

Transformationen (1)

Darstellung von Informationen und Modellen

- Position von Objekten in der Umwelt
- Beschreibung der eigenen Position
- Umweltmodell, Weltmodell

- Position und Orientierung von Sensoren
- räumlicher Bezug von Sensorinformationen
- gleiche Darstellungsbasis von Sensorinformationen

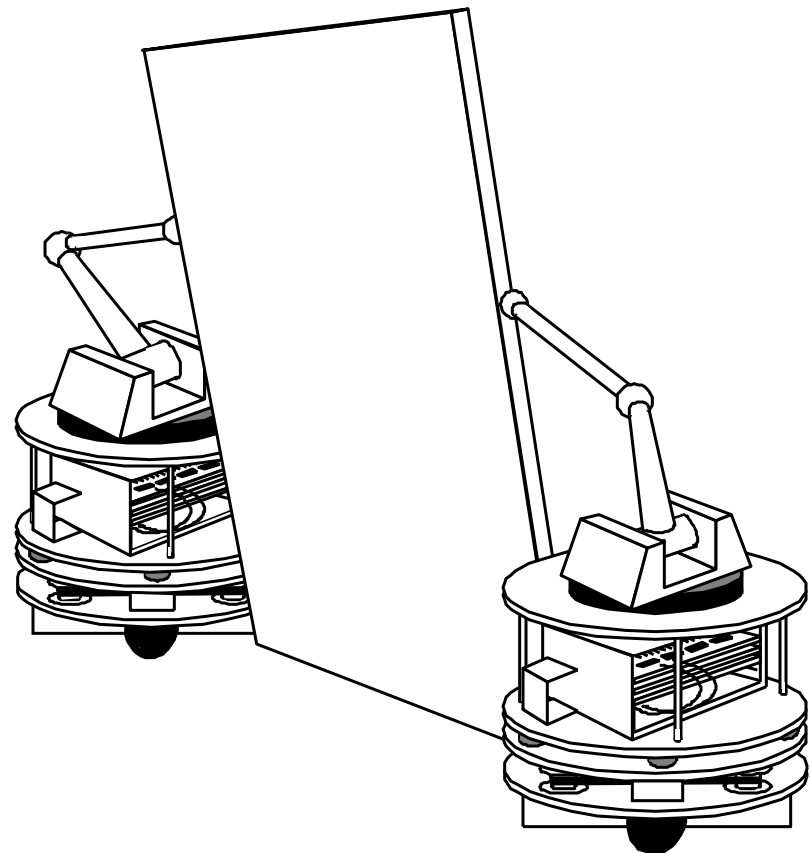
- Modellierung der eigenen geometrischen Eigenschaften
- Beschreibung der eigenen Bewegungen
- Ableitung von Einzelbewegungen von Aktoren

- Austausch von koordinatenbasierten Informationen nur bei Darstellung im gleichen Koordinatensystem aller Partner möglich

Transformationen (2)

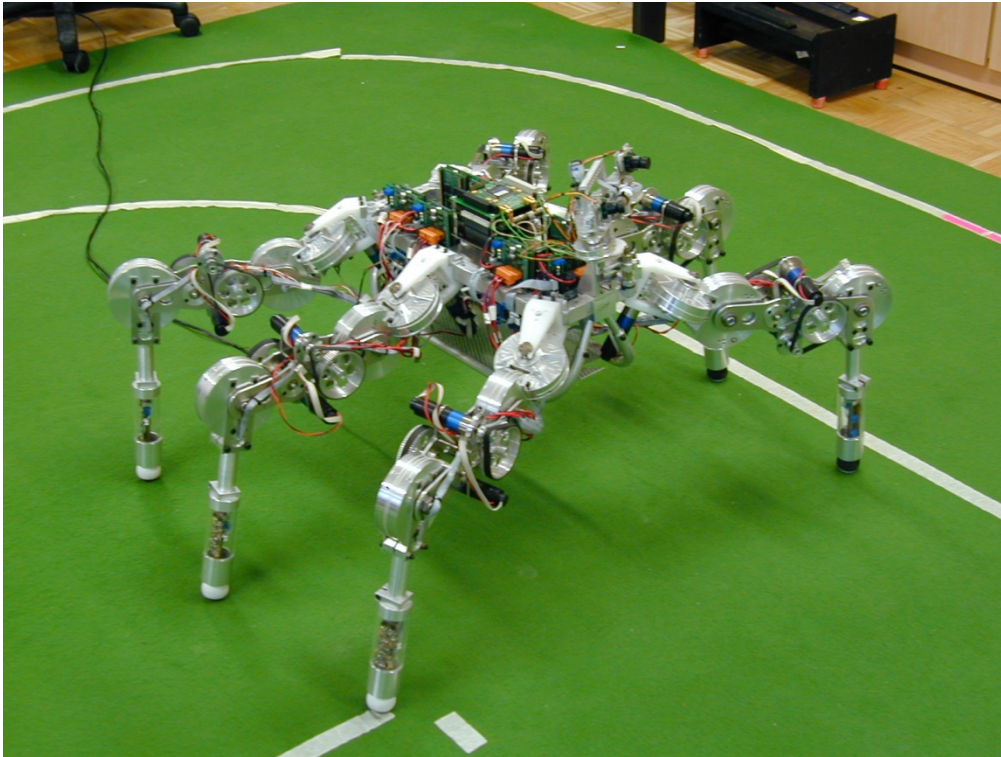
Beispiel: mehrere Roboter tragen ein Objekt

- Position der Roboter
- Konfiguration der Manipulatoren
- Gemeinsame Bewegung der Greifer und des Objektes



Transformationen (3)

Beispiel: kooperierende Teilsysteme eines Roboters



Transformationen (4)

Verwendung von Koordinatensystemen

- Definition von Koordinatensystemen
- Beschreibung der Beziehungen der Koordinatensysteme zueinander
- Überführung von Informationen aus einem Koordinatensystem in ein anderes
 - Transformationen
- bei mechanisch gekoppelten Teilsystemen:
 - Kinematik

- Beispiel: Überführung von lokalen Sensorinformationen in eine Darstellung innerhalb eines Weltmodells

Transformationen (5)

Koordinatensysteme, allgemein

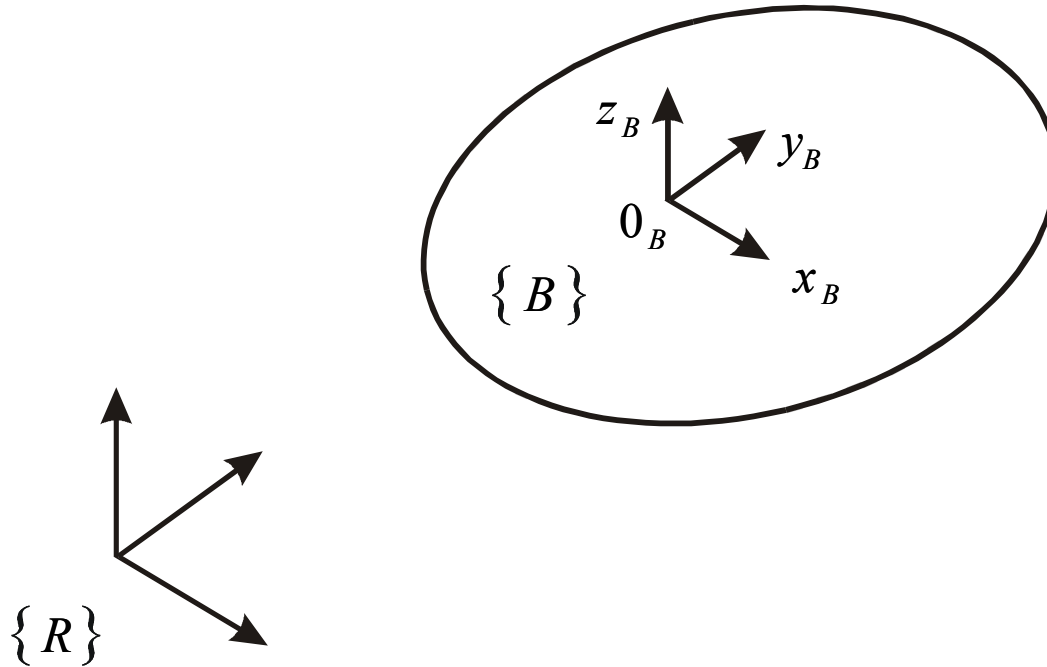
- kartesische Koordinatensysteme
 - orthonormiert, d.h. Achsen stehen senkrecht aufeinander, Achseneinheiten sind normiert
- Verwendung rechtsdrehender Koordinatensysteme
 - „Rechte-Hand-Regel

Koordinatensysteme bei Robotern

- Körperkoordinatensystem (allgemein)
 - Koordinatensystem, dessen Ursprung mit dem betreffenden Körper fest verbunden ist, z.B. dem Roboterkörper
- Bezugskordinatensystem
 - fixiertes Koordinatensystem, das zur Beschreibung der Bewegung von körperfesten Koordinatensystemen dient

Transformationen (6)

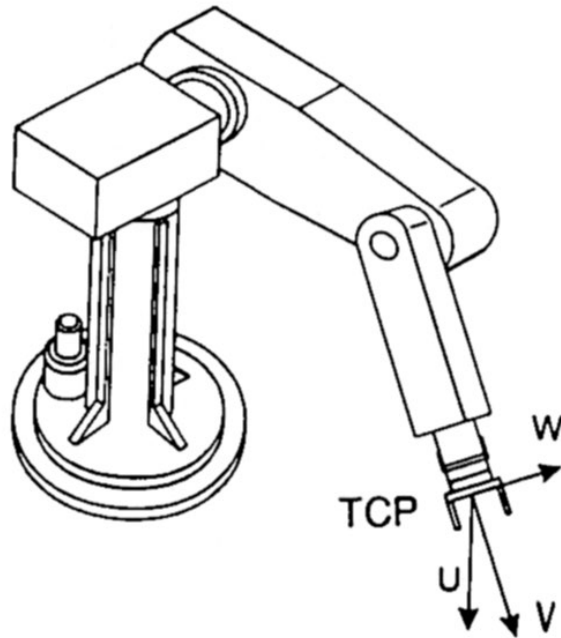
Koordinatensysteme



Körperkoordinatensystem und Bezugskordinatensystem

Transformationen (7)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter

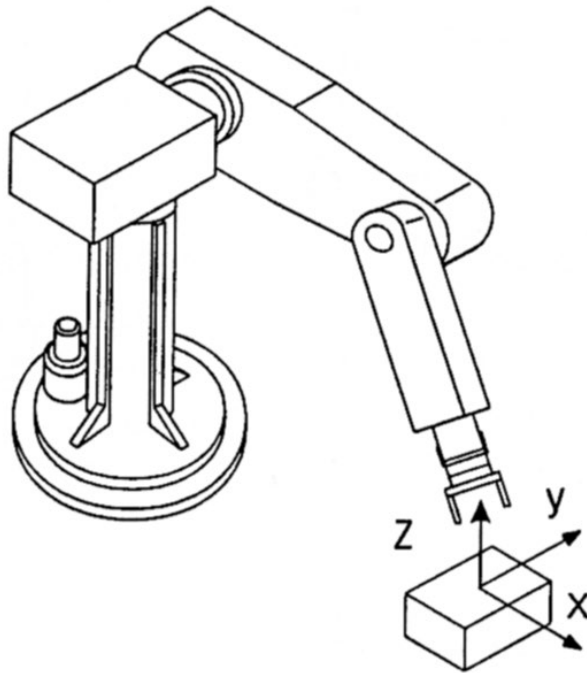


Effektor- und Sensorkoordinatensysteme

- Beschreibung von Sensorinformationen mit räumlichen Bezug auf den Sensor
- Beschreibung von Position und Orientierung von Objekten mit Bezug auf den Effektor

Transformationen (8)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter

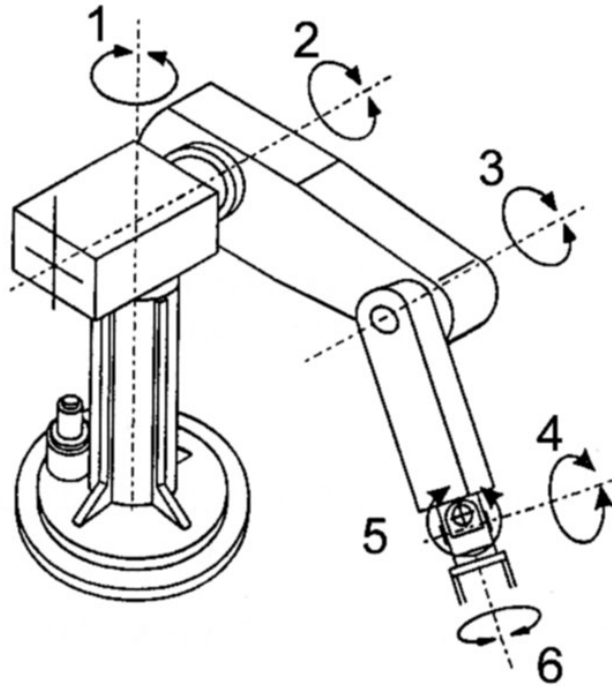


Bezug auf externe Objekte

- Beschreibung von Objekten in der Umwelt des Roboters in ihren Koordinatensystemen

Transformationen (9)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter



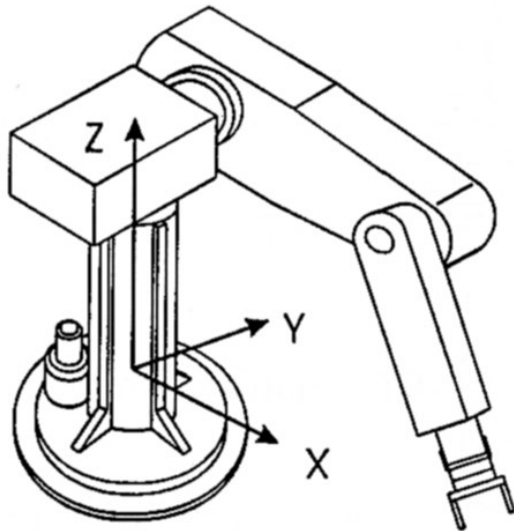
Bezug auf Drehachsen

Koordinatensysteme von Teileinheiten / Teilsystemen

- z.B. Manipulatorkoordinatensystem, Beinkoordinatensystem
- Bezugskordinatensystem für die jeweiligen Teilsysteme

Transformationen (10)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter

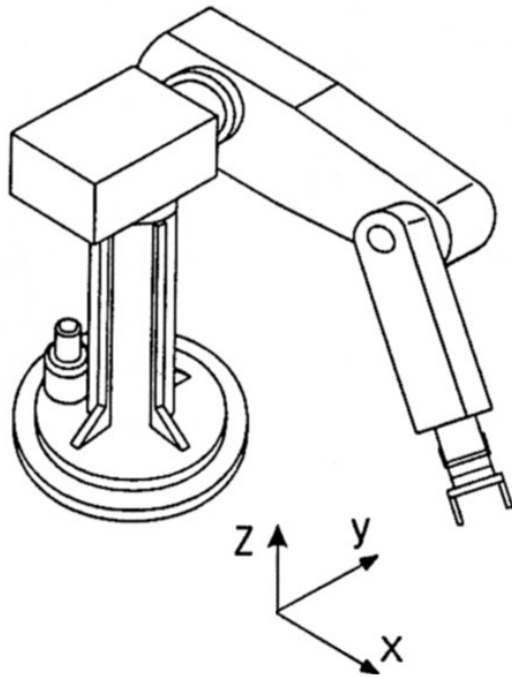


Roboterkoordinatensystem

- Körperkoordinatensystem
- verbunden mit einem festen Punkt der Haupteinheit des Roboters

Transformationen (11)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter



Weltkoordinatensystem

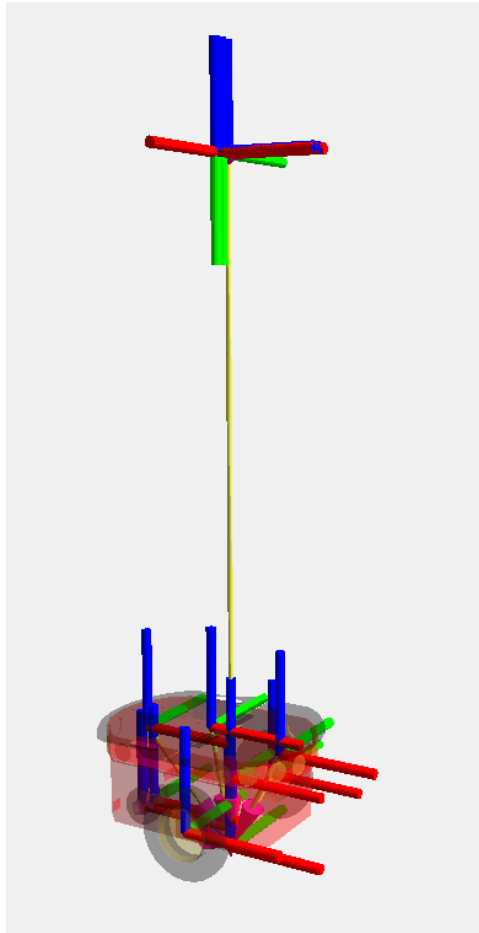
- erdfestes Koordinatensystem $\{O, X, Y, Z\}$
 - Z-Achse ist antiparallel zum Gravitationsvektor

$${}^0\vec{Z} \uparrow \downarrow \vec{g}$$

- Nutzung als Referenzkoordinatensystem

Transformationen (12)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter

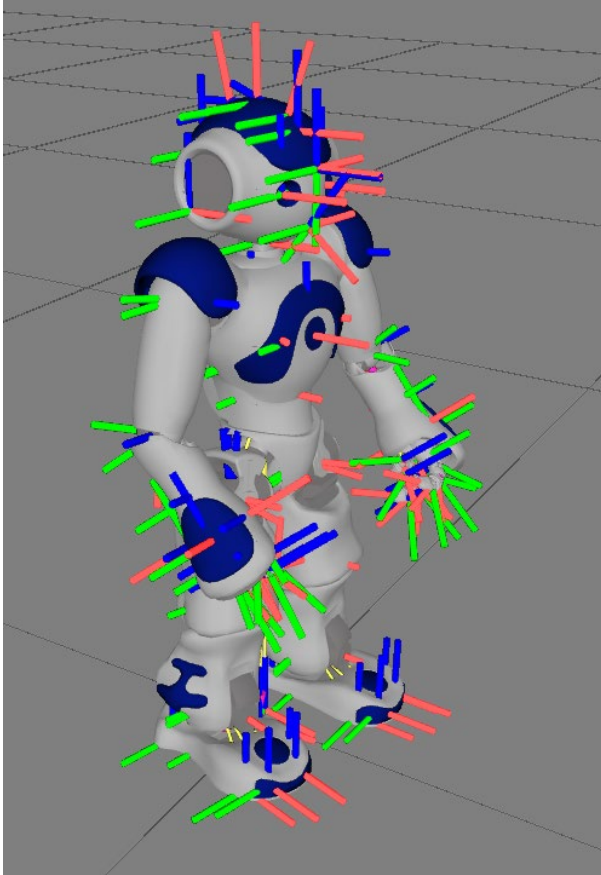


Koordinatensysteme am mobilen Roboter

- Roboterkoordinatensystem
- Koordinatensysteme der Antriebe
- Sensorkoordinatensysteme

Transformationen (13)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter

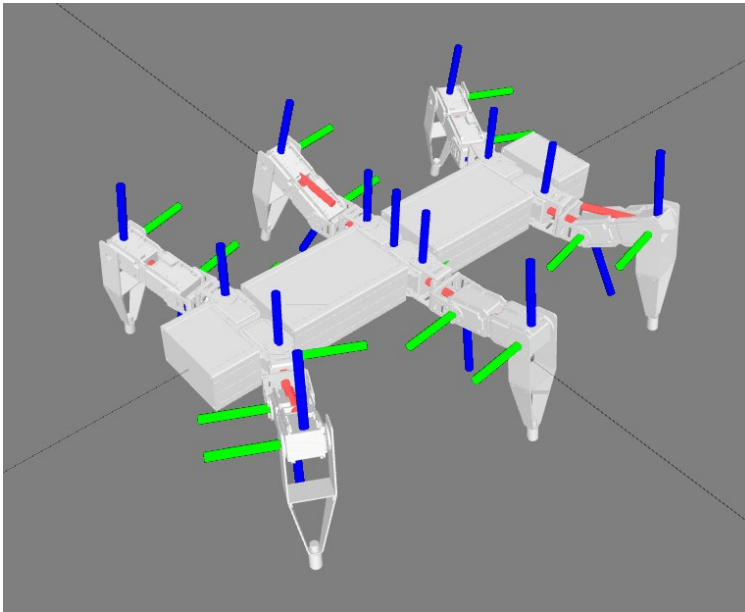


Koordinatensysteme am mobilen Roboter

- Roboterkoordinatensystem
- Koordinatensysteme der Antriebe
- Sensorkoordinatensysteme

Transformationen (14)

Beispiele für Koordinatensysteme am Roboter



Koordinatensysteme am mobilen Roboter

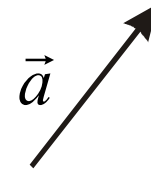
- Roboterkoordinatensystem
- Koordinatensysteme der Antriebe
- Sensorkoordinatensysteme

Transformationen (15)

Vektoren

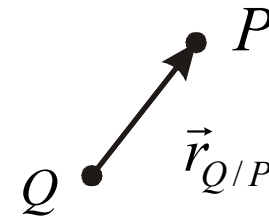
Freier Vektor

- Besitzt eine charakteristische Richtung
- Kann im Raum parallel verschoben werden



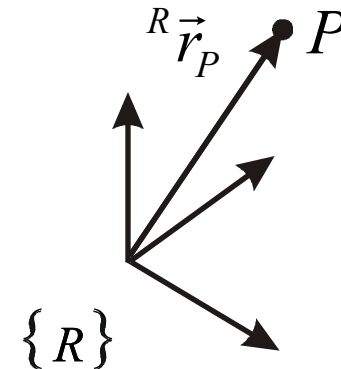
Gebundener Vektor

- Hat einen festen Anfangs- und Endpunkt



Ortsvektor

- Gebundener Vektor, dessen Ursprung im Bezugskordinatensystem liegt



Transformationen (16)

Vektoren

Allgemeine Darstellung: $\vec{a} = (a_1 \ a_2 \ a_3)^T$

Homogener Vektor

- Verwendung einer zusätzlichen Koordinate

$$\vec{a} = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ r)^T$$

- r - Skalierungsfaktor
- hier: Skalierung $r = 1$

$$\vec{a} = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ 1)^T$$

Transformationen (17)

Drehung von Koordinatensystemen

- Koordinatensysteme $\{O;x,y,z\}$, $\{O;u,v,w\}$
- Gleicher Ursprung, gegeneinander verdreht
- Einheitsvektoren $\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$ bzw. $\vec{e}_u, \vec{e}_v, \vec{e}_w$
- Darstellung eines Punktes
 - in $\{O;x,y,z\}$: $\vec{P} = p_x \cdot \vec{e}_x + p_y \cdot \vec{e}_y + p_z \cdot \vec{e}_z$
 - in $\{O;u,v,w\}$: $\vec{P} = p_u \cdot \vec{e}_u + p_v \cdot \vec{e}_v + p_w \cdot \vec{e}_w$
- für das Skalarprodukt zweier Vektoren \vec{a}, \vec{b} gilt

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = a \cdot b \cdot \cos(\angle \vec{a}, \vec{b})$$

- Entsprechend gilt

$$\vec{e}_x \cdot \vec{P} = p_x$$

$$\vec{e}_y \cdot \vec{P} = p_y$$

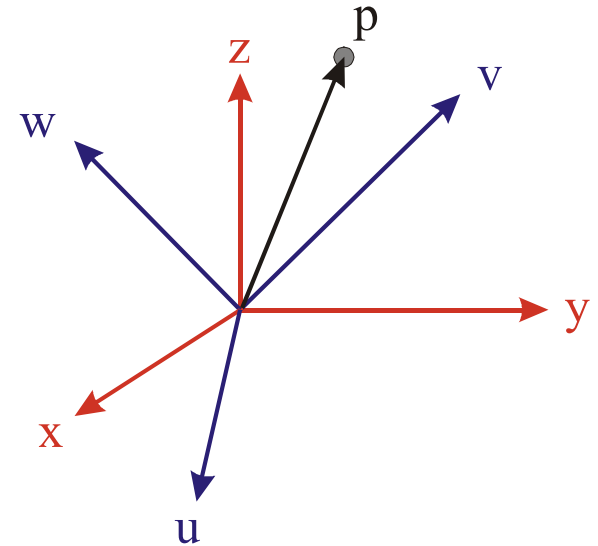
$$\vec{e}_z \cdot \vec{P} = p_z$$

bzw.

$$\vec{e}_u \cdot \vec{P} = p_u$$

$$\vec{e}_v \cdot \vec{P} = p_v$$

$$\vec{e}_w \cdot \vec{P} = p_w$$



Transformationen (18)

Drehung von Koordinatensystemen

- Darstellung von p im Koordinatensystem $\{O;x,y,z\}$

$$p_x = \vec{e}_x \cdot \vec{P} = \vec{e}_x \cdot \vec{e}_u \cdot p_u + \vec{e}_x \cdot \vec{e}_v \cdot p_v + \vec{e}_x \cdot \vec{e}_w \cdot p_w$$

$$p_y = \vec{e}_y \cdot \vec{P} = \vec{e}_y \cdot \vec{e}_u \cdot p_u + \vec{e}_y \cdot \vec{e}_v \cdot p_v + \vec{e}_y \cdot \vec{e}_w \cdot p_w$$

$$p_z = \vec{e}_z \cdot \vec{P} = \vec{e}_z \cdot \vec{e}_u \cdot p_u + \vec{e}_z \cdot \vec{e}_v \cdot p_v + \vec{e}_z \cdot \vec{e}_w \cdot p_w$$

Vektorxschreibweise

$$p_{xyz} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}$$

- Darstellung von p im Koordinatensystem $\{O;u,v,w\}$

$$p_u = \vec{e}_u \cdot \vec{P} = \vec{e}_u \cdot \vec{e}_x \cdot p_x + \vec{e}_u \cdot \vec{e}_y \cdot p_y + \vec{e}_u \cdot \vec{e}_z \cdot p_z$$

$$p_v = \vec{e}_v \cdot \vec{P} = \vec{e}_v \cdot \vec{e}_x \cdot p_x + \vec{e}_v \cdot \vec{e}_y \cdot p_y + \vec{e}_v \cdot \vec{e}_z \cdot p_z$$

$$p_w = \vec{e}_w \cdot \vec{P} = \vec{e}_w \cdot \vec{e}_x \cdot p_x + \vec{e}_w \cdot \vec{e}_y \cdot p_y + \vec{e}_w \cdot \vec{e}_z \cdot p_z$$

Vektorschreibweise

$$p_{uvw} = \begin{pmatrix} p_u \\ p_v \\ p_w \end{pmatrix}$$

Transformationen (19)

Drehung von Koordinatensystemen

- Die rechten Seiten der Gleichungen können als Rotationsmatrix zusammengefasst werden

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \vec{e}_x \cdot \vec{e}_u & \vec{e}_x \cdot \vec{e}_v & \vec{e}_x \cdot \vec{e}_w \\ \vec{e}_y \cdot \vec{e}_u & \vec{e}_y \cdot \vec{e}_v & \vec{e}_y \cdot \vec{e}_w \\ \vec{e}_z \cdot \vec{e}_u & \vec{e}_z \cdot \vec{e}_v & \vec{e}_z \cdot \vec{e}_w \end{pmatrix} \quad \text{bzw.} \quad \mathbf{R}^{-1} = \begin{pmatrix} \vec{e}_u \cdot \vec{e}_x & \vec{e}_u \cdot \vec{e}_y & \vec{e}_u \cdot \vec{e}_z \\ \vec{e}_v \cdot \vec{e}_x & \vec{e}_v \cdot \vec{e}_y & \vec{e}_v \cdot \vec{e}_z \\ \vec{e}_w \cdot \vec{e}_x & \vec{e}_w \cdot \vec{e}_y & \vec{e}_w \cdot \vec{e}_z \end{pmatrix}$$

- Da \mathbf{R}^{-1} gleichzeitig Transponierte von \mathbf{R} ist, gilt

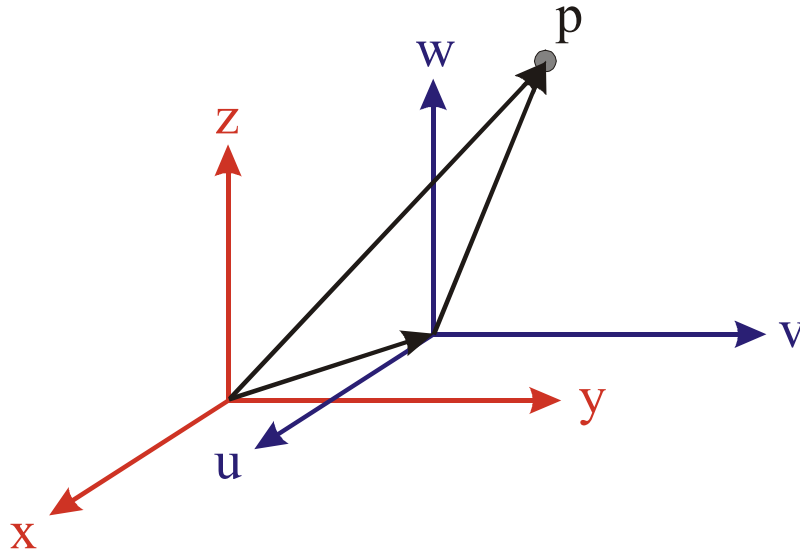
$$\mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T$$

- für die Rotationsbeziehungen gilt also

$$p_{xyz} = \mathbf{R} \cdot p_{uvw} \quad p_{uvw} = \mathbf{R}^T \cdot p_{xyz} = \mathbf{R}^{-1} \cdot p_{xyz}$$

Transformationen (20)

Verschiebung von Koordinatensystemen



- Verschiebung kann durch eine einfache Vektoraddition ausgedrückt werden

$$p_{xyz} = \mathbf{T} + p_{uvw} \quad \text{mit} \quad \{O; x, y, z\} \parallel \{O; u, v, w\}$$

Transformationen (21)

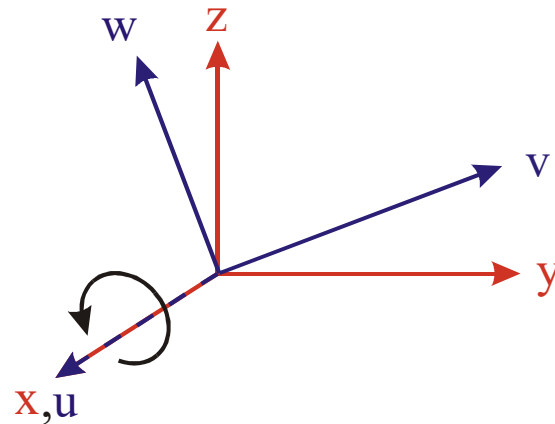
Drehung um die X-Achse mit dem Winkel α

$$\vec{e}_x \cdot \vec{e}_u = 1 \quad \vec{e}_x \cdot \vec{e}_v = 0 \quad \vec{e}_x \cdot \vec{e}_w = 0$$

$$\vec{e}_y \cdot \vec{e}_u = 0 \quad \vec{e}_y \cdot \vec{e}_v = \cos(\alpha) \quad \vec{e}_y \cdot \vec{e}_w = -\sin(\alpha)$$

$$\vec{e}_z \cdot \vec{e}_u = 0 \quad \vec{e}_z \cdot \vec{e}_v = \sin(\alpha) \quad \vec{e}_z \cdot \vec{e}_w = \cos(\alpha)$$

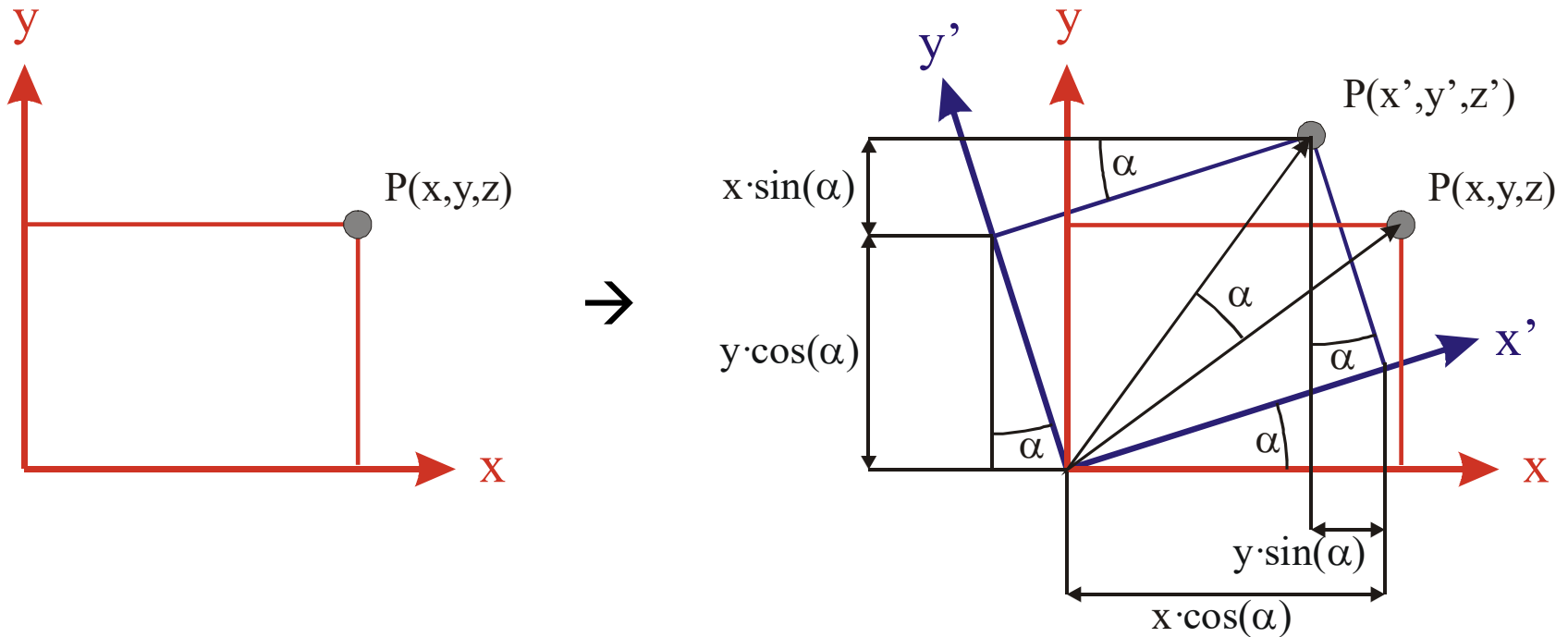
$$\mathbf{R}_{x,\alpha} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$$



Transformationen (22)

Geometrische Betrachtung der Rotation

- Rotation des Punktes P um die Z -Achse des Koordinatensystems $\{O;x,y,z\}$
- geometrische Betrachtung des zugrunde liegenden Koordinatensystems der xy -Ebene



Transformationen (23)

Geometrische Betrachtung der Rotation

- Bei Drehung um Z-Achse um Winkel α gilt:
 - Punkt P mit den Koordinaten $(x,y,z)^T$ geht über in den Punkt P' mit den Koordinaten $(x',y',z')^T$:

$$x' = x \cdot \cos(\alpha) - y \cdot \sin(\alpha)$$

$$y' = x \cdot \sin(\alpha) + y \cdot \cos(\alpha)$$

$$z' = z$$

- z-Koordinate bleibt fest, da z die Drehachse ist
- Matrixform

$$P_{x'y'z'} = \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{z,\alpha} \cdot P_{xyz}$$

Transformationen (24)

- **Drehung um die Z-Achse mit dem Winkel α**

– Rotationsmatrix: $\mathbf{R}_{z,\alpha} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

- **Drehung um die y-Achse mit dem Winkel α**

– Rotationsmatrix: $\mathbf{R}_{y,\alpha} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{pmatrix}$

Transformationen (25)

Verkettung von Rotationen

- Rotationen lassen sich verketteten
- Multiplikation der Rotationsmatrizen von links in der Reihenfolge der Ausführung der Rotationen

$$R = R_n \cdot R_{n-1} \cdot \dots \cdot R_2 \cdot R_1$$

- Achtung: Matrixmultiplikationen sind nicht kommutativ
- Reihenfolge der Multiplikation (Assoziativität)
 - Vormultiplikation: $R = (R_n \cdot (R_{n-1} \cdot \dots \cdot (R_2 \cdot R_1)))$
 - Interpretation: Drehung des momentanen Koordinatensystems um feste Achsen des Ursprungs koordinatensystems
 - Nachmultiplikation: $R = (((R_n \cdot R_{n-1}) \cdot \dots \cdot R_2) \cdot R_1)$
 - Interpretation: Drehung um Achsen des momentanen Koordinatensystems

Transformationen (26)

Drehachsen in der Robotik

In der Robotik gibt es zwei mögliche Arten zur Festlegung der Rotationsachsen und der Reihenfolge der Rotationen:

- a) Euler-Winkel
- b) Roll, Pitch, Yaw

Transformationen (27)

Euler-Winkel

- Drehung α um z-Achse des BKS $\mathbf{R}_{z,\alpha}$
- Drehung β um die neue y-Achse x' $\mathbf{R}_{x',\beta}$
- Drehung γ um die neue z-Achse z'' $\mathbf{R}_{z'',\gamma}$

$$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_{z,\alpha} \cdot \mathbf{R}_{x',\beta} \cdot \mathbf{R}_{z'',\gamma}$$

$$\mathbf{R}_{S,\alpha\beta\gamma} = \begin{pmatrix} C\alpha C\gamma - C\beta S\gamma S\alpha & -C\alpha C\gamma - C\beta C\gamma S\alpha & S\alpha S\beta \\ S\alpha C\gamma + C\beta S\gamma C\alpha & C\beta C\gamma - S\alpha S\gamma & -C\alpha S\beta \\ S\gamma S\beta & C\gamma S\beta & C\beta \end{pmatrix}$$

mit $S\varphi = \sin(\varphi)$ und $C\varphi = \cos(\varphi)$

- wichtig:
 - Drehung um veränderte Achsen
 - Aufschreiben von links nach rechts

Transformationen (28)

Roll-Pitch-Yaw (Rollen-Nicken-Gieren)

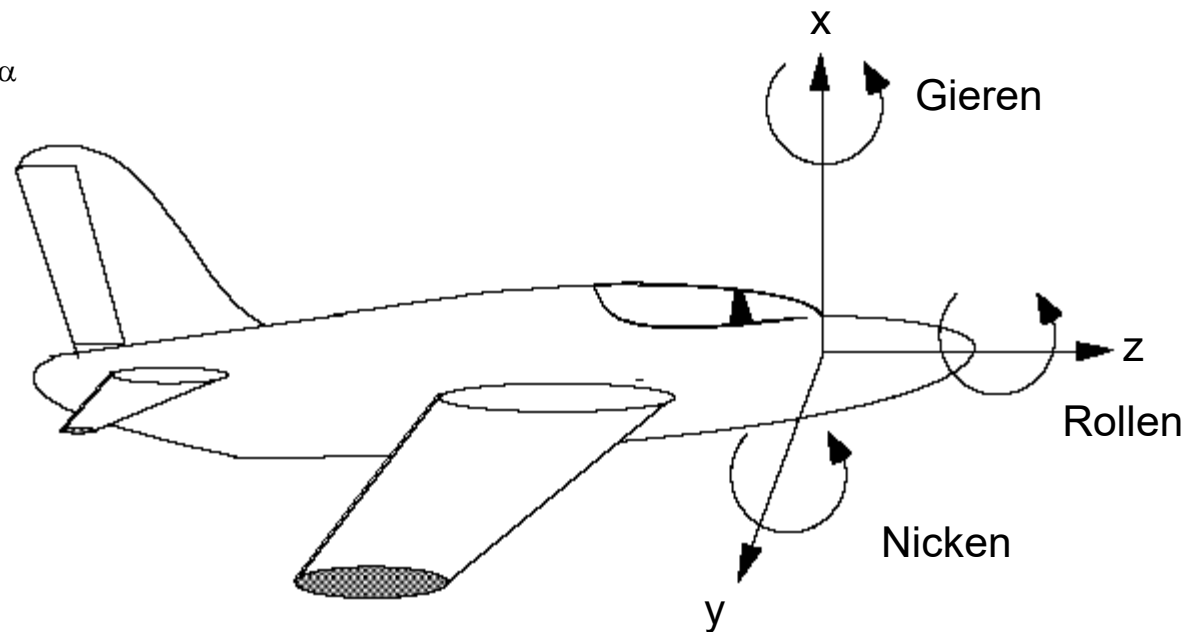
- Drehung α (Scherwinkel) um die x-Achse des BKS (gieren, schwenken, scheren – engl.: yaw)
- Drehung β (Neigungswinkel) um die y-Achse des BKS (stampfen, neigen, nicken – engl.: pitch)
- Drehung γ (Rollwinkel) um die z-Achse des BKS (rollen, schlingern – engl.: roll)

$$\mathbf{R}_{z,\gamma}$$

$$\mathbf{R}_{y,\beta}$$

$$\mathbf{R}_{x,\alpha}$$

$$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_{z,\gamma} \cdot \mathbf{R}_{y,\beta} \cdot \mathbf{R}_{x,\alpha}$$



Transformationen (29)

Roll-Pitch-Yaw (Rollen-Nicken-Gieren)

$$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_{z,\gamma} \cdot \mathbf{R}_{y,\beta} \cdot \mathbf{R}_{x,\alpha}$$

$$\mathbf{R}_S = \begin{pmatrix} C\alpha C\beta & C\alpha S\beta S\gamma - S\alpha C\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ S\alpha C\beta & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma - C\alpha S\gamma \\ -S\beta & C\beta S\gamma & C\beta C\gamma \end{pmatrix}$$

- wichtig:
 - Drehung um unveränderte Achsen
 - Aufschreiben von rechts nach links

Transformationen (30)

Darstellung der Orientierung

- Roll-Pitch-Yaw
 - xyz-System verwendet in Luft- und Raumfahrt
- Euler-Winkel
 - zx'z''-System in der Mathematik, übliche Definition
 - zy'x''-System für Programmierung numerisch gesteuerter Handhabungseinrichtungen, IRDATA (Handgelenk TRR)
 - zy'z''-System verwendet bei der Programmiersprache VAL, eingesetzt beim PUMA-Roboter

Transformationen (31)

Verkettung von Rotationen und Translationen

- Problem:
 - Rotation: Multiplikation mit Rotationsmatrix
 - Translation: Addition des Translationsvektors
 - Verkettung Translationen/Rotationen: sehr komplizierte Ausdrücke
- gesucht:
 - einfache Möglichkeit zur Verkettung der Operationen
- Lösung
 - Nutzung von homogenen Matrizen und Vektoren

Transformationen (32)

Homogene Transformationen

Ergänzung der Transformationsmatrix um eine weitere Dimension

$$D = \left(\begin{array}{c|c} R & T \\ \hline P & S \end{array} \right)$$

R – 3 x 3 Rotation

T – 3 x 1 Translation

P – 1 x 3 Perspektivtransformation

S – 1 x 1 Skalierungsfaktor

- Hier:
- Skalierung 1 wichtig
 - keine Perspektivtransformation

Transformationen (33)

Homogene Transformationen

- Translation

$$\text{Trans}(a, b, c) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & a \\ 0 & 1 & 0 & b \\ 0 & 0 & 1 & c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Rotation

um die X-Achse

$$\text{Rot}(X, \alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Transformationen (34)

Homogene Transformationen

- Rotation

um die Y-Achse

$$\text{Rot}(Y, \beta) = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

um die Z-Achse

$$\text{Rot}(Z, \gamma) = \begin{pmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Transformationen (35)

Homogene Transformationen

- Mehrere Transformationsschritte lassen sich durch Multiplikation mehrerer Transformationsoperatoren verketteten

$${}^C_A T = {}^C_B T \cdot {}^B_A T = \text{Rot}(Z, y) \cdot \text{Trans}(a, b, c)$$

- Der Ortsvektor eines Koordinatensystems lässt sich in einem anderen Koordinatensystem ausdrücken, wenn eine Transformationsmatrix ${}^B_A T$ existiert, so dass

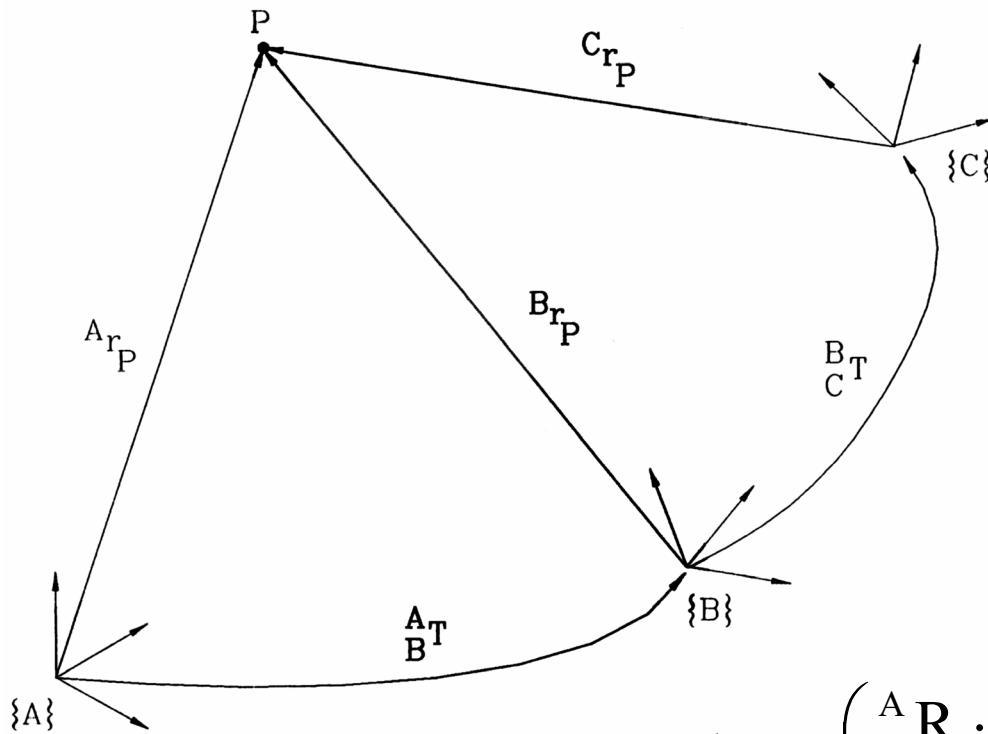
$${}^B P = {}^B_A T \cdot {}^A P = \begin{pmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \cdot {}^A P$$

R – Drehung der Koordinatensysteme gegeneinander

T – Verschiebung des Koordinatenursprungs

Transformationen (36)

Transformationsarithmetik



Geg.: ${}^C r_P$

Ges.: ${}^A r_P$

$${}^B r_P = {}^B_C T \cdot {}^C r_P$$

$${}^A r_P = {}^A_B T \cdot {}^B r_P$$

$${}^A r_P = {}^A_B T \cdot {}^B_C T \cdot {}^C r_P$$

$${}^A_C T = \begin{pmatrix} {}^A_B R \cdot {}^B_C R & {}^A_B R \cdot {}^B r_{O,C} + {}^A r_{O,B} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}$$

Transformationen (37)

Transformationsarithmetik

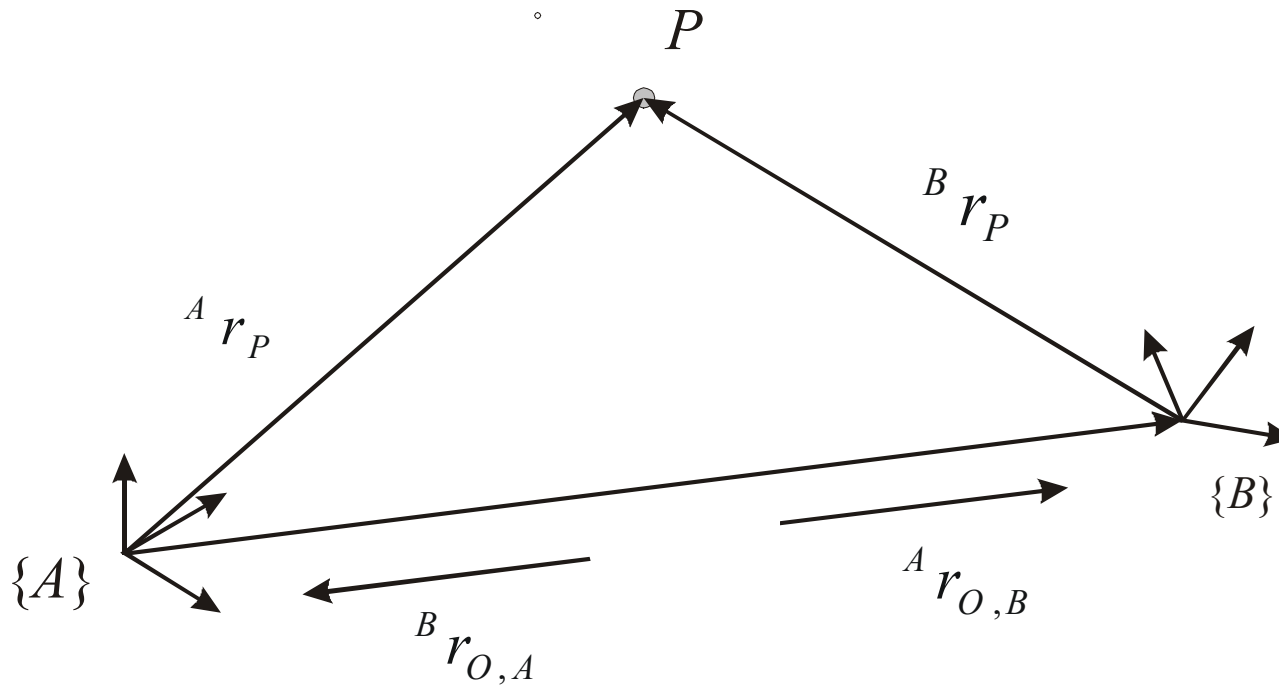
Inverse Transformation

- Transformation in umgekehrter Richtung, z.B. Bestimmung von ${}^B_A\mathbf{T}$ aus ${}^A_B\mathbf{T}$
- Einfachster Weg: Inversion der Transformationsmatrix
- Problem: numerische Konditionierung
- Besser: Ausnutzung von Strukturinformationen
- Gesucht:

$${}^B_A\mathbf{T} = \begin{pmatrix} {}^B_A\mathbf{R} & {}^B r_{O,A} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}$$

Transformationen (38)

Transformationsarithmetik



Transformationen (39)

Transformationsarithmetik

- ${}^B_A R$ kann wie gezeigt durch Transponieren von ${}^A_B R$ gewonnen werden:

$${}^B_A R = {}^A_B R^T$$

- Es gilt für ${}^A r_P$: ${}^A r_P = {}^A r_{O,B} + {}^B_A R \cdot {}^B r_P$

- Setzt man für den Punkt P den Ursprung von $\{A\}$ ein, so ergibt sich

$${}^A r_{O,A} = {}^A r_{O,B} + {}^B_A R \cdot {}^B r_{O,A}$$

- Da ${}^A r_{O,A} = \mathbf{0}$ gilt, ergibt sich

$${}^B r_{O,A} = -{}^B_A R \cdot {}^A r_{O,B} = -{}^A_B R^T \cdot {}^A r_{O,B}$$

- Einsetzen in die Transformation: ${}^B_A T = \begin{pmatrix} {}^A_B R^T & -{}^A_B R^T \cdot {}^A r_{O,B} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}$

Transformationen (40)

Beispiel

```
<?xml version="1.0"?>
<robot name="hexapod">

<link name="base_link"/>
<joint name="base_link_to_hexapod_joint" type="fixed">
  <parent link="base_link"/>
  <child link="hexapod_link"/>
</joint>
<link name="hexapod_link">
  <visual>
    <geometry>
      <mesh filename="package://akrobat/stl/hexapod_link.stl"/>
    </geometry>
    <origin rpy="0 0 0" xyz="0 0 0"/>
    <material name="grey">
      <color rgba="0.67 0.67 0.67 1"/>
    </material>
  </visual>
</link>
```

Beispiel zur Angabe von
Koordinaten in einer
URDF-Datei

Transformationen (41)

Zusammenfassung

- Koordinatentransformationen in Robotik, Visualisierungen und beim Rendern von Bildern sowie Simulationen wichtig
- Darstellung von Messgrößen am korrekten Ort und Bezug auf das zentrale Roboterkoordinatensystem
- Beschreibung von Position und Orientierung von Objekten in der Umgebung
- Verwendung von Homogenen Vektoren und Homogenen Transformationsmatrizen → nur noch Matrixmultiplikationen notwendig
- Intern verwenden viele Programmpakete Quaternionen, die numerisch effizienter sind
- Darstellungen sind in der Regel auch mit Homogenen Vektoren und Matrizen möglich
- Beispiele: ROS, Blender