

Vorlesung: Angewandte Sensorik

Prof. J. Zhang
zhang@informatik.uni-hamburg.de

Universität Hamburg
Fachbereich Informatik

AB Technische Aspekte Multimodaler Systeme
23. December 2005

Inhaltsverzeichnis

Tsai's RAC-basierte Kamerakalibrierung337
Schnelle RAC-basierte Kalibrierung350
Implizite Kamerakalibrierung355
Beispiel: Bestimmung einer Zeigerichtung358
Handkamera-Kalibrierung367
Visuell geregeltes Greifen372

Tsai's RAC-basierte Kamerakalibrierung

- Annahme C_x, C_y und μ sind bekannt.
- Ziel ist die Ermittlung der extrinsischen Parameter R und t sowie der intrinsischen Parameter f_x, f_y und k .
- Für die Kalibrierung wird eine Menge **koplanarer** Kalibrationspunkte verwendet werden.
- Die Kalibrierung beinhaltet zwei Schritte:
 1. Ermitteln der Rotationsmatrix R und der Komponenten t_x und t_y des Translationsvektors.
 2. Schätzung der übrigen Parameter aufgrund der Ergebnisse des ersten Schrittes.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

1. Berechnung der Bildkoordinaten (X_i, Y_i)

Sei N die Anzahl der Bildpunkte. Dann gilt für $i = 1, 2, \dots, N$

$$\begin{aligned} X_i &= X_{f_x i} - C_x \\ Y_i &= Y_{f_y i} - C_y \end{aligned}$$

wobei $X_{f_x i}$ und $Y_{f_y i}$ die Pixelwerte im Rechner sind.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

2. Bestimmung der Zwischenparameter $\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$

- Da RAC unabhängig vom k und f ist, können R , t_x und t_y berechnet werden.
- Wir definieren

$$\{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\} \equiv \{r_1 t_y^{-1}, r_2 t_y^{-1}, t_x t_y^{-1}, r_4 t_y^{-1}, r_5 t_y^{-1}\}$$

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

- Wenn man für den i -ten Kalibrationspunkt beide Seiten der RAC-Gleichung durch t_y teilt und den entstehenden Ausdruck umarrangiert, erhält man:

$$\begin{bmatrix} x_{w,i} Y_i & y_{w,i} Y_i & Y_i & -x_{w,i} \mu X_i & -y_{w,i} \mu X_i \end{bmatrix} = \mu X_i \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \\ v_5 \end{bmatrix}$$

wobei $x_{w,i}$ und $y_{w,i}$ die x und y Koordinaten des i -ten Kalibrationspunktes sind.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

- Die minimale Anzahl an notwendigen nicht kollinearen Kalibrationspunkten ist $N = 5$.
- In der Praxis sollte $N > 5$ gewählt werden.
- **Bemerkung:** Falls $t_y = 0$ kann obige Gleichung auch in Abhängigkeit von t_x formuliert werden.
- Erhält man $t_x = t_y = 0$, so ist der gewählte Kameraaufbau in geeigneter Form abzuändern.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

3. Berechnung von R , t_x und t_y

- Definiere $C \equiv \begin{bmatrix} v_1 & v_2 \\ v_4 & v_5 \end{bmatrix}$.
- Wenn keine Zeile oder Spalte zu null wird, gilt:

$$t_y^2 = \frac{S_r - \sqrt{S_r^2 - 4(v_1 v_5 - v_4 v_2)^2}}{2(v_1 v_5 - v_4 v_2)}$$

$$\text{mit } S_r \equiv v_1^2 + v_2^2 + v_4^2 + v_5^2$$

- Andernfalls gilt

$$t_y^2 = (v_i^2 + v_j^2)^{-1}$$

wobei v_i und v_j die Elemente aus C sind, die nicht null sind.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

- Physikalisch sollten die Vorzeichen von x und X sowie y und Y gleich sein.
- Dies wird genutzt, um das Vorzeichen von t_y zu bestimmen.
- Annahme: $t_y > 0$
- Berechnung von

$$\begin{aligned} r_1 &= v_1 t_y \\ r_2 &= v_2 t_y \\ r_4 &= v_4 t_y \\ r_5 &= v_5 t_y \\ t_x &= v_3 t_y \end{aligned}$$

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

- Mit einem beliebigen Kalibrationspunkt lassen sich die folgenden Koordinaten bestimmen:

$$\begin{aligned} x &= r_1 x_w + r_2 y_w + t_x \\ y &= r_4 x_w + r_5 y_w + t_y \end{aligned}$$

- Gilt $sign(x) = sign(X)$ und $sign(y) = sign(Y)$, dann gilt die Annahme $sign(t_y) = 1$ und wir behalten r_1, r_2, r_4, r_5 und t_x .
- Andernfalls setzen wir $sign(t_y) = -1$ und drehen die Vorzeichen von r_1, r_2, r_4, r_5 und t_y entsprechend um.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

- Es gibt zwei mögliche Lösungen für die Rotationsmatrix R , wenn eine 2×2 -Teilmatrix bekannt ist.
- Diese Lösungen sind f_x mit positivem und mit negativem Vorzeichen.
- R kann wie folgt berechnet werden:

$$\begin{aligned} r_3 &= \pm(1 - r_1^2 - r_2^2)^{1/2} \\ r_6 &= \mp sign(r_1 r_4 + r_2 r_5)(1 - r_4^2 - r_5^2)^{1/2} \\ [r_7 \ r_8 \ r_9]^T &= [r_1 \ r_2 \ r_3]^T \times [r_4 \ r_5 \ r_6]^T \end{aligned}$$

- Eine der beiden Lösungen führt zu einem positiven f_x in Schritt 2.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 1

Anmerkungen:

- Die sich ergebende Matrix R ist möglicherweise nicht orthonormal.
- Es müssen daher noch Orthonormalisierungsschritte durchgeführt werden, die hier nicht weiter erläutert werden.

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 2

Bestimmung der Parameter t_z, k, f_x und f_y

- Wenn R_i, t_x und t_y bekannt sind, können die übrigen Parameter mit folgender Gleichung für den i -ten Kalibrationspunkt bestimmt werden:

$$\begin{bmatrix} -X_i & x_i & -x_i r_i^2 \\ f_x \\ k f_x \end{bmatrix} = X_i w_i$$

mit

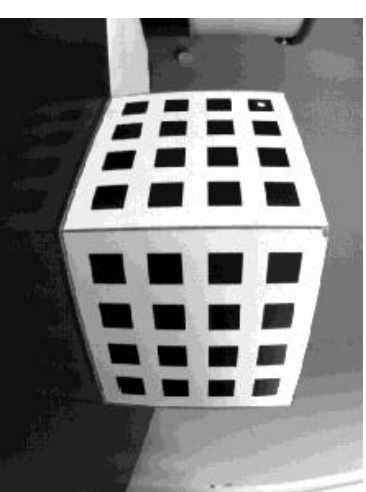
$$\begin{aligned} x_i &\equiv r_1 x_{w,i} + r_2 y_{w,i} + t_x \\ w_i &\equiv r_7 x_{w,i} + r_8 y_{w,i} \end{aligned}$$

Kamerakalibrierung nach Tsai: Schritt 2

- Immer wenn mehr als drei Kalibrationspunkte benutzt werden, entsteht ein überbestimmtes Gleichungssystem.
- Die Lösung mit Hilfe des *least-squares*-Verfahrens liefert k, t_z und f_x .
- Mit f_x lassen sich die übrigen Parameter errechnen:

$$\begin{aligned} f_y &= f_x \mu \\ k &= (k f_x) f_x^{-1} \end{aligned}$$

3D-Kalibrierungsaufbau



Typischer 3D-Kalibrierungsaufbau.

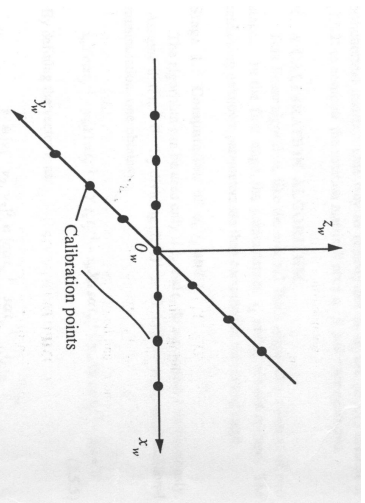
Schnelle RAC-basierte Kalibrierung (1)

- Wenn für den erste Schritt des Tsai-Algorithmus nur Kalibrationspunkte auf der x - und y -Achse des Weltkoordinatensystems verwendet werden, vereinfacht sich die RAC-Gleichung:
- Üblicherweise: Die mittlere Reihe und mittlere Spalte einer typischen Kalibrationsplatte definieren dann die x_w - und y_w -Achse.
- Beim Tsai-Algorithmus wird das *linear-least-squares*-Verfahren in Schritt eins auf fünf, in Schritt zwei auf drei Variablen angewandt.
- Mit obiger Vereinfachung muss das *least-squares*-Verfahren dreimal für zwei Variablen angewandt werden.
- Da es hierfür eine geschlossene Lösung gibt, reduziert sich die für die Kalibrierung notwendige Rechenzeit signifikant.

Schnelle RAC-basierte Kalibrierung (2)

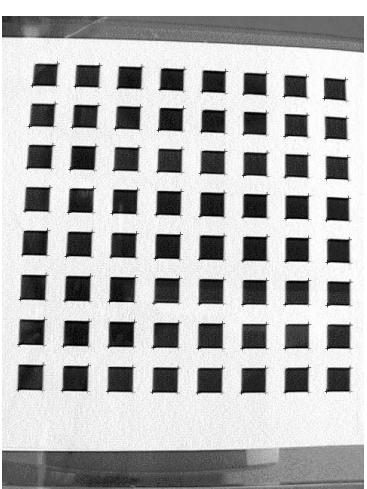
- Voraussetzung für die schnelle Variante des Tsai-Algorithmus ist, dass μ sowie C_x und C_y *a priori* bekannt sind.
- Wie bei Tsai's Kalibrierung sind zwei Schritte notwendig:
 - ◆ Verwendung von Kalibrationspunkten auf der x_w - und y_w -Achse und einer vereinfachten RAC-Gleichung, um R_x , t_x und t_y zu bestimmen.
 - ◆ Bestimmung der übrigen Parameter mit allen sichtbaren Kalibrationspunkten.

Schnelle RAC-basierte Kalibrierung (3)



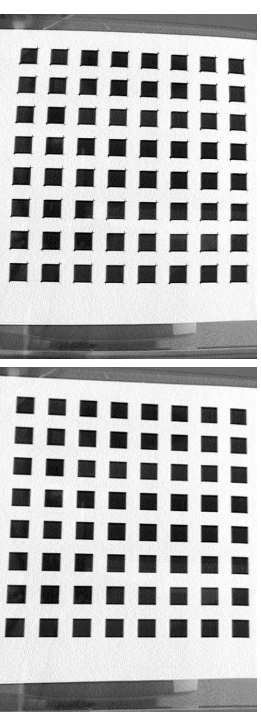
Kalibrationspunkte für die erste Phase der schnellen RAC-basierten Kalibrierung.

Schnelle RAC-basierte Kalibrierung (4)



Typische Kalibrationsplatte.

Schnelle RAC-basierte Kalibrierung (5)



Mit einer kalibrierten Kamera lässt sich das Bild entzerren.

Implizite Kamerakalibrierung (1)

- Die *implizite Kamerakalibrierung* berücksichtigt alle Linsenverzeichnungen (Gesamtmodell).
- Wie bei der Kalibrierung ohne Linsenverzeichnung werden die Parameter nicht explizit bestimmt.
- **Notation:**

$$\begin{array}{ll} (u^i, v^i) & \text{Pixelkoordinaten im Bild} \\ (x_i, y_i) & \text{Weltkoordinaten von Punkt } P \text{ auf Ebene } \pi_i \end{array}$$

Implizite Kamerakalibrierung (2)

- Projektion vom Pixel- auf das Weltkoordinatensystem auf eine Ebene π_1 ergibt sich aus dem Gesamtmodell wie folgt:

$$X_1 = \frac{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} a_{ij}^{(1)} u_1^i v_1^j}{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} a_{ij}^{(3)} u_1^i v_1^j}$$

$$Y_1 = \frac{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} a_{ij}^{(2)} u_1^i v_1^j}{\sum_{0 \leq i+j \leq 3} a_{ij}^{(3)} u_1^i v_1^j}$$

wobei $a_{ij}^{(k)}$ die Transformationskoeffizienten sind.

Implizite Kamerakalibrierung (3)

- Mit Hilfe zweier Kalibrationsebenen π_1 und π_2 können die Transformationskoeffizienten zu den beiden Ebenen bestimmt werden.
- Somit ist jeder Bildpunkt auf zwei Ebenen projizierbar.
- Die wirkliche Koordinate liegt auf der Verbindungsgeraden durch die beiden Punkte.

Bestimmung einer Zeigerichtung: Motivation

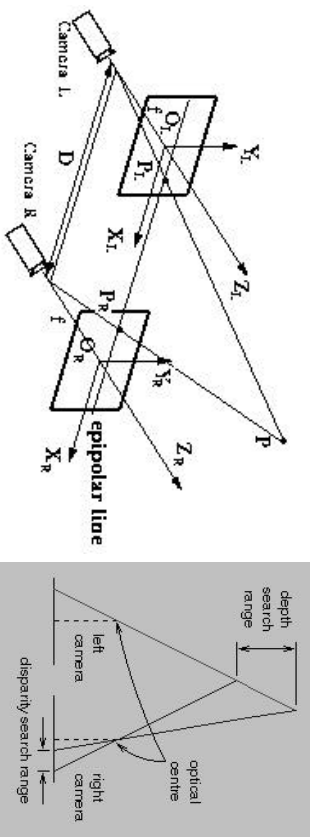
Motivation:

- Die Erkennung von Handgesten kann im Rahmen der Mensch-Maschine-Kommunikation genutzt werden.
- Anwendungen im Bereich der virtuellen Realität, von Multimedia oder Roboter-Instruktion und -Teleoperation.

Lösungen:

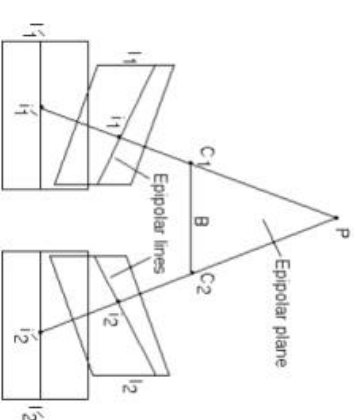
- Sensoren an der Hand (z.B. Daten-Handschuh)
- Stereo-Vision (kalibriert)
- Stereo-Vision (unkalibriert)

Bestimmung einer Zeigerichtung: Stereo-Vision



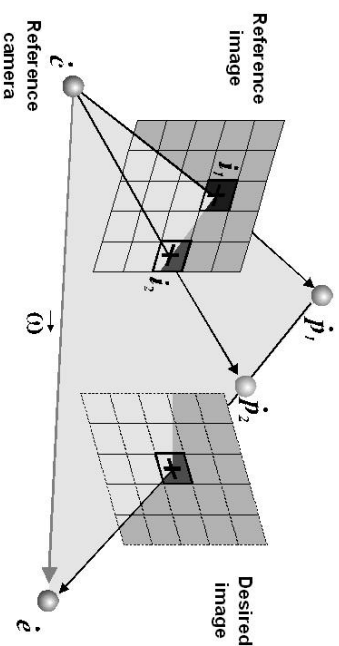
Prinzipieller Stereoaufbau mit parallelen optischen Achsen

Bestimmung einer Zeigerichtung: Epipolarlinien



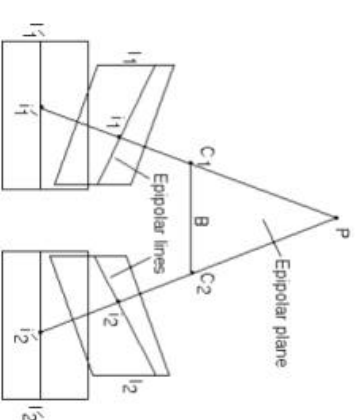
Bei parallelen optischen Achsen sind die Epipolarlinien horizontale Linien.

Bestimmung einer Zeigerichtung: Epipolarlinien



Der mit einem Punkt aus Bild 1 korrespondierende Punkt kann auf der zugehörigen Epipolarlinie in Bild 2 gefunden werden.

Bestimmung einer Zeigerichtung: Epipolarlinien



Bei parallelen optischen Achsen sind die Epipolarlinien horizontale Linien.

Unkalibrierte Stereo-Vision (1)

- Cipolla et. al. (1994) präsentieren eine unkalibriertes Stereo-System zur Erkennung von Zeigegesten.
- **Annahme:** Lochkameramodell mit Blick auf eine Ebene.
- Die Beziehung zwischen Ebenenkoordinatensystem (X, Y) und Bildkoordinatensystem (u, v) lautet:

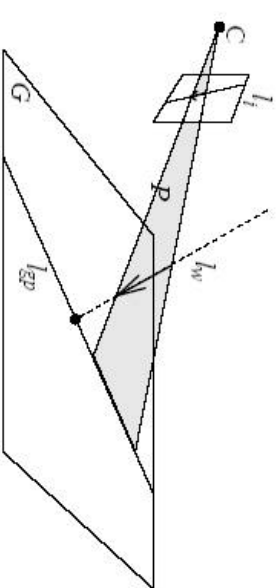
$$\begin{bmatrix} su \\ sv \\ s \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

wobei $T_{3 \times 3}$ eine homogene Matrix mit $t_{33} = 1$ ist.

Unkalibrierte Stereo-Vision (2)

- Um T zu bestimmen müssen mindestens vier Punkte beobachtet werden.
- Man definiert die Grenzen der Arbeitsebene mit $(0, 0), (0, 1), (1, 0)$ und $(1, 1)$.
- Für die beiden Kameras werden die Transformationen T und T' bestimmt.

Bestimmung des Zeigepunktes (2)



Bestimmung des Zeigepunktes (1)

Notation:

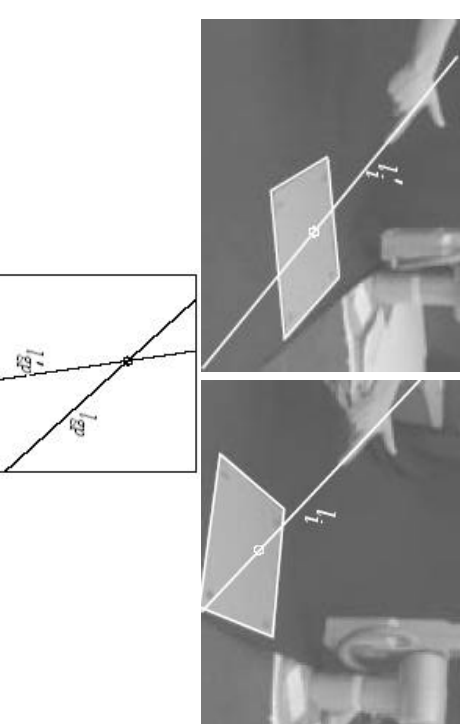
- l_w : Längsachse des Zeigers in der Welt
- l_i : Projektion von l_w auf die Bildebene
- l_{gp} : Projektion von l_w auf Ebene G

Verfahren:

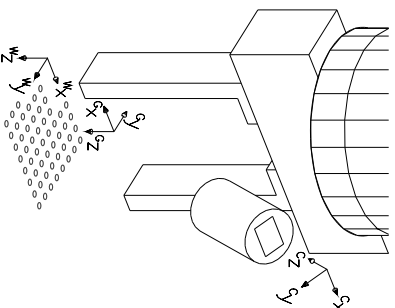
- Mit dem Bild der zweiten Kamera erhält man eine Projektion l'_{gp} deren Schnittpunkt mit l_{gp} der Zeigepunkt ist.
- l_i ist das Bild von l_{gp} , d.h. $l_i = T^T l_{gp}$.
- Daraus folgt

$$l_{gp} = T^{-1} l_i \quad \text{und} \quad l'_{gp} = T'^{-1} l'_i$$

Bestimmung des Zeigepunktes (3)



Handkamera-Kalibrierung (1)



Kamera-, Greifer- und Weltkoordinatensystem

Handkamera-Kalibrierung (2)

Aufgabe:

Bestimmung der festen räumlichen Relation zwischen Kamera- (C) und Greiferkoordinatensystem (G) repräsentiert durch die homogene Transformation ${}^C H_G$.

Idee:

Direkte Bestimmung von ${}^C H_G$ über modellbasierte Lokalisation sichtbarer Greifermerkmale.

Handkamera-Kalibrierung (3)

Lösung:

- Positionierung des Greifers auf einem planaren Kalibrierungsobjekt mit mehreren Meßpunkten.
- Greifer- und Weltkoordinatensystem fallen zusammen (*Ebenenkoinzidenz*).
- Ebenenkoinzidenz ermöglicht Problemkomposition:

$${}^C H_G = {}^C H_W H_G$$

Handkamera-Kalibrierung (4)

Vorgehensweise:

1. Bestimmung der internen und externen Kameraparameter mittels Kalibrierungsobjekt $\Rightarrow {}^C H_W$
2. Bestimmung der Parameter der 2D-Transformation ${}^W H_G$ mittels der sichtbaren Greifermerkmale.

Handkamera-Kalibrierung (5)

Vorteile der „Selbstsichtbarkeit“:

- „Selbstsichtbarkeit“ ermöglicht Kalibrierung der Konfiguration ohne Testbewegungen des Manipulators im Gegensatz zu klassischen Verfahren.
- Zwei punktförmige Greifermerkmale für Bestimmung von ${}^C H_G$ ausreichend, Lösung in geschlossener Form.
- Online-Überwachung der relativen Position zwischen Greifer und Objekt.
- Höhere Akkuratheit der Offline-Kalibrierung durch Ausschluß kinematischer Fehler.
- Höhere Robustheit durch mögliche Online-Kalibrierung.

Prof. J. Zhang

Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 371

23. December 2005

Visuell geregeltes Greifen (1)

Aufgabe:

2D-Feinpositionierung einer Roboterhand oder eines Greifers bezüglich des zu greifenden Objektes.

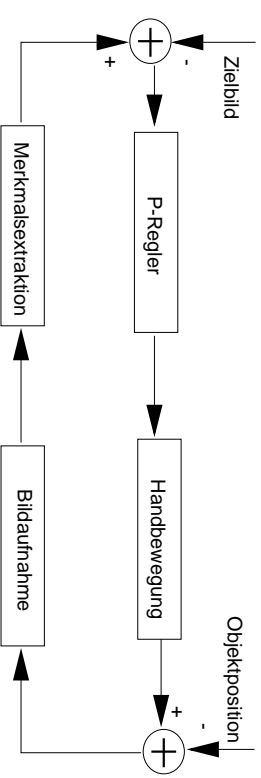
Verfahren:

1. Offline-Vorgabe der Ziellage (z.B. Objektmerkmale aus Stereo-Bildverarbeitung)
2. Online Transformation der aktuellen Differenz zur Zielvorgabe (z.B. mit Handkamera)

Prof. J. Zhang
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 372
23. December 2005

Visuell geregeltes Greifen (2)



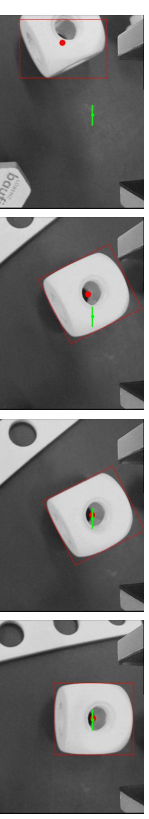
Prof. J. Zhang

Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 373

23. December 2005

Visuell geregeltes Greifen (3)



Prof. J. Zhang
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 374
23. December 2005

Literatur

Prof. J. Zhang
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 375
23. Dezember 2005