK) DGPS

- Eigene Referenzstation
 - Sehr teuer
 - Beschränkte Reichweite (z.B. 2km um Referenzstation)
- Gemeinsame Referenzstationen
 - Abodienste
 - Zusätzliche Möglichkeiten

Landesvermessungsämter: SAPOS

- In Bayern: 36 Referenzstationen
- Vernetzung der Referenzstationen (auch anderer Bundesländer), dadurch geringere Anzahl von Referenzstationen nötig

<http://www.sapos.de/>



[LVA Bayern 2005]

Dienste & Korrektursignalverbreitung

- **EPS: Echtzeitpositionierungsservice**
 - DGPS-Korrekturdaten (1-3m Genauigkeit)
 - Verbreitung über Langwelle und UKW/RDS
 - Pauschale Gebühr 150,- €
- **HEPS: Hochpräziser Echtzeitpositionierungsservice**
 - RTK-DGPS-Korrekturdaten (1-5cm Genauigkeit)
 - Empfang über GSM oder 2m-Funk
 - Gebühr: 0,10 € / Minute (Bayern)
- **GPPS/GHPS: Geodätisch-präziser Positionierungsservice/ Geodätisch-hochpräziser Positionierungsservice**
 - Postprocessing, Datenübermittlung im Internet
 - Genauigkeit bis auf mm
 - Gebühr: 0,20 – 0,80 € / Minute (Bayern)

GPS: Produkte



Trimble DGPS RTK Reference Station



Trimble DGPS RTK Receiver Board



Garmin eTrex



Garmin geko 101,
4,8 cm x 9,9 cm x 2,4 cm
88g

PenmapGPS-
RTK Receiver
/w Tablet PC



GPS: Diskussion

Vorteile:

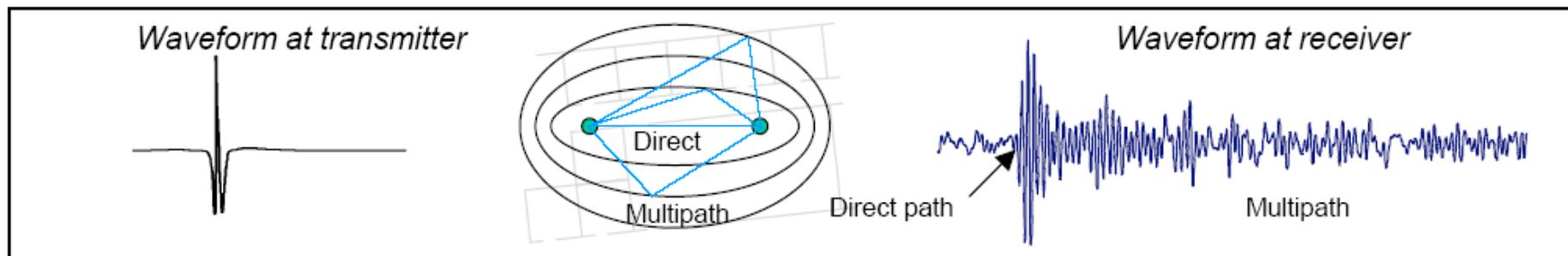
- Weltweit verfügbar
- Für Anwendungen im Freien ausreichend genau (zumindest bei DGPS)
- Günstige Empfänger (ab 100 €)

Nachteile:

- Sichtverbindung zu Satelliten nötig
- Nur Bestimmung der Position, keine Orientierung
- Meist geringe Updaterate (ca. 1 Hz)
- Höhere Genauigkeit unverhältnismäßig teuer

Ultra Wideband (UWB)

- GPS geht nur mit freier Sicht zu Satelliten
- Konventionelle RF-Technologien mit Signalstärkenmessung und Triangulation sind stark störungsanfällig
 - Multipathprobleme
 - Dämpfung durch Umgebung beeinflusst
- UWB sendet keine Sinuswellen, sondern kurze codierte Impulse (in der Fourierzerlegung tauchen also alle Frequenzen auf)
- Genauigkeit 10 cm; Reichweite 600 m² (bei 4 Sensoren)



[Shreve & Kell, 2001]

Inertialtracking: Grundlagen

- Grundprinzip: Trägheit von Massen
- Sensoren sind unabhängig von Infrastruktur
- Aber: nur relative Messungen möglich

Inertialtracking: Accelerometer

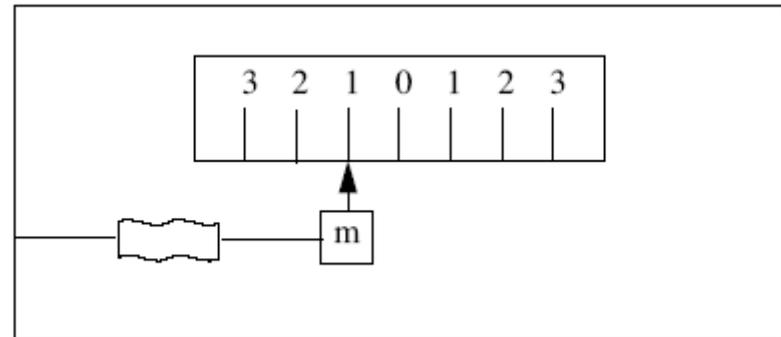
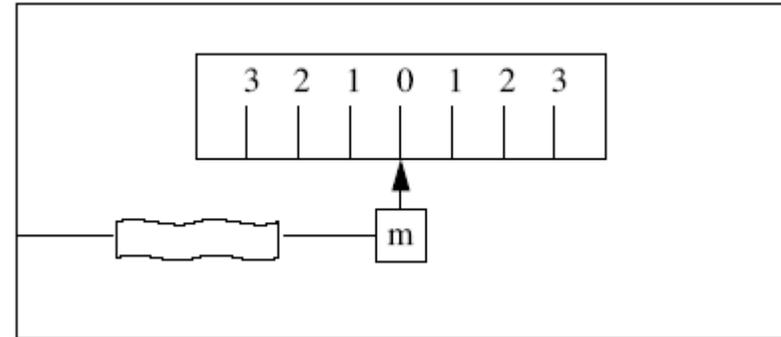
- Messung der Kraft, die durch eine Beschleunigung auf eine Masse wirkt:

$$F = ma$$

- Masse wird an Feder gehängt, Messung von Stauchung/Streckung durch Potentiometer

- Bestimmung der absoluten Positionsänderung durch Integration: $p = \iint a dt^2$

- Sehr günstig
- Problem: Fehlerakkumulation

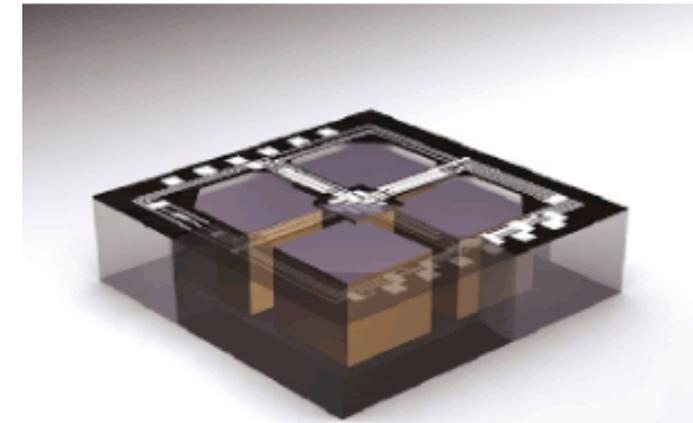


[Bishop et al. 2001]

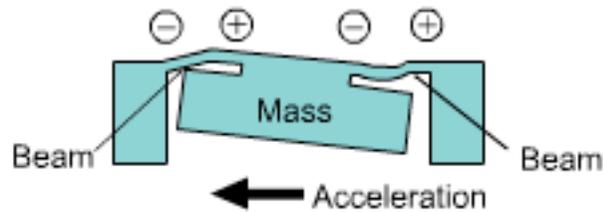
Acceleration sensor

- Built from piezo elements and weights
- Integrated circuit

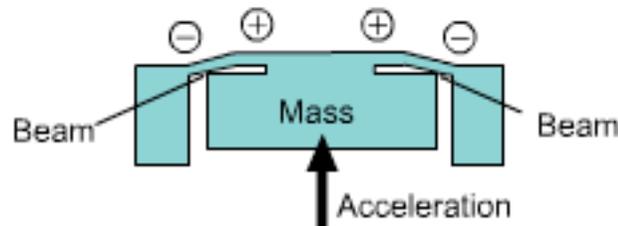
Figure 1 MEMS sensor chip in the GS3



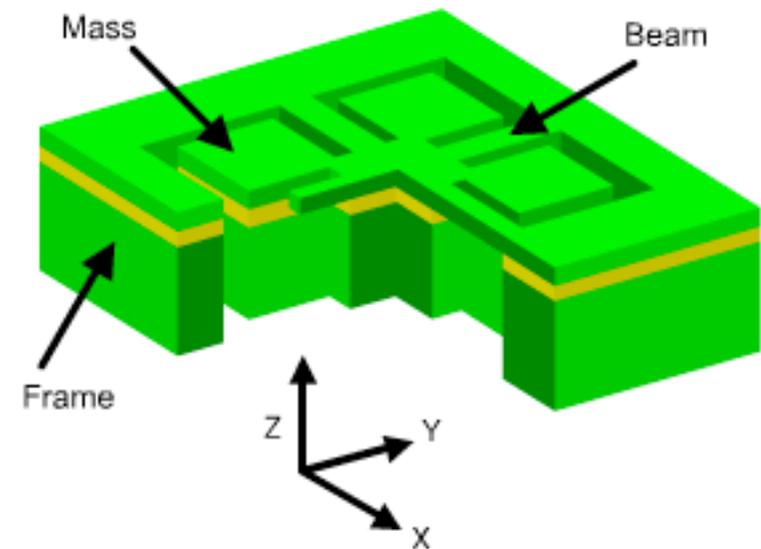
■ Detection of acceleration in the X-axis (Y-axis) direction



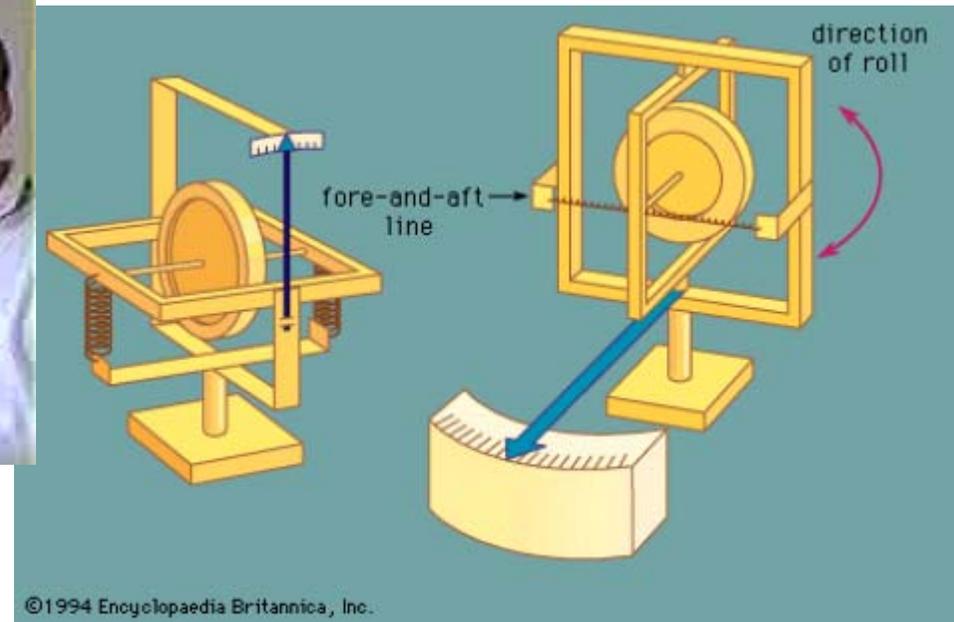
■ Detection of acceleration in the Z-axis direction



⊕ Tensile stress ⊖ Compressive stress

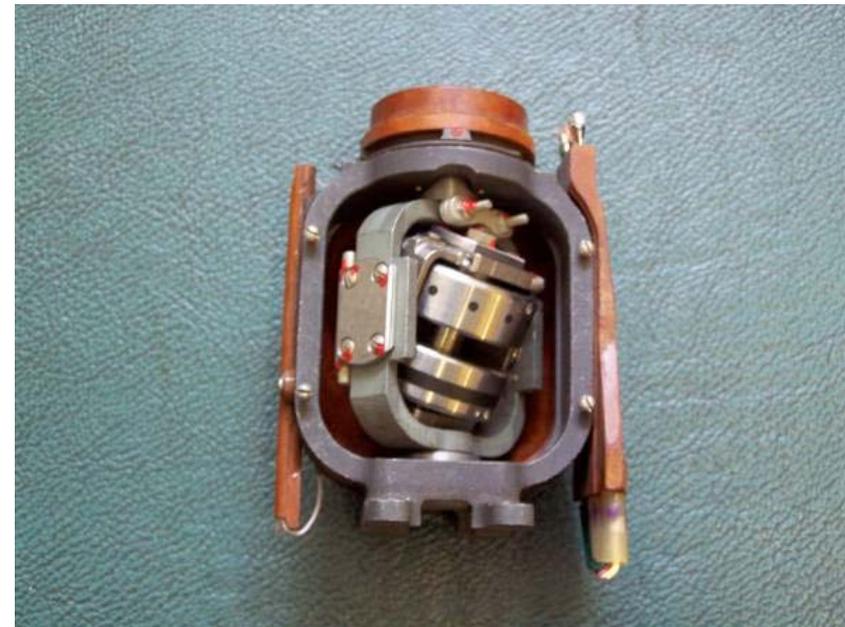
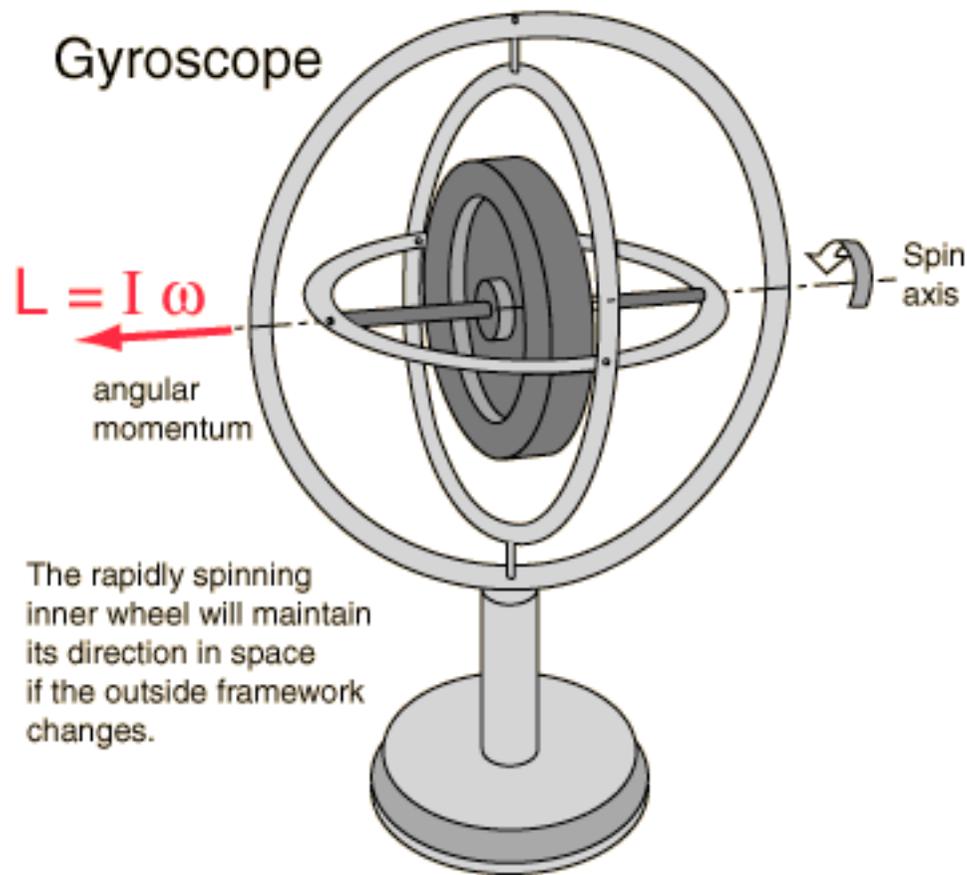


Inertialtracking: Gyroskop



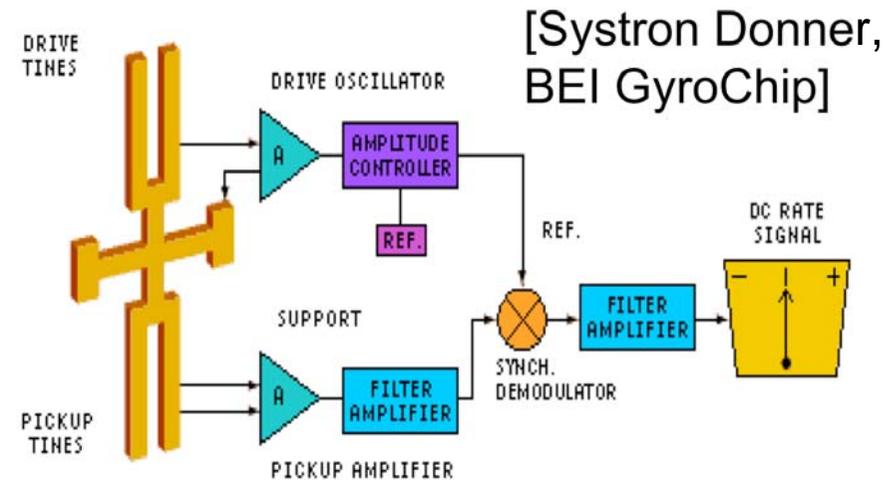
- Grundprinzip: Bewahrung des Winkelmoments drehender Körper, dadurch Messung der Winkelgeschwindigkeit
- Einfachste Art: Messung der Präzessionskraft
- Einfache Integration zur Berechnung absoluter Orientierung

Gyroscopes



Inertialtracking: Weitere Gyroskope

- Vibrationsgyroskop:
 - Vibrierende (Piezo-) Elemente erfahren bei Drehung Korrioliskraft
 - Kann besonders klein gebaut werden
- Lasergyroskop
 - Licht wird im Kreis geschickt
 - Bei Drehung kann Phasenverschiebung gemessen werden



[MEOS GmbH]

Inertialtracking: Produkte



[BEI GYROCHIP Model AQRS,
Automotive-Bereich]



[BEI SGP50,
$0.005^\circ/\text{sec}/\text{square root of Hz}$]



[Intersense Intertrax²,



[Honeywell Accelerometers]

Inertialtracking: Diskussion

Vorteile:

- Braucht keine Infrastruktur („self-contained“)
- Kleine Bauart möglich
- i.A. sehr günstig
- Können in großer Zahl in Umgebung gebracht werden

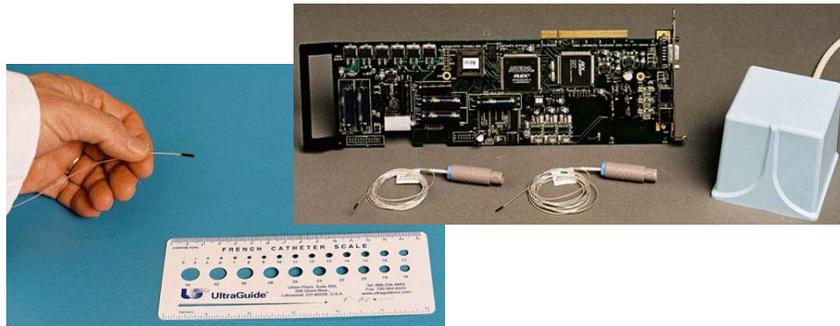
Nachteile:

- Nur relative Messungen
- Fehlerakkumulation durch Integration (Drift)
- Je Sensor kann nur ein Freiheitsgrad gemessen werden
- Kombination mehrerer Sensoren nötig

Magnetisches Tracking: Grundlagen

- Von Spulen erzeugte magnetische Felder hängen kubisch von Entfernung zur Spule ab
- Veränderliche Felder induzieren Spannung in einer Spule, durch drei orthogonale Spulen kann also 3D-Position/Orientierung bestimmt werden
- Zwei Arten:
 - Niederfrequenter Wechselstrom (AC): leitende Materialien in der Umgebung beeinflussen Feldstärke
 - Pulsierender Gleichstrom (DC): nur durch ferromagnetische Materialien beeinflusst

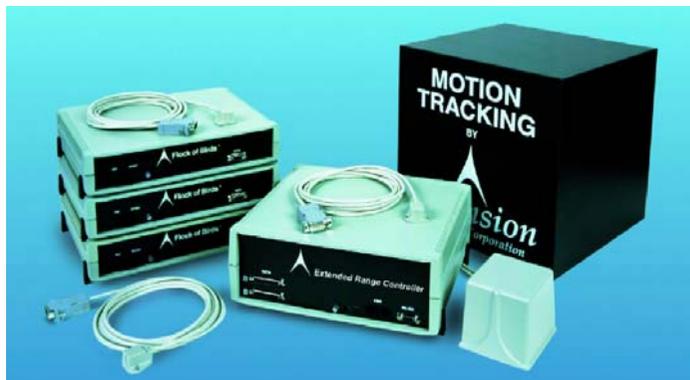
Magnetisches Tracking: Produkte



[Ascension MicroBird, DC]



[Polhemus FastTrak, AC]



[Ascension Flock of Birds, DC]

Magnetisches Tracking: Diskussion

Vorteile:

- Sehr kleine Sensoren (Stecknadelkopf)
- Keine Sichtverbindung nötig
- Sehr hohe Updateraten
- Geringe Latenzzeit

Nachteile:

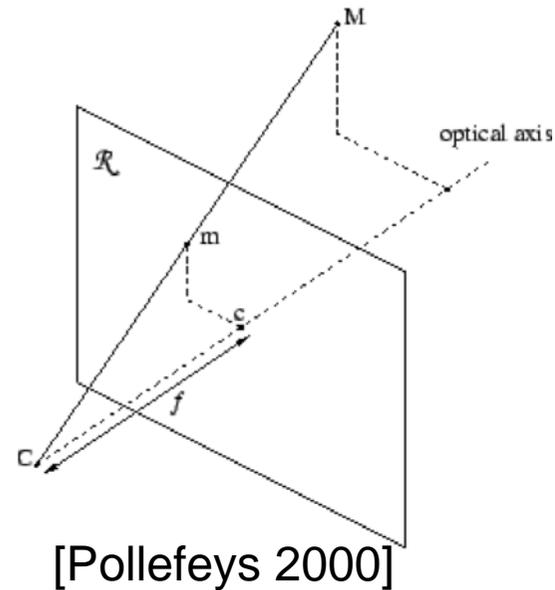
- Sehr kleine Reichweite (Magnetfeld nimmt kubisch ab)
- Starke Verzerrungen durch leitende/ferromagnetische Materialien
- Kabelverbindung zum Sensor nötig

Optisches Tracking: Grundlage

- Menschen orientieren sich v.a. durch den Sehsinn
- **Idee:** Analyse von Videokamerabildern um Position von Objekten festzustellen
- Zwei Grundarten:
 - **Inside-out:** Kamera ist auf getracktem Objekt
 - **Outside-in:** Feste Kamera beobachtet Objekt(e)
 - Wesentlicher Tradeoff: Positions- vs. Orientierungsgenauigkeit

Optisches Tracking: Lochkameramodell

- Einfachstes Kameramodell, auch in der Praxis gut geeignet
- Projektion 3D-Punkt (x,y,z) auf 2D-Punkt (u,v)
- Verfeinerung des Modells durch Scheren, radiale/tangentiale Verzerrungen



$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x \frac{x}{z} \\ f_y \frac{y}{z} \end{pmatrix}$$

Optisches Tracking: 2D-3D-Rekonstruktion

- Bildanalyse ergibt 2D-Position mehrerer bekannter 3D-Punkte
- Ziel: Bestimmung Position und Orientierung der Kamera bzw. von Objekten im 3D-Raum
- Mehrere Algorithmen:
 - Tradeoff Rechenzeit vs. Parameter Kameramodell und Genauigkeit
 - Initialisierungsproblem: bei guter Anfangsschätzung von Parametern (z.B. durch Daten aus letztem Frame) geht Berechnung schneller
 - Offlinebestimmung ***intrinsischer Kameraparameter*** (z.B. Brennweite, CCD-Pixelgröße),
Onlinebestimmung ***extrinsischer Kameraparameter*** (Position und Orientierung)

Optisches Tracking: Features (Merkmale)

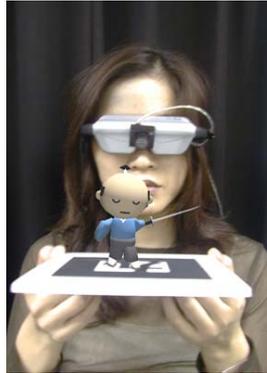
- Einfach:
künstliche Features („Marker“)
 - Sehr robust
 - Vereinfachte Bildverarbeitung
 - Aber: Umgebung wird zugemastert
 - Features können auch „aktiv“ sein (z.B. IR-Dioden)
- Schwierig:
natürliche Features
 - Bsp.: Kanten im Bild, auffällige Texturen, leuchtende Farbflecken
 - i.a. sehr komplex, brandheißes Forschungsthema
 - Hauptproblem: Initialisierung



Film:
[Gordon & Lowe:
Scene Modelling, Recognition and Tracking with Invariant Image Features,
ISMAR 2004]

Film:
[Klein/Drummond:
Sensor Fusion and Occlusion Refinement for Tablet-Based AR,
ISMAR 2004]

Optisches Tracking: Systeme



[AR Toolkit]



[UNC HiBall]



[Northern Digital
Polaris/Optotrak Certus]



[AR Solutions, Garching
b. München]



[ART dTrack, Weilheim]



Optisches Tracking: Diskussion

Vorteile:

- i.A. hohe Genauigkeit
- Prinzipiell unbeschränkte Reichweite
- Mobiler Einsatz möglich
- Großes Potenzial durch Moore's Law

Nachteile:

- Anbringung von Markern nötig (bei derzeitigen Produkten)
- Recht hohe Latenzzeit
- Sichtverbindung nötig
- Anfällig für Jitter

Weitere Trackingarten

- Mechanisches Tracking
 - Feste Verbindung Tracker zu Objekt
 - Sinnvoll v.a. in Robotikanwendungen
 - Eingabegeräte: Sensable Phantom
- Kompass
 - Global anwendbar
 - Fehleranfällig
 - Elektronischer Kompass basiert auf durch das Erdmagnetfeld induzierten Frequenzänderungen in einem Schwingkreis (pro Freiheitsgrad)



[Rickly Hydrological Company 2005]



Sensorfusion

Problem:

Es gibt keinen perfekten Tracker.

Idee:

Kombination mehrerer Sensoren zum Ausgleich von Defiziten

Varianten:

- Integration mehrerer Sensoren in ein Hardwaregerät, Sensorfusion überwiegend in Hardware gelöst
- Kombination mehrerer Sensoren in Software

Arten der Sensorfusion

Komplementär:

- Sensoren hängen nicht voneinander ab
- Bsp.: Kombination GPS mit elektronischem Kompass

Im Wettbewerb:

- Mehrere Sensoren bestimmen gleiche räumliche Beziehung
- Nutzen: Fehlerminimierung

Kooperativ:

- Sensoren versorgen sich gegenseitig mit (Teil-) Informationen
- Bsp.: Stereo-Vision, Stabilisierung optisches Tracking durch Gyroskop

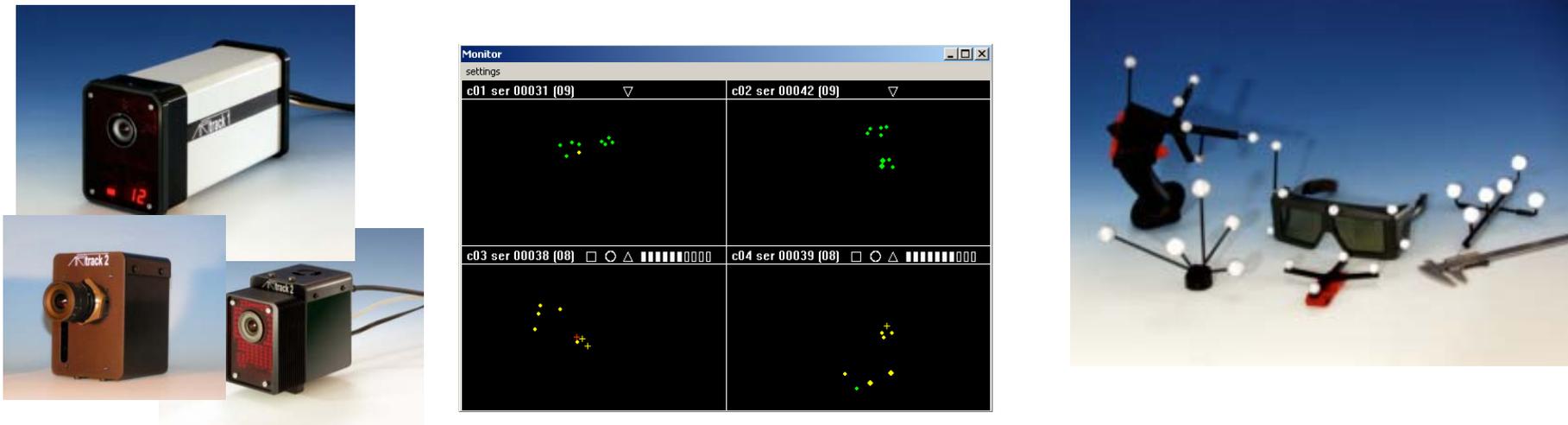
Sensorfusion: Integrierte Geräte

- Bsp.: XSens MTi
 - 3 Piezo-Gyroskope
 - 3 Accelerometer
 - 3 Magnetometer (Erdmagnetfeldreferenz)
 - Temperaturmessung
 - Ausgabe: absolute 3D-Orientierung
- Bsp.: Intersense IS-600
 - Ultraschall für 3D-Position
 - 3 Accelerometer und 3 Gyroskope für Orientierung
 - Ausgabe: absolute 6DOF-Position



Sensorfusion: Softwarekombination

- Bsp.: ART dTrack
 - Kameras geben 2D-Position von retroreflektiven Kugeln
 - Software rekonstruiert daraus 6DOF-Position von eindeutigen Kugelanordnungen („Bodies“)
 - Kosten: > 30.000 €



Dead Reckoning