



64-424

Intelligente Roboter

http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/ lectures/2008ws/vorlesung/ir

Jianwei Zhang



Universität Hamburg Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften Department Informatik

Technische Aspekte Multimodaler Systeme

Wintersemester 2008/2009

< ロ > < 母 > < 臣 > < 臣 > < 臣 > の Q ()



Gliederung

- 1. Grundlagen der Sensorik
- 2. Winkel und Bewegungen
 - Optische Encoder
 - Inkrementalgeber
 - Winkelgeber
 - Resolver
 - Anwendung von Inkrementalgebern
 - Literatur
 - Tachometer
 - Gyroskope
- 3. Kräfte und Druck
- 4. Abstandssensoren
- 5. Scandaten verarbeiten



Tachometer

- ► Tachometer ↔ Geschwindigkeitsmesser
- Genaue Tachometer mit Hilfe von Inkrementalgebern oder Resolvern
- Gemessene Winkeländerung wird durch vergangene Zeit geteilt
- Günstigere Alternativen zählen Umdrehungen eines Rades (z.B. Fahrradcomputer)





Gyroskope (Kreisel)

- Ein Gyroskope ist eine Art Richtungsgeber (kurz: Gyro)
- Alternative zu magnetischem Kompass
- Der am häufigsten verwendete Sensor in der Navigation
- Anwendung vor allem im Weltraum (Kontrolle der Position und Orientierung von Satelliten oder Raumstationen)
- Drei Typen von Gyroskopen:
 - mechanisch
 - monolithisch Silizium / MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)
 - optisch



2.8.1 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Mechanische Gyroskope

64-424 Intelligente Roboter

Mechanisches Gyroskope

- Massive Scheibe rotiert um eine Drehachse
- Drehachse befindet sich in einem Rahmen
- Dieser kann um ein (oder zwei) Achsen rotieren



MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

2.8.1 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Mechanische Gyroskope

Mechanisches Gyroskope (cont.)



Zwei Eigenschaften:

- 1. Drehachse eines Gyroskopes bleibt fix mit Bezug auf ein globales Koordinatensystem
- Ein Gyroskope liefert ein Drehmoment proportional zur Winkelgeschwindigkeit einer Rotation um eine Achse senkrecht zur Drehachse (Grund: Präzession)



2.8.1 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Mechanische Gyroskope

Präzession



Video: praezession.mov

MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter



2.8.2 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - MEMS Gyroscope

MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

Monolithische Silizium Gyroskope

- Mikromechanischer Aufbau in Silizium
- Oberflächen- oder Bulk-Mikromechanik
- unterschiedliche Realisierungsformen





2.8.2 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - MEMS Gyroscope



Monolithische Silizium Gyroskope (cont.)

- schwingende Struktur
- Sekundärschwingung durch äußere Drehbewegung
- kapazitive Auswertung









MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

2.8.2 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - MEMS Gyroscope

Monolithische Silizium Gyroskope (cont.)







MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

2.8.2 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - MEMS Gyroscope

Monolithische Silizium Gyroskope (cont.)





2.8.3 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Optische Gyroskope

Optisches Gyroscope

- Zwei gegenläufige Lichtstrahlen werden von einen Sender/Empfänger in einen Fiberglas-Ring ausgestrahlt
- Laufzeit einer Umdrehung:

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{nc}$$

- n: Brechungskoeffizient
- c: Lichtgeschwindigkeit



2.8.3 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Optische Gyroskope



Optisches Gyroscope (cont.)

Wenn der Ring mit der Winkelgeschwindigkeit Ω rotiert, gilt (Sagnac Effekt):

 $I_{cw} = 2\pi R + \Omega R \Delta t$ $I_{ccw} = 2\pi R - \Omega R \Delta t$

Daraus folgt:

$$\Delta l = \frac{4\pi\Omega R^2}{nc}$$



MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

2.8.3 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Optische Gyroskope

Optisches Gyroscope (cont.)





2.8.3 Winkel und Bewegungen - Gyroskope - Optische Gyroskope



64-424 Intelligente Roboter

Optisches Gyroscope (cont.)







Gliederung

- 1. Grundlagen der Sensorik
- 2. Winkel und Bewegungen
- 3. Kräfte und Druck

Dehnungsmessstreifen Anwendung: *BarrettHand* Kraft-Moment-Sensoren (KMS) Taktile Sensoren Literatur

- 4. Abstandssensoren
- 5. Scandaten verarbeiten
- 6. Rekursive Zustandsschätzung
- 7. Sichtsysteme
- 8. Fuzzy-Logik



Gliederung (cont.)

9. Steuerungsarchitekturen





Dehnungsmessstreifen (DMS)

- 1938 erfand der Amerikaner A. C. Ruge den Dehnungsmessstreifen (DMS)
- Dehnungsmessstreifen sind auf einer Trägermaterial aufgebrachte dünne Leiterbahnen
- Sie werden fest mit einer Werkstücksoberfläche verklebt
- ▶ Bei mechanischen Spannungen verändern sie ihren Widerstand
- Für die sehr kleinen Widerstandsänderungen sind spezielle Schaltungen und Messgeräte erforderlich
- Neben der Größe und Richtung mechanischer Spannungen lassen sich auch damit verbundene Größen wie Weg, Kraft, Druck oder Beschleunigung messen



3.1.1 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Physikalischer Hintergrund



Physikalischer Hintergrund

 Bei mechanischer Belastung (z.B. Dehnung) eines Drahtes (Metall) vergrößert sich dessen elektrischer Widerstand

Ursachen:

- Vergrößerung der Länge
- Verringerung der Querschnittsfläche
- bei starker Dehnung auch Umkristallisierung
- Der Effekt wurde von William Thomson im Jahre 1856 entdeckt und unter Verwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung (Charles Wheatstone, 1843) gemessen



3.1.1 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Physikalischer Hintergrund



64-424 Intelligente Roboter

Physikalischer Hintergrund (cont.)

- Art der Dehnung hängt ab von
 - Form des Körpers
 - Angriffsweise der äußeren Kräfte
 - Materialeigenschaften des Körpers
- Ein Körper heißt elastisch, wenn er bei Wegfall der äußeren Kräfte seine ursprüngliche Form wieder annimmt



3.1.1 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Physikalischer Hintergrund



64-424 Intelligente Roboter

Physikalischer Hintergrund (cont.)

Lineare Beschreibung der Elastizität durch Hookesches Gesetz:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \epsilon$$

- σ : Zug- (negativ) oder Druckspannung (positiv)
- F: normal zur Fläche A angreifende Kraft
- €: Dehnung
- E: Dehnungs- oder Elastizitätsmodul (Materialkonstante)





Physikalischer Hintergrund (cont.)

 \triangleright Die Dehnung ϵ ist das Verhältnis der Längenänderung ΔI zur ursprünglichen Länge l_0 bei einer Spannung σ :

$$\epsilon = \frac{\Delta I}{I_0}$$

linear elastisches Verhalten gilt nur bis zu einer Grenze $\sigma_p > \sigma$





Widerstandsänderung

Widerstand R eines Drahtes:

$$\mathsf{R} = \frac{lp}{A} = \frac{4lp}{\pi d^2}$$

- I: Länge des Drahtes
- p: spezifischer Widerstand
- d: Durchmesser

 $A = \pi d^2/4$: Querschnittsfläche



3.1.2 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Widerstandsänderung



Widerstandsänderung (cont.)

- Wird der Draht (einachsig) gedehnt, ändert sich der Widerstand R aufgrund der Änderungen von I, A, und p
- Für infinitesimal kleine Änderungen gilt folgender Zusammenhang (totales Differential):

$$dR = \frac{4p}{\pi d^2}dI + \frac{4l}{\pi d^2}dp + \frac{8lp}{\pi d^3}dd$$



3.1.2 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Widerstandsänderung

Widerstandsänderung (cont.)

Gilt $\Delta p \ll p$, $\Delta l \ll l$ und $\Delta d \ll d$, so lässt sich mit guter Genauigkeit die relative Widerstandsänderung $\Delta R/R$ annähern:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta I}{I} - 2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta p}{p}$$



3.1.2 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Widerstandsänderung



Widerstandsänderung (cont.)

- Bei einer Dehnung ε in Längsrichtung verändert sich der Durchmesser um ε_q = Δd/d
- Poissonzahl: μ = -ε_q/ε (Das Minuszeichen kennzeichnet die Gegenläufigkeit von Längen- und Dickenänderung)
- Für die relative Widerstandsänderung folgt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \epsilon + 2\mu\epsilon + \frac{\Delta p}{p}$$
$$= (1 + 2\mu) \cdot \epsilon + \frac{\Delta p}{p}$$





64-424 Intelligente Roboter

Dehnungsmessstreifen in der Praxis

In der Praxis verwendete Dehnungsmessstreifen (DMS):

- Folien-DMS: bestehen aus Trägermaterial (z.B. Polyamid) und den eigentlichen Messstegen (z.B. aus Konstantan)
- Halbleiter-DMS: Messstege aus Halbleitermaterial, hochempfindlich, überwiegend in Drucksensoren angewandt
- ► Draht-DMS: flach gewickelter Dehndraht (⊘ ≈ 0.02 mm) auf Papierträger
- Röhrchen-DMS: DMS mit frei gespannten Drähten, Messung bei hohen Temperaturen



Folien-DMS

- Folien-DMS sind die am häufigsten verwendete Dehnungsmessstreifen
- Metallisches Messgitter wird in einem galvanischen Verfahren auf eine Trägerfolie aufgebracht
- Eine dünne Kunststoffschicht schützt das Messgitter
- Werden mit speziellem Kleber auf ein Werkstück aufgebracht





3.1.3 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Dehnungsmessstreifen in der Praxis

Folien-DMS (cont.)







Folien-DMS (cont.)

- Standard-Messgitter: lang und schmal (z.B. $6 \times 2 mm^2$)
- Es besitzt zwei Löt-Anschlusspunkte und wird in Längsrichtung belastet
- Es wird nur in dieser einen Lastrichtung gemessen (einachsige Spannungsmessung), die Querempfindlichkeit ist gering







Folien-DMS (cont.)

Beispiele für Folien-DMS:



(a) einfache Form,

- (b) & (c) für verschiedene Koordinaten,
- (d) für Drehmomentaufnehmer und
- (e) Rosette für Membran-Druckaufnehmer





Folien-DMS (cont.)

- ▶ typische Nennwiderstände: 120, 300, 350 oder 600 Ω
- Toleranzen der Widerstandswerte $< \pm 0,5$ %
- ▶ Betriebsspannungen: 1 V − 10 V
- Änderungen der Länge des DMS bis zu $\pm 3\%$
- elastische Bereich in der Praxis meist nicht ausgenutzt
- typische Längenänderungen: 0.1 $-10 \, \mu m$
- erreichbare Genauigkeit bei 20° C etwa 1 % bis 5 %





Folien-DMS (cont.)

Häufig verwendete Messgitter-Materialien:

 k Konstantan
 (57 % Cu, 43 % Ni) k = 2.05

 k Karma
 (20 % Cr, 73 % Ni, 7 % Fe - Al) k = 2.1

 k Nichrome V
 (20 % Cr, 80 % Ni) k = 2.2

 k Platin Wolfram
 (92 % Pt, 8% W) k = 4.0





k-Wert

- Gibt an, um welchen Faktor die relative Widerstandsänderung über der relativen Längenänderung liegt
- Hoher k-Wert \Rightarrow

bei gleicher Dehnung eine große Widerstandsänderung und damit ein hohes Messsignal

- Wird durch den Gefügeaufbau und die Vorgänge im Gefüge während der Dehnung bestimmt
- Für die meisten DMS gilt k = 2



k-Wert (cont.)

Bekannt: relative Widerstandsänderung $\Delta R/R$

$$rac{\Delta R}{R} = (1+2\mu)\cdot\epsilon + rac{\Delta p}{p}$$

Daraus folgt das Verhältnis Widerstands- zu Längenänderung:

$$k = rac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\mu + rac{\Delta p/p}{\epsilon}$$

und es gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon$$



Temperatureinflüsse

- Bei geeigneter DMS- und Kleberauswahl kann der Temperaturbereich von 4 K bis 1200 K (900° C) überbrückt werden
- DMS werden mit verschiedenen Temperaturkoeffizienten angeboten (f
 ür verschiedene Objektmaterialien, begrenzter Temperaturbereich)
- Längenänderungen aufgrund von Temperaturänderungen führen so nicht zu einem Messsignal, wenn sich das Material frei ausdehnen kann oder wenn der Körper überall die gleiche Temperatur besitzt (selbst-temperaturkompensierende DMS)


Weitere Umgebungseinflüsse

- Umgebungsdruck von Vakuum bis hoher Überdruck möglich
- Magnetische Flussdichte bis 2 T möglich
- Bis zu einem gewissen Grad wird auch Kernstrahlung verkraftet





64-424 Intelligente Roboter

Querempfindlichkeit und Schwingungen

- Querempfindlichkeit: Kurvenstücke des Messgitters dehnen
 ⇒ Verbreiterung der Kurvenstücke verringert Anteil am Gesamtwiderstand
- Dehnungen können statisch (keine oder nur langsame zeitliche Änderung) und dynamisch (schnelle Änderungen, bzw. Schwingungen) gemessen werden
- Typisch sind Frequenzen bis 50 kHz bei Schwingungen



64-424 Intelligente Roboter



3.1.3 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Dehnungsmessstreifen in der Praxis

Wheatstonesche Brückenschaltung

- ► typische Längenänderungen im μ m-Bereich ⇒ relative Widerstandsänderung im Bereich $10^{-3} \Omega$
 - \Rightarrow Messauflösung $10^{-5} 10^{-6} \,\Omega$

Hilfe: Das Ausgangssignal des DMS, eine
 Widerstandsänderung, wird mit einer Wheatstoneschen
 Brückenschaltung in eine Spannungsmessung umgewandelt





64-424 Intelligente Roboter

Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

- R1 R4: variable Widerstände
- U_s: Speisespannung
- U_d: Messspannung







64-424 Intelligente Roboter

Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

Änderung der Widerstande:

$$R_i = R + \Delta R_i = R \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_i}{R}\right) = R \cdot (1 + r_i)$$

mit

$$r_i = \frac{\Delta R_i}{R}$$





64-424 Intelligente Roboter

Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

 Mit Hilfe der Ströme in den Strängen lassen sich folgende Beziehungen zeigen:

$$\frac{U_2}{U_s} = \frac{1+r_2}{2+r_1+r_2} \quad \text{und} \quad \frac{U_3}{U_s} = \frac{1+r_3}{2+r_3+r_4}$$

Mit Ud = U3 – U2 folgt die nichtlineare Gleichung der Wheatstonschen Brückenschaltung:

$$\frac{U_d}{U_s} = -\frac{1+r_2}{2+r_1+r_2} + \frac{1+r_3}{2+r_3+r_4}$$





3.1.3 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Dehnungsmessstreifen in der Praxis

64-424 Intelligente Roboter

Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

 Für kleine relative Widerstandsänderungen kann mit der Näherung

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x$$

die linearisierte Form der Gleichung für die Wheatstonschen Brückenschaltung hergeleitet werden:

$$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} (r_1 - r_2 + r_3 - r_4)$$





64-424 Intelligente Roboter

Messen mit DMS

3.1.4 Kräfte und Druck - Dehnungsmessstreifen - Messen mit DMS

In der Praxis werden die folgenden Grundschaltungen mit DMS in der Wheatstonschen Brücke angewendet:

Name	Gleichung	Anwendung
Viertelbrücke	$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} \cdot r_1$	Zug-/Druckstab, Biegung
Halbbrücke	$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} \cdot (r_1 - r_2)$	Biegebalken, Torsion
Vollbrücke	$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} (r_1 - r_2 + r_3 - r_4)$	Biegung, Torsion

 Die relativen Widerstandsänderungen können über die Grundgleichung der Messung mit DMS durch die Dehnungen in folgender Form ersetzt werden:

$$r_i = k \cdot \epsilon$$



3.2 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand

MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

Anwendung: *BarrettHand*TM





64-424 Intelligente Roboter

3.2.1 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - Aufbau

BarrettHand[™]: Aufbau

- Drei Finger: F1, F2, F3
- F1 und F2 rotieren synchron und symmetrisch um die Handfläche
- Jeder Finger besitzt zwei Gelenke (durch TorqueSwitchTM verbunden) die über einen Motor angetrieben werden







64-424 Intelligente Roboter

3.2.1 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - Aufbau

BarrettHandTM: Gelenke







64-424 Intelligente Roboter

$BarrettHand^{TM}$: $TorqueSwitch^{TM}$

3.2.2 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - TorqueSwitch IM

- ► Bindung von zwei Gelenken an nur einen Motor → Gewichtsreduzierung
- Ermöglich "unabhängige" Bewegung beider Gelenke
- Drehmomenteinstellung reguliert die Bewegung



3.2.2 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - TorqueSwitch 1M

MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

BarrettHandTM: TorqueSwitchTM (cont.)





3.2.3 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - Steuerung

MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

*BarrettHand*TM: Steuerung







64-424 Intelligente Roboter



3.2.4 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - Dehnungsmessstreifen

BarrettHandTM: Dehnungsmessstreifen







3.2.4 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - Dehnungsmessstreifen

64-424 Intelligente Roboter

BarrettHandTM: Dehnungsmessstreifen (cont.)



- < ロ > < 回 > < 三 > < 三 > < 回 > <



3.2.5 Kräfte und Druck - Anwendung: BarrettHand - Griffe

MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

BarrettHand[™]: Griffe





MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

Kraft-Moment-Sensoren (KMS)

- Zumeist starre Konstruktionen die kleine Verformungen erlauben
- Messung der Verformung mit Dehnungsmessstreifen (DMS)

Vorteile:

- ▶ in großem Bereich linear
- \blacktriangleright starke Dämpfung \rightarrow schwingt nicht so leicht

Nachteile:

Temperaturdrift



MIN-Fakultät Department Informatik

4-424 Intelligente Roboter

Kraft-Moment-Sensoren (KMS) (cont.)







KMS mit sechs Freiheitsgraden

 Ein auf ein dehnbares Material applizierter DMS kann die Kraft in eine Richtung messen (siehe: *Hookesches Gesetz*)

- Allgemeine KMS mit sechs Freiheitsgraden:
 - Eine spezielle Anordnung von DMS
 - Messen die Kräfte in alle drei Koordinatenrichtungen (Fx, Fy, Fz)
 - Messen die Drehmomente zu allen drei Koordinatenrichtungen (Mx, My, Mz)





64-424 Intelligente Roboter

Freiheitsgrade

- engl.: degrees of freedom (DOF)
- Translation in Richtung der x-, y- oder z Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- Rotation um y-, x- oder z-Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ► Beschleunigung in oder um die Koordinatenachsen (6 DOF) → KMS z.B. von der Firma JR³ (12-DOF-KMS)



64-424 Intelligente Roboter

Einsatz von KMS







3.3.1 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Aufbau von KMS

Aufbau von KMS





3.3.1 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Aufbau von KMS

MIN-Fakultät Department Informatik

Beispiel: Kraft in x-Richtung





3.3.1 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Aufbau von KMS

MIN-Fakultät Department Informatik



KMS: Signale

Kopplungsfreier Fall, d.h. keine Signale durch Querbelastungen:

Kraft/Moment	DMS
F _x	W_3, W_7
F_y	W_1, W_7
F_z	W_2, W_4, W_6, W_8
M_{\times}	W_4, W_8
M_y	W_2, W_6
M_z	W_1, W_3, W_5, W_7



3.3.2 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Kopplungsmatrix

Kopplungsmatrix



64-424 Intelligente Roboter

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_z \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \\ W_7 \\ W_8 \end{bmatrix}$$



3.3.2 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Kopplungsmatrix



64-424 Intelligente Roboter

Kopplungsmatrix (cont.)

$$\mathcal{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{12} & 0 & 0 & 0 & k_{17} & 0 \\ k_{21} & 0 & 0 & 0 & k_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{32} & 0 & k_{34} & 0 & k_{36} & 0 & k_{38} \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & 0 & k_{48} \\ 0 & k_{52} & 0 & 0 & 0 & k_{56} & 0 & 0 \\ k_{61} & 0 & k_{63} & 0 & k_{65} & 0 & k_{67} & 0 \end{bmatrix}$$



3.3.2 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Kopplungsmatrix

Kopplungsmatrix (cont.)

- Zusammenhang zwischen Signalen der DMS und den Kräften/Momenten über die Kopplungsmatrix K
- ► Vorige Tabelle gilt im kopplungsfreien Fall, in der Realität wirkt sich z.B. eine Kraft in x-Richtung auch auf W₁, W₂, W₅ und W₆ aus
- Reale Kopplungsmatrizen daher komplizierter
- Meist in der Messhardware (z.B. Interface-Karten) integriert und nicht mehr sichtbar





3.3.3 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS-Anwendung in der Robotik

KMS-Anwendung in der Robotik

- ► Überwachte Bewegungen (engl.: *guarded motions*):
 - Bewegung herkömmlich (fest) programmiert
 - ► Überschreiten eines bestimmten Kraftwertes → Abbruch der Bewegung
- ▶ Nachgiebige Bewegungen (engl.: *compliant motions*):
 - Manipulator gibt bei einer äußeren Kraft nach
 - oder: versucht eine bestimmte Kraft aufzubringen
 - erfordert Regelung (PID-, Fuzzy-, Neuro-Regler, o. ä.)



3.3.4 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS-Kalibrierung



64-424 Intelligente Roboter

KMS-Kalibrierung

Kalibrierung bedeutet im wesentlichen Ermittlung

- ▶ des Greifereigengewichtes: *f*_g
 ⇒ orientierungsabhängiger Off-Set in den Kräften
- ► des **Greiferschwerpunktes** : \vec{p}_{COG} (engl.: *center of gravity*) ⇒ orientierungsabhängiger Off-Set in den **Momenten**



3.3.4 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS-Kalibrierung

MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

KMS-Kalibrierung (cont.)





3.3.4 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS-Kalibrierung



KMS-Kalibrierung (cont.)

Probleme in der Praxis:

- KMS rauschen
 - \Rightarrow Messwerte müssen i. d. Regel gefiltert werden
- ► Tragen einer Last erhöht *f*_g und verschiebt *p*_{COG}
 ⇒ Kalibrierung eigentlich nur für den Lastzustand gültig, in dem sie gemacht wurde
- DMS sind temperaturabhängig
 - \Rightarrow Kalibrierung auch temperaturabhängig



3.3.5 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Kraftregelung

MIN-Fakultät Department Informatik



Direkte Kraftregelung

- Kraftmessung wirkt direkt auf Achsmotoren
- Bei kommerziellen Robotern nicht einsetzbar
 - \rightarrow nicht weiter betrachtet



3.3.5 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - Kraftregelung



64-424 Intelligente Roboter

Hybride Kraftregelung

Kraftmessung wirkt mit Umweg über die Positionsregelung auf die Achsmotoren

Probleme:

- Reglermodell berücksichtigt nicht die exakte Situation
- Einstellen der Parameter f
 ür den Positionsregler

Einfache Lösung: lineare hybride Regelung über mehrdimensionales Federgesetz

$$\vec{s} = C^{-1} \cdot \vec{F}$$



3.3.6 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS: Spacemouse

Spacemouse

MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

Quelle: **3D**CONNEXION (www.spacemouse.com)





3.3.6 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS: Spacemouse

Spacemouse (cont.)




3.3.6 Kräfte und Druck - Kraft-Moment-Sensoren (KMS) - KMS: Spacemouse

MIN-Fakultät Department Informatik



64-424 Intelligente Roboter

Spacemouse (cont.)

- alternativ Kraft-Moment-Messung
- flexible Konstruktion
- optische Abtastung

Vorteil:

▶ keine Drift

Nachteile:

- begrenzt linear
- kann schwingen
- Software-Dämpfung



Taktile Sensoren

- Besondere Klasse von Kraft- oder Drucksensoren
- Meistens sehr schmale Sensoren
- Beispiel: Berührungssensoren an Fingerspitzen künstlicher Hände
- Andere Anwendungen: Touch-Screen, Tastaturen, Messung der Belastung der Fußsohle beim Laufen, etc.



Taktile Sensoren (cont.)

Verschiedene Herstellungsmethoden:

- Membran-Schalter
- Piezoelektrische taktile Sensoren
- kraftsensitive Widerstände





64-424 Intelligente Roboter

3.4.1 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Membran-Schalter

Membran-Schalter





3.4.2 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Piezoelektrische Sensoren

64-424 Intelligente Roboter

Piezoelektrische taktile Sensoren

- Aktive oder passive Sensoren aus PVDF (polyvinylidene fluoride)
- Beispiel: aktiver ultraschallgekoppelter Berührungssensor
 - drei Schichten (obere und untere Schicht aus PVDF)
 - untere Schicht wird in Schwingung versetzt
 - mittlere Schicht überträgt Schwingung auf obere Schicht
 - Ausgangssignal der oberen Schicht wird mit Eingangssignal verglichen
 - Druck verändert Ausgangssignal



64-424 Intelligente Roboter



3.4.2 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Piezoelektrische Sensoren

Piezoelektrische taktile Sensoren (cont.)





3.4.2 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Piezoelektrische Sensoren



64-424 Intelligente Roboter

Piezoelektrische taktile Sensoren (cont.)

- Ausgangssignal in begrenztem Bereich linear zur Kraft
- Bei 25 μm PVDF-Filmdicke und 40 μm Gummifilm als zweite Schicht, ist der gesammte Sensor inkl. Schutzschicht schmaler als 200 μm
- Durch mehrere Zellen können ganze Flächen erfasst werden
- Vorteile:
 - einfacher Sensoraufbau
 - ideal zum Messen statischer Kräfte



3.4.3 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Kraftsensitive Widerstände



64-424 Intelligente Robote

Kraftsensitive Widerstände

- Taktile Sensoren können aus einem Material hergestellt werden, das seinen Widerstand abhängig vom aufgebrachten Druck ändert
- engl.: force sensitive resistor (FSR)
- Material: leitende Elastomere oder drucksensitive Tinte
- Leitende Elastomere werden aus Silikon-Gummi oder Polyurethan gefertigt und mit leitenden Partikeln oder Fasern imprägniert

Funktionsweise:

- Verändern der Kontaktfläche zwischen zwei leitenden Platten
- Ändern der Schichtdicke



3.4.3 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Kraftsensitive Widerstände

Kraftsensitive Widerstände (cont.)





3.4.3 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Kraftsensitive Widerstände

MIN-Fakultät Department Informatik

64-424 Intelligente Roboter

Kraftsensitive Widerstände (cont.)





3.4.4 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Hall-Effekt Sensoren

Hall-Effekt Sensoren

 Wenn sich ein Elektron durch ein magnetisches Feld bewegt, so wirkt eine Kraft auf das Elektron

F = qvB

- *q*: Ladung des Elektrons $(1.6 \cdot 10^{-19} C)$
- v: Geschwindigkeit des Elektrons
- B: magnetische Feldstärke
- Es lassen sich z.B. Kompass-Sensoren realisieren





64-424 Intelligente Roboter

3.4.4 Kräfte und Druck - Taktile Sensoren - Hall-Effekt Sensoren

Hall Effekt





[Fra04] Kap. 3.8, 8.6 and 9 In: Jacob Fraden: Handbook of modern sensors: physics, design, and applications. Springer-Verlag New York, Inc., 2004, S. 82–85, 313–319 u. 323–337

[McK93] Kap. 10.5.3, 10.5.4, 10.6.1 and 10.7 In: Phillip John McKerrow:

Introduction to Robotics.

Addison-Wesley, 1993, (Electronic Systems Engineering Series), S. 567–580 and 595–596