

# Einführung in die Robotik

**Jianwei Zhang**  
zhang@informatik.uni-hamburg.de

**T|A**  
**M|S**  
Universität Hamburg  
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
Department Informatik  
Technische Aspekte Multimodaler Systeme

16. Juni 2009

## Gliederung

- Allgemeine Informationen
- Einführung
- Koordinaten eines Manipulators
- Kinematik-Gleichungen
- Kinematik-Gleichungen
- Inverse Kinematik von Manipulatoren
- Differentielle Bewegungen mit homogenen Transformationen
- Jacobi-Matrix eines Manipulators
- Aufgabenbeschreibung
- Robotergrammierung auf drei Ebenen
- Trajektoriegenerierung
- Trajektoriegenerierung
- Einführung in RCCL

## Gliederung (cont.)

### Dynamik

### Roboterregelung

- Klassifikation der Regelung von Roboterarmen
- Gelenkregler des PUMA-Roboters
- Interne Sensorik von Robotern
- Regelungssystem eines Roboters
- Lineare Regelung für Trajektorienverfolgung
- Modellbasierte Regelung für Trajektorienverfolgung
- Regelung im Kartesischen Raum
- Hybride Regelung der Kraft und Position

### Programmierung auf Aufgabenebene und Bahnplanung

- Grundlage zur Programmierung auf Aufgabenebene
- Objekt-Darstellung

## Gliederung (cont.)

### Motivation der Bahnplanung

- Bewegungsplanung
- Konfiguration eines Artefaktes
- Planung geometrischer Bahnen
- Sichtbarkeitsgraph
- Tangentengraph
- Voronoi-Diagramm
- Heuristische Suche

- Programmierung auf Aufgabenebene und Bahnplanung
- Programmierung auf Aufgabenebene und Bahnplanung
- Architekturen sensorbasierter intelligenter Systeme
- Aus- und Rückblick

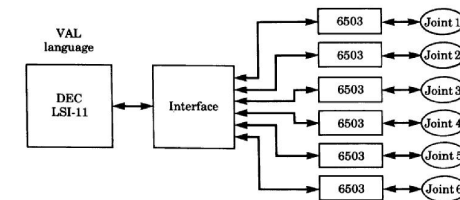
## Klassifikation der Regelung von Roboterarmen

Als reines Problem der Trajektorie-Verfolgung:

- ▶ Regelung im Gelenkraum: PID, plus modellbasierte.
- ▶ Regelung im Kartesischen Raum: Gelenk-basierend, über Kinematik-Berechnung oder über inverse Jacobi-Berechnung.
- ▶ Adaptive Regelung: modell-bezogene adaptive Regelung, selbst-tunend.

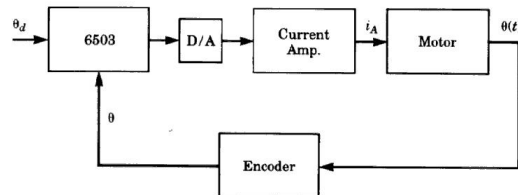
Hybride Regelung von Kraft und Position: (aktuelles Forschungsthema)

## Architektur des Regelungssystems von PUMA-Robotern - I



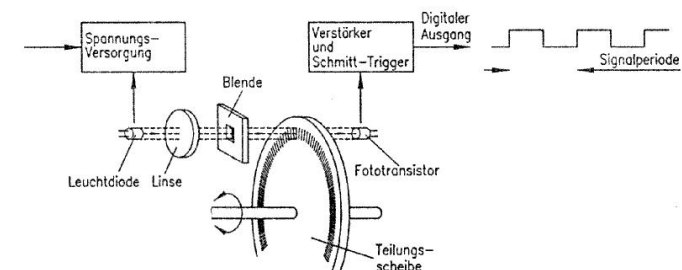
- ▶ Das gesamte System ist eine Hierarchie mit zwei Ebenen.
- ▶ Der DEC LSI-11 Rechner schickt alle 28ms neue Gelenk-Werte zur Regler-Interface.
- ▶ Die zu überwindende Distanz wird in 32 (möglich auch in  $2^3 = 8, 2^4 = 16, 2^6 = 64, \dots$ ) Inkremente gleichmässig zerlegt und sie werden zum Gelenkregler weiter geschickt.

## Gelenkregler des PUMA-Roboters



- ▶ Die Gelenkregelung arbeitet dann in 0.875 ms Takt.
- ▶ Encoder werden als Positionssensor eingesetzt.
- ▶ Potentiometer werden für grobe Positionsschätzung benutzt (nur PUMA-560).
- ▶ Kein Tachometer vorhanden. Gelenkgeschwindigkeit wird über die Differenzierung der Gelenkpositionen geschätzt.

## Optische Encoder in einem Roboter



- ▶ Ein optischer Leser liest die Linien.
- ▶ Die Scheibe dreht sich wenn der Gelenkmotor sich bewegt (mit einem Verhältnis 1:1 am Beispiel des PUMA-Roboters. Über Getriebe ist die Genauigkeit ca. 0.0001 Rad/Bit).
- ▶ Eine spezielle Linie wird als "Null-Anzeige" markiert.

## Interne Sensorik von Robotern

Die Sensoren befinden sich im Roboter und erfassen den internen Zustand des Roboters, u.a. die aktuelle Position und Geschwindigkeit jedes Gelenkes.

### Positionsmesssysteme:

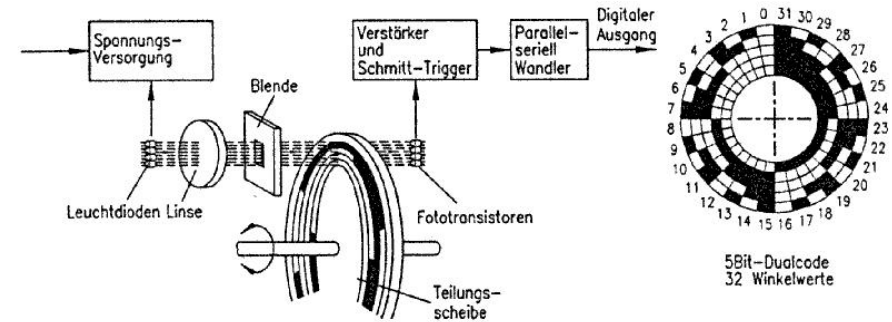
Potentiometer,  
Drehimpulsgeber (Encoder),  
Winkelcodier,  
Resolver, ...

### Geschwindigkeitsmessung:

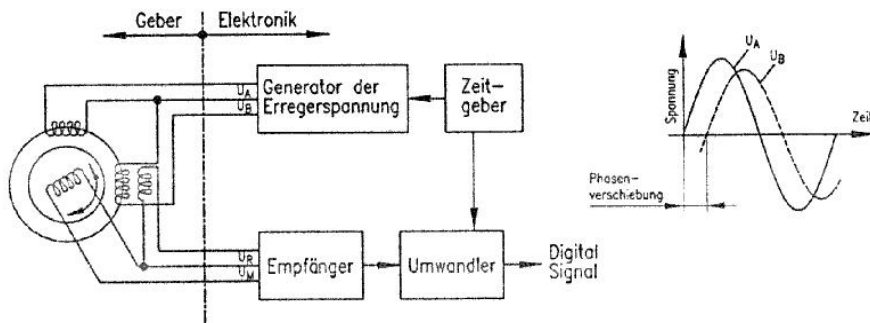
Für die direkte Geschwindigkeitsmessung an rotatorischen Gelenken werden häufig sogenannte Tachometer eingesetzt.

Indirekt lassen sich Geschwindigkeiten auch mit Positionsinformationen bestimmen.

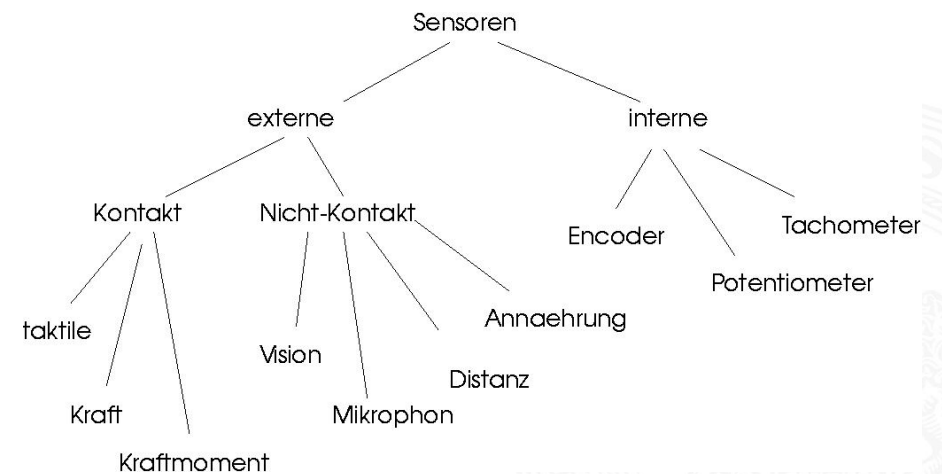
## Arbeitsprinzip eines Winkelgebers



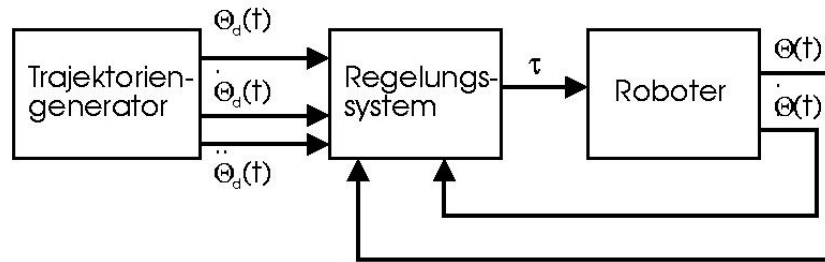
## Arbeitsprinzip eines Resolvers (Drehmelders)



## Sensoren: Klassifikationshierarchie



## Regelungssystem eines Roboters



## Regelungssystem eines Roboters

*Führungsgröße:*

$$\Theta_d(t),$$

$$\dot{\Theta}_d(t),$$

$$\ddot{\Theta}_d(t).$$

*Fehlergröße:*

$$E = \Theta_d - \Theta, \dot{E} = \dot{\Theta}_d - \dot{\Theta}$$

*Ausgangsgröße:*

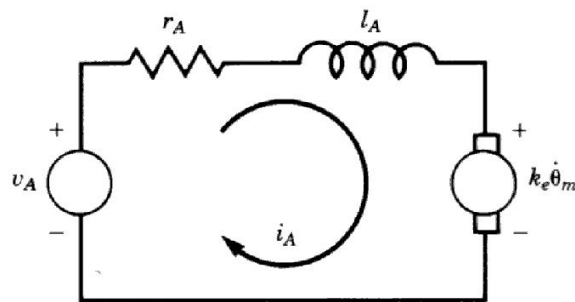
$$\Theta(t),$$

$$\dot{\Theta}(t).$$

*Stellgröße:*

$$\tau.$$

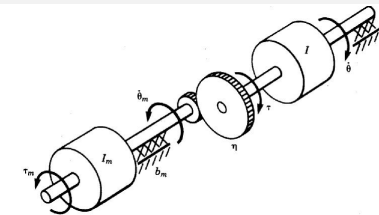
## Schaltung eines DC-Motors



Die Schaltung läßt sich mit einer differenziellen Gleichung erster Ordnung beschreiben:

$$l_A \dot{i}_A + r_A i_A = v_A - k_e \dot{\theta}_m$$

## Verbindung eines Motors mit einem Gelenk



Sei das Übersetzungsverhältnis  $\eta$ , dann gilt:

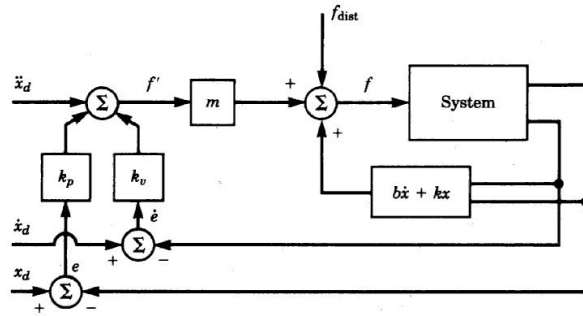
$$\tau_m = (I_m + I/\eta^2)\ddot{\theta}_m + (b_m + b/\eta^2)\dot{\theta}_m$$

wobei  $\tau_m = k_m i_a$ ,  $I_m$  und  $I$  jeweils die Massenträgheit des Motor-Drehzylinders und der Last ist, und  $b_m$  und  $b$  die Reibungsfaktoren sind.

Darstellung mit Gelenkvariablen:

$$\tau = (I_m + \eta^2 I_m)\ddot{\theta} + (b_m + \eta^2 b_m)\dot{\theta}$$

## Lineare Regelung für Trajektorienverfolgung



$$f' = \ddot{x}_d + k_v \dot{e} + k_p e + k_i \int e dt \quad (26)$$

(26) wird als das Gesetz der PID-Regelung bezeichnet.

## P-, I- und D-Regler

**P-Regler** (Proportionalregler):

$\tau(t) = k_p \cdot e(t)$ . Der Verstärkungsfaktor  $k_p$  bestimmt die Empfindlichkeit.

**I-Regler** (Integrator):

$\tau(t) = k_i \cdot \int_{t_0}^t e(t') dt'$ . Langanhaltende Fehler werden dadurch aufsummiert.

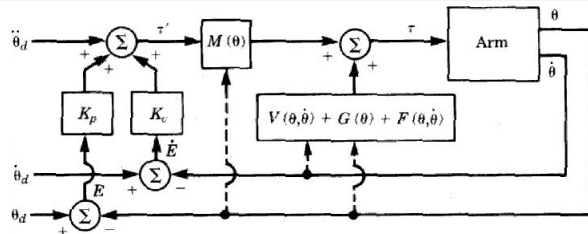
**D-Regler** (Differentialtor):

$\tau(t) = k_v \cdot \dot{e}(t)$ . Dieser Regler zeigt eine empfindliche Reaktion auf zeitliche Änderungen der Regelabweichung.

Kombination  $\Rightarrow$  PID-Regler:

$$\tau(t) = k_p \cdot e(t) + k_v \cdot \dot{e}(t) + k_i \int_{t_0}^t e(t') dt'$$

## Modellbasierte Regelung für Trajektorienverfolgung



Die dynamische Gleichung:

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta}) + G(\Theta)$$

wobei  $M(\Theta)$  die lageabhängige  $n \times n$ -Massenmatrix eines Manipulators ist,  $V(\Theta, \dot{\Theta})$  ein  $n \times 1$ -Vektor der Zentripetal- und Coriolis-Terme ist, und  $G(\Theta)$  eine komplizierte Funktion von  $\Theta$ , die Position aller Gelenke des Manipulators, ist.

## Wie regelt man Roboter besser?

*Forschung:*

Modell-basierte Regelung,  
adaptive Regelung

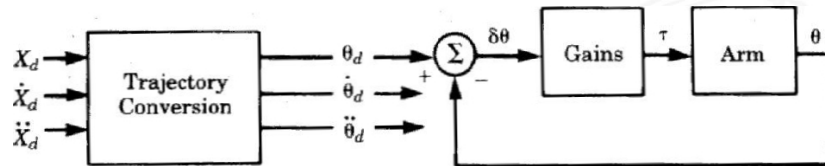
*Regelungssysteme der Industrieroboter:*

PID-Regelung + Schwerkraft-Kompensation:

$$\tau = \dot{\Theta}_d + K_v \dot{E} + K_p E + K_i \int E dt + \hat{G}(\Theta)$$

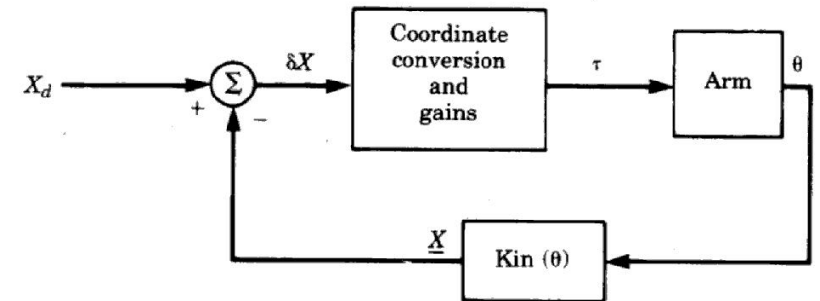
## Regelung im Kartesischen Raum - Verfahren I

Gelenk-basierte Regelung mit Kartesischen Bahneingängen:



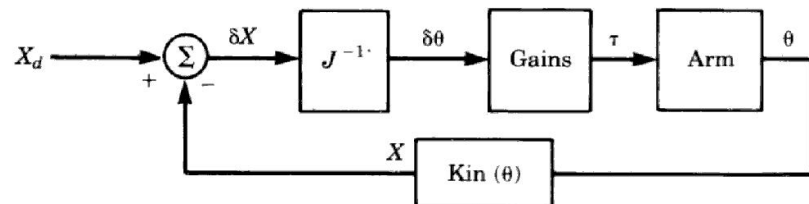
## Regelung im Kartesischen Raum - Verfahren II

Kartesische Regelung über Kinematik-Berechnung:



## Regelung im Kartesischen Raum - Verfahren III

Kartesische Regelung über inverse Jacobi-Berechnung:

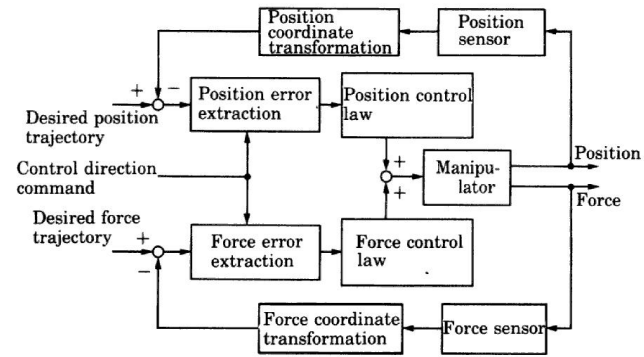


## Hybride Regelung der Kraft und Position

Bei manchen Aufgaben müssen sowohl Position als auch Kraft auf dem Endeffektor geregelt werden: *Montage, Abschleifen, Tür-Öffnen und Schließen, Kurbel-Drehung ...*

## Hybride Regelung der Kraft und Position

Ein Verfahren zur Kraftregelung:



Zwei Rückkopplungsschleife für separate Regelung von Position und Kraft.