

# Tracking, Teil 2: Methoden und Systeme

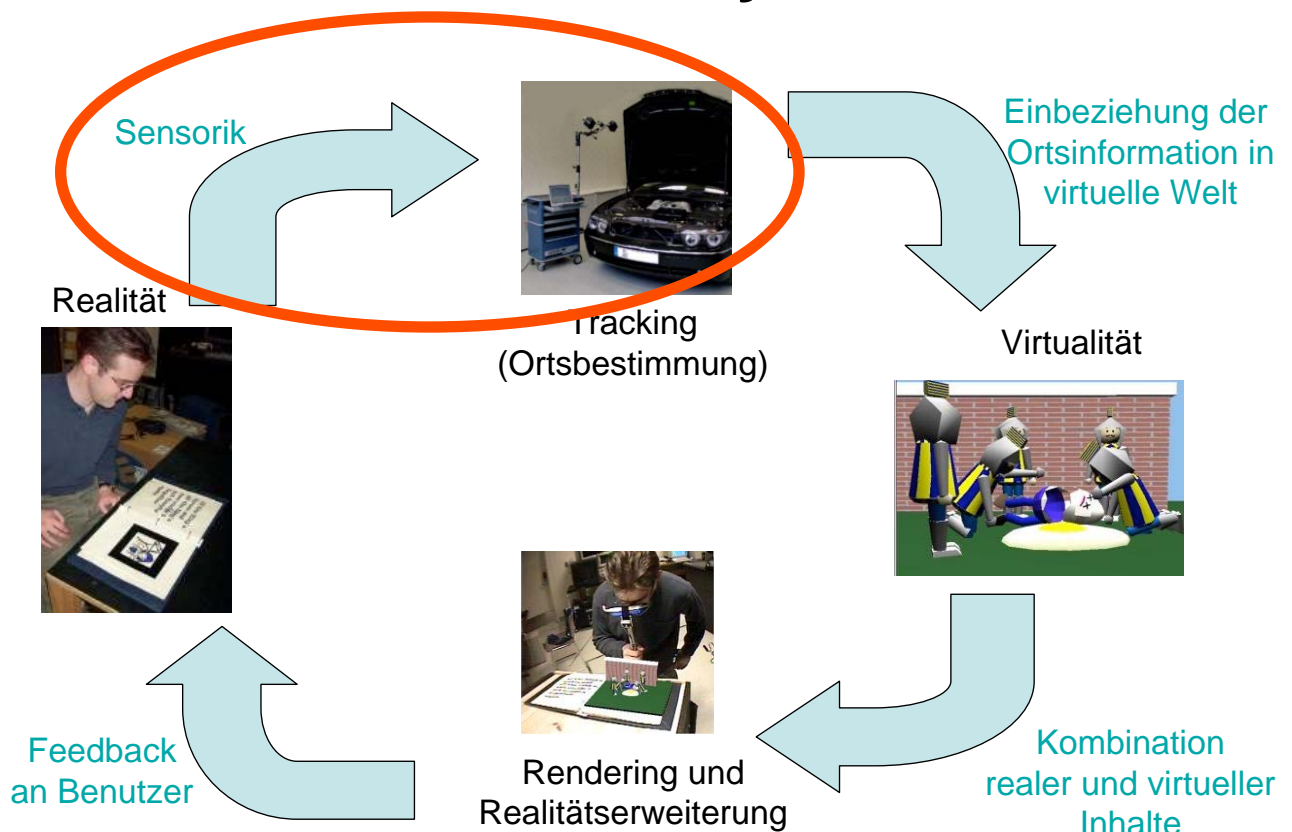
Vorlesung „Augmented Reality“

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

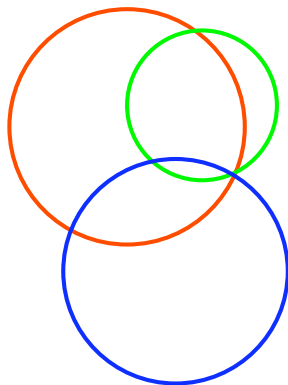
- Hohe Genauigkeit
- Geringe Latenzzeit
- Hohe Wiederholrate (min. 10 fps)
- Kleine Baugröße, v.a. von mobilen Bestandteilen
- Meist 6 DOF, absolute Messung
- Simultane Unterstützung mehrerer Objekte/Benutzer
- Niedriger Preis

→ Gesucht: eierlegende Tracking-Wollmilchsau.

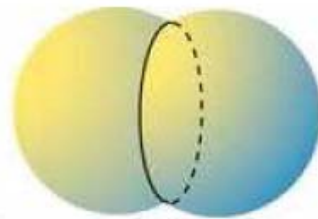
## Überblick

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

# Akustisches Tracking: Prinzip

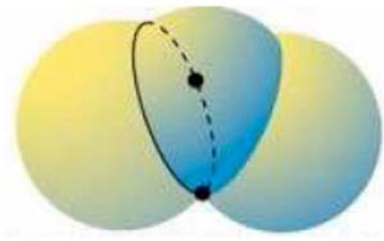


2D:  
3 Kreise bestimmen  
eindeutigen Punkt



[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:

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

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

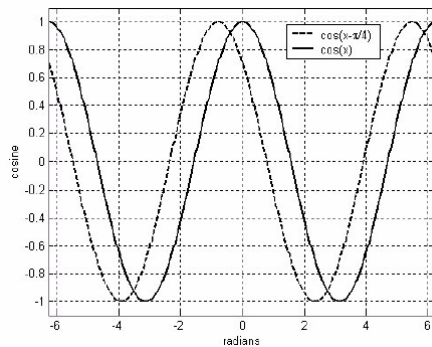
$$z = \pm \sqrt{r_0^2 - x^2 - y^2}$$

## 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  $\Phi$  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**avigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema) als sowjetische Variante von GPS

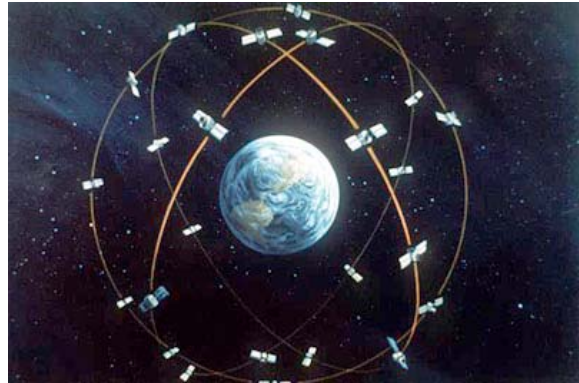
ca. 1985: Erste kommerzielle Anwendungen

2000: Aufhebung der künstlichen Störung von GPS für zivile Empfänger

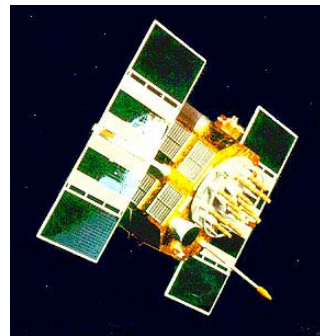
2004: EU-Beschluss zum Bau von GALILEO

# 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]

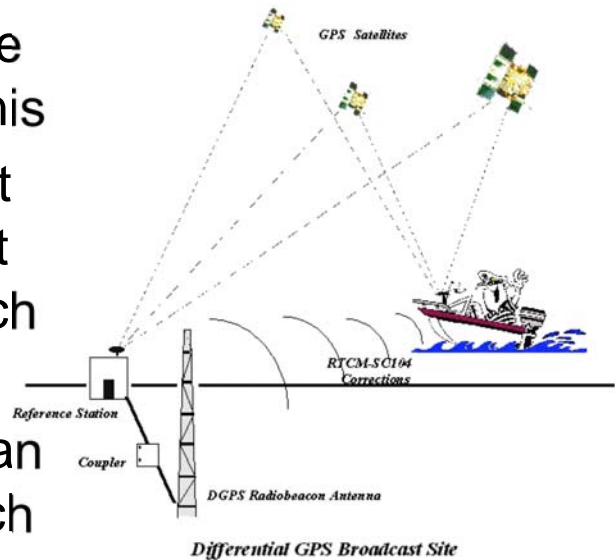
# GPS: Zeitprobleme

- 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)

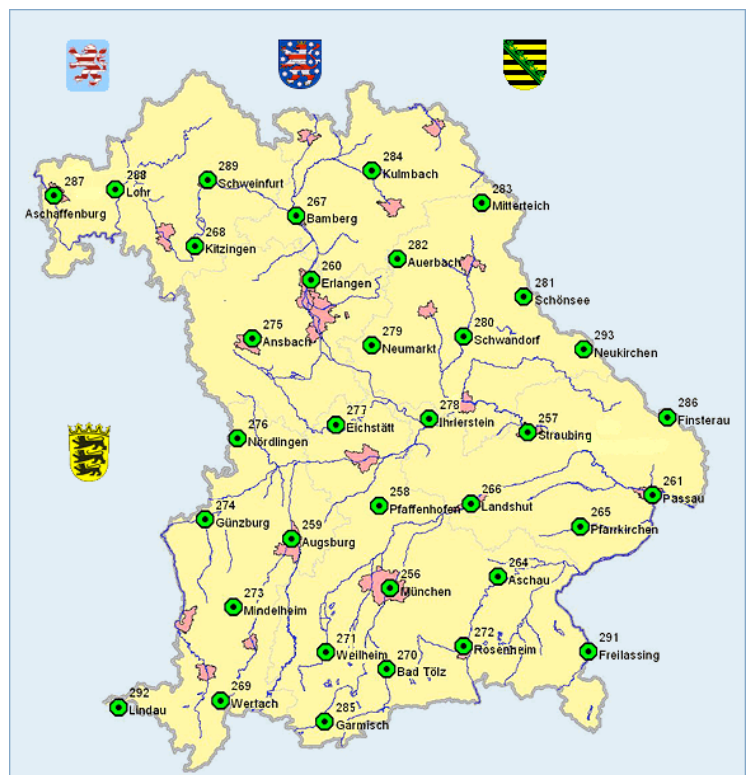
# Referenzsignale für (RTK) DGPS

- 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/>

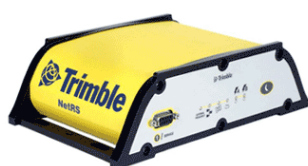


[LVA Bayern 2005]

# 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:

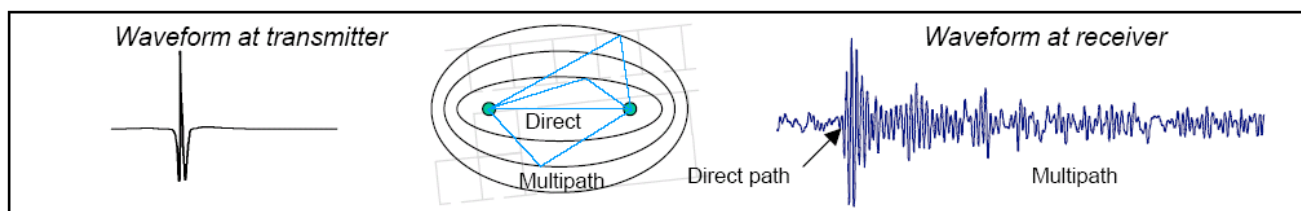
- Weltweit verfügbar
- Für Anwendungen im Freien ausreichend genau (zumindest bei DGPS)
- Günstige Empfänger (ab 100 €)

## 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 m<sup>2</sup> (bei 4 Sensoren)



[Shreve & Kell, 2001]

# Inertialtracking: Grundlagen

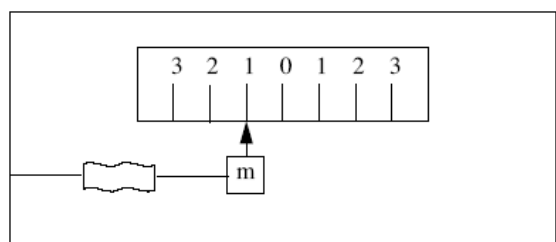
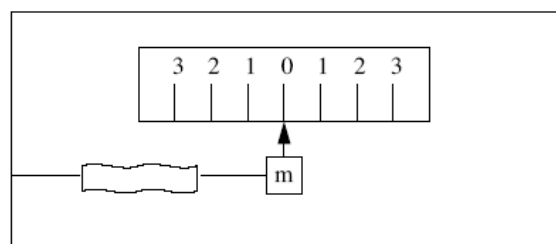
- Grundprinzip: Trägheit von Massen
- Sensoren sind unabhängig von Infrastruktur
- Aber: nur relative Messungen möglich

## 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

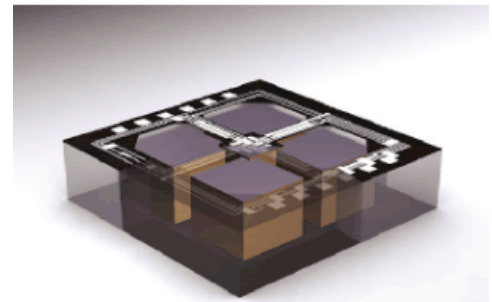


[Bishop et al. 2001]

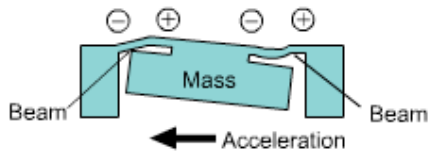
# Acceleration sensor

- Built from piezo elements and weights
- Integrated circuit

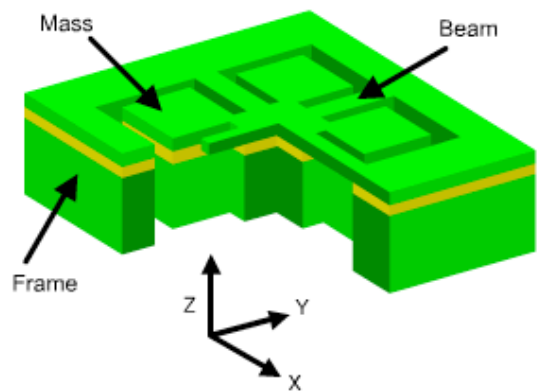
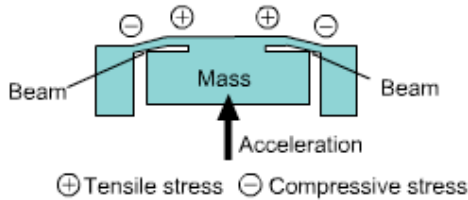
Figure 1 MEMS sensor chip in the GS3



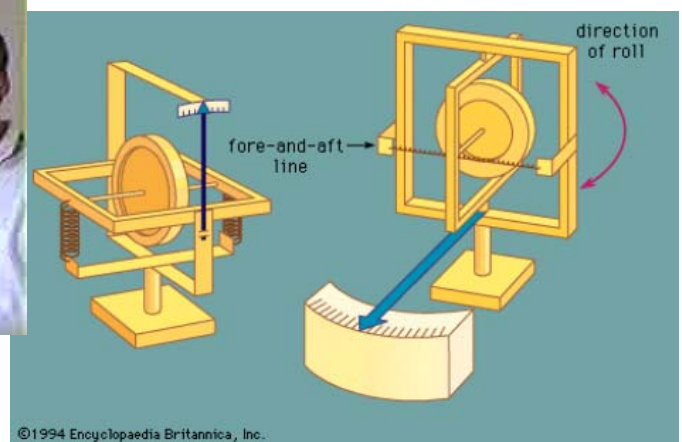
■ Detection of acceleration in the X-axis (Y-axis) direction



■ Detection of acceleration in the Z-axis direction



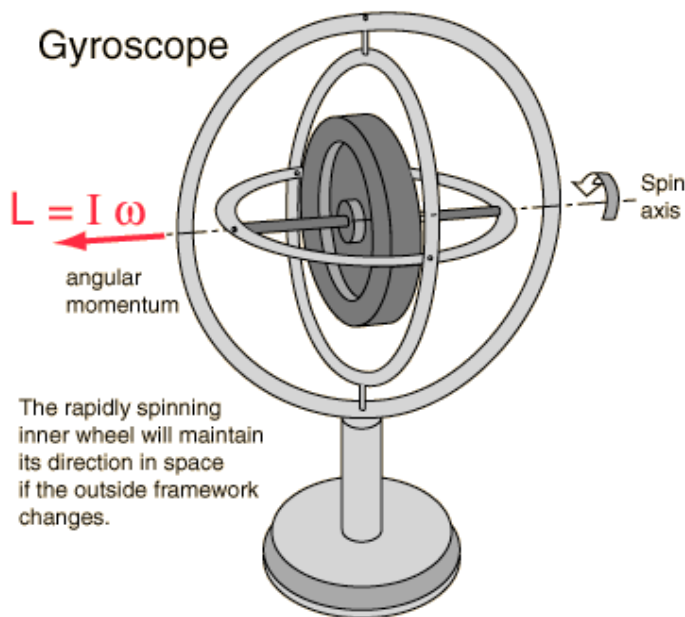
# Inertialtracking: Gyroskop



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

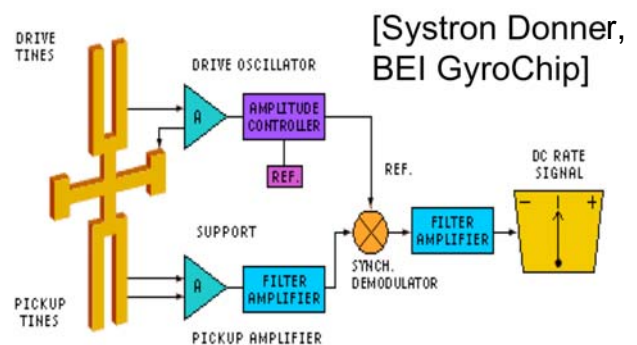


# Gyroscopes



## 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,  
<math>0.005^\circ/\text{sec}/\text{square root of Hz}</math>]



[InterSense Intertrax<sup>2</sup>,



[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:

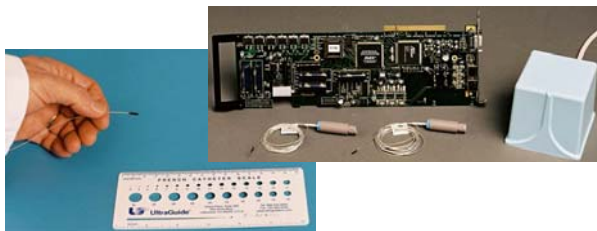
- Nur relative Messungen
  - Fehlerakkumulation durch Integration (Drift)
  - Je Sensor kann nur ein Freiheitsgrad gemessen werden
- Kombination mehrerer Sensoren nötig



# 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:

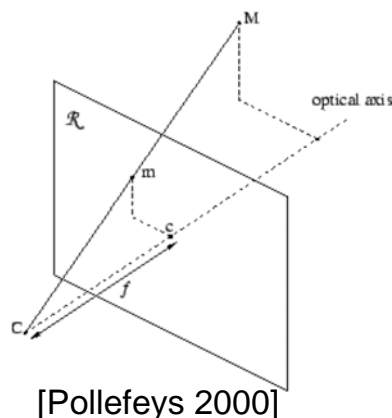
- Sehr kleine Reichweite (Magnetfeld nimmt kubisch ab)
- Starke Verzerrungen durch leitende/ferromagnetische Materialien
- Kabelverbindung zum Sensor nötig

# 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 zugепflastert
  - 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]



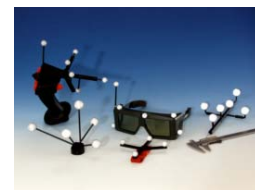
[UNC HiBall]



[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)



# 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

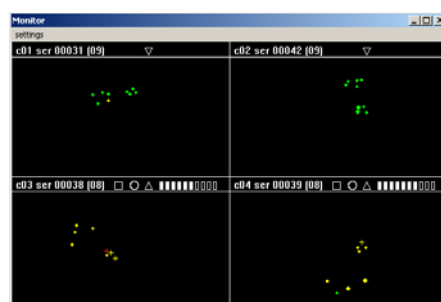
# Sensorfusion: Integrierte Geräte

- 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