

Anhang

A Modell des betrachteten Robotertyps

In dieser Arbeit werden Roboter mit drei Freiheitsgraden, deren Achsen in einem Zylinderkoordinatensystem angeordnet sind, betrachtet (Bild 1). Zur Simulation dieser Systeme muß zuerst eine mathematische Modellbildung durchgeführt werden. Eine hierzu, aber auch in Hinblick auf den Entwurf einer Regelung geeignete Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Robotertyps ist die Darstellung im Zustandsraum. Ausgangspunkt der Modellbildung ist die Bestimmung der physikalischen Bewegungsgleichungen über Energiebetrachtungen mit Hilfe der Lagrange-Funktion. Für jede Bewegungsachse erhält man in guter Näherung eine Differentialgleichung 2. Ordnung, so daß sich das mathematische Modell eines Roboters mit k Achsen als ein Gleichungssystem der Ordnung $2k$ darstellen läßt. Aufgrund von variablen Trägheitsmomenten sind diese Bewegungsgleichungen nichtlinear und außerdem untereinander durch Zentrifugalkräfte und Coriolismomente verkoppelt [16]. Wird der in Bild 7 dargestellte Aufbau zugrundegelegt und zusätzlich die Hubachse $z(t)$ berücksichtigt, so wird eine Bewegung der ersten (Rotations-) Achse durch Aufschalten des Moments $M_\varphi(t)$, ein Verfahren der zweiten (Hub-) Achse durch Aufschalten der Kraft $K_z(t)$ und eine Bewegung der dritten (Translations-) Achse durch Aufschalten der Kraft $K_r(t)$ erreicht. Die zugehörigen physikalischen Bewegungsgleichungen ergeben sich zu

$$M_\varphi(t) = [\Theta_f + \frac{mr^2}{3} + (m + m_L)r^2(t) - mr^l r(t)]\ddot{\varphi}(t) + 2[(m + m_L)r(t) - \frac{mr^l}{2}]\dot{r}(t)\dot{\varphi}(t)$$

$$K_z(t) = (m + m_L)[\ddot{z}(t) + g]$$

$$K_r(t) = (m + m_L)\ddot{r}(t) - [(m + m_L)r(t) - \frac{mr^l}{2}]\dot{\varphi}^2(t)$$

Hierbei bezeichnet m die Masse und r^l die Länge der dritten (Translations-) Achse, Θ_f das Trägheitsmoment des sich drehenden Aufbaus ohne dritte Achse, m_L die Masse von Greifer und Last sowie g die Erdbeschleunigung.

Die Zustandsgleichungen für einen Roboter mit k Freiheitsgraden sind in allgemeiner Form durch

$$\dot{\underline{x}}(t) = \underline{A}(\underline{x}) + \underline{B}(\underline{x})\underline{u}(t)$$

$$\underline{y}(t) = \underline{C}(\underline{x})$$

mit $\underline{x}(t)$ als $2k$ -dimensionalem Zustandvektor, $\underline{u}(t)$ als k -dimensionalem Eingangsvektor und $\underline{y}(t)$ als k -dimensionalem Ausgangsvektor gegeben. $\underline{A}(\underline{x})$ beschreibt die Systemmatrix, durch $\underline{B}(\underline{x})$ kann das Eingangs- und mit $\underline{C}(\underline{x})$ das Ausgangsverhalten eingestellt werden. Wählt man als Eingangsgrößen die angreifenden Kräfte bzw. Momente, so ergibt

sich der Eingangsvektor zu

$$\underline{u}(t) = \begin{bmatrix} M_\varphi(t) \\ K_z(t) - (m + m_L)g \\ K_r(t) \end{bmatrix}$$

Als Ausgangsgrößen werden die Achsstellungen gewählt, d.h.

$$\underline{y}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_3(t) \\ x_5(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ z(t) \\ r(t) \end{bmatrix}$$

Der Zustandsvektor $\underline{x}(t)$ setzt sich aus den Achswerten und den zugehörigen Geschwindigkeiten zusammen:

$$\underline{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) \\ z(t) \\ \dot{z}(t) \\ r(t) \\ \dot{r}(t) \end{bmatrix}$$

Durch Einsetzen von $\underline{u}(t)$, $\underline{y}(t)$ und $\underline{x}(t)$ in die Bewegungsgleichungen ergibt sich die Zustandsraumdarstellung des betrachteten Robotertyps zu

$$\dot{\underline{x}}(t) = \begin{bmatrix} x_2(t) \\ \frac{-2(m+m_L)x_5(t) + mr^l}{\Theta_f + \frac{mr^{l2}}{3} - mr^l x_5(t) + (m+m_L)x_5^2(t)} x_6(t)x_2(t) \\ x_4(t) \\ 0 \\ x_6(t) \\ x_5(t)x_2^2(t) - \frac{mr^l}{2(m+m_L)}x_2^2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\Theta_f + \frac{mr^{l2}}{3} - mr^l x_5(t) + (m+m_L)x_5^2(t)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{m+m_L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{m+m_L} \end{bmatrix} \underline{u}(t)$$

B Parameter der Simulationen

Die im Abschnitt 3.6 dargestellten Simulationen wurden mit dem in Anhang A entwickelten Robotermodell unter Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens durchgeführt. Dazu wurden die folgenden Systemparameter für die Roboter angenommen:

Masse der Translationsachse	$m =$	20	kg
Masse von Greifer und Last	$m_L =$	15	kg
Trägheitsmoment des festen Aufbaus (ohne Translationsachse und Last)	$\Theta_f =$	0,8	kg m ²
Länge der Translationsachse	$r^l =$	2,0	m
Erdbeschleunigung	$g =$	9,81	m/sec ²
Motorleistung Achse 1	$M_\varphi =$	2,5	kW
Motorleistung Achse 3	$M_r =$	1,0	kW
Maximale Geschwindigkeit Motor Achse 1	$v_\varphi^{max} =$	3000	U/min
Maximale Geschwindigkeit Motor Achse 3	$v_r^{max} =$	3000	U/min
Getriebeuntersetzung Achse 1	$i =$	0,01	
Spindelvorschub Achse 3	$L =$	0,02	m/U
Getriebewirkungsgrad Achse 1	$\eta_\varphi =$	0,9	
Spindelwirkungsgrad Achse 3	$\eta_r =$	0,9	
Maximales Drehmoment Achse 1	$M_\varphi^{max} =$	700	Nm
Maximale Kraft Achse 3	$K_r^{max} =$	900	N
Minimale Drehung Achse 1	$\varphi^{min} =$	$-\pi$	rad
Maximale Drehung Achse 1	$\varphi^{max} =$	$+\pi$	rad
Minimale Ausfahrweite Achse 3	$r^{min} =$	0,5	m
Maximale Ausfahrweite Achse 3	$r^{max} =$	2,0	m
Maximale Geschwindigkeit Achse 1	$\dot{\varphi}^{max} =$	$\pm 3,14$	rad/sec
Maximale Geschwindigkeit Achse 3	$\dot{r}^{max} =$	$\pm 1,0$	m/sec
Maximale Sicherheitszone Achse 1	$\delta\varphi^{max} =$	0,2	rad
Maximale Sicherheitszone Achse 3	$\delta r^{max} =$	0,1	m

Tabelle 1: Kenngrößen der Roboter

Aus diesen Werten wurden mit Hilfe der Zustandsgleichungen die nominellen Beschleunigungen, d.h. diejenigen Beschleunigungen, die in jedem Zustand des Roboters mindestens erreicht werden können, abgeleitet:

Nominelle Beschleunigung Achse 1	$\ddot{\varphi}^{nom} = \pm 4,4 \frac{\text{rad}}{\text{sec}^2}$
Nominelle Beschleunigung Achse 3	$\ddot{r}^{nom} = \pm 11,6 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$

Tabelle 2: Nominelle Beschleunigungen der Roboter

Schließlich wurde eine Regelung mit nichtlinearer Zustandsvektorrückführung angesetzt, die für jede Achse $i \in \{\varphi, r\}$ mit dem Eingangs-Ausgangspaar $w_i(t)$, $y_i(t)$ zu einem Gesamtübertragungsverhalten

$$\ddot{y}_i(t) + \alpha_i^1 \dot{y}_i(t) + \alpha_i^0 y_i(t) = \lambda_i w_i(t)$$

führt, wobei $w_i(t)$ der Sollwert und $y_i(t)$ die Ausgangsgröße der Achse i ist. Die Koeffizienten α_i^0 , α_i^1 und λ_i wurden mit Einstellung des aperiodischen Grenzfalls, d.h. $\alpha_i^1 = 2\sqrt{\alpha_i^0}$ und $\lambda_i = \alpha_i^0$ wie folgt gewählt:

Regler-Parameter für Rotation	$\alpha_\varphi^0 = 1500$
Regler-Parameter für Rotation	$\alpha_\varphi^1 = 77,46$
Regler-Parameter für Rotation	$\lambda_\varphi^0 = 1500$
Regler-Parameter für Translation	$\alpha_r^0 = 1500$
Regler-Parameter für Translation	$\alpha_r^1 = 77,46$
Regler-Parameter für Translation	$\lambda_r^0 = 1500$

Tabelle 3: Einstellung der Regler

Literaturverzeichnis

- [1] Altenhein, A.: Kollisionsbehandlung als Grundbaustein eines modularen Industrieroboter-Off-line-Programmiersystems. IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 136, Springer, Berlin, 1989
- [2] Borgolte, U.: Ein Verfahren zur online-Kollisionsvermeidung für Roboter. Tagungsbericht Bergisches Seminar für Robotik, Wuppertal 1989, S. 112–142
- [3] Brady, M. et al.: Robot motion: Planning and control. Cambridge, Mass.: MIT-Press Series in Artificial Intelligence, 1982
- [4] Bronstein, I. N.; Semendjajew, K. A.: Taschenbuch der Mathematik. Leipzig, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1985
- [5] Brooks, R. A.: Planning collision free motions for pick and place operations. International Journal of Robotics Research, Vol. 2, No. 4, 1983, S. 19–44
- [6] Chien, Y. P.; Koivo, A. J.; Lee, B. H.: On-line generation of collision free trajectories for multiple robots. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Philadelphia 1988, S. 209–214
- [7] DIN 66312-Entwurf und ISO/TC184/SC2/WG4 Draft Proposal: Industrial Robot Language (IRL). Language Description. Version 2.3, 14.11.1989
- [8] Dunne, M. J.: An advanced assembly robot. In: Tanner, W. R. (ed.): Industrial Robots, Bd. 2, Dearborn, Michigan: Society of Manufacturing Engineers 1979, S. 249–262
- [9] Fletcher, R. W.; Goldenberg, A. A.: Collision Avoidance for Robot Manipulators: Application to CATIA/IBM 7565 Interface. Journal of Robotic Systems, Vol. 5, No. 2, 1988, S. 125–146
- [10] Freund, E.; Borgolte, U.: Ein Algorithmus zur Kollisionserkennung und -vermeidung bei Robotern mit zylinderförmigem Arbeitsraum. Robotersysteme, Vol. 6, No. 1, 1990, S. 1–10
- [11] Fujimura, K.; Samet, H.: A hierarchical strategy for path planning among moving obstacles. IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 1, 1989, S. 61–69
- [12] Gerke, W.: Zur kollisionsvermeidenden Regelung von Industrierobotern. Düsseldorf, VDI-Verlag, 1986
- [13] Hameister, W.: Kollisionsvermeidung zwischen Robotern und Hindernissen. Diplomarbeit, Wuppertal 1985
- [14] Herman, M.: Fast, three-dimensional, collision-free motion planning. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco 1986, S. 1056–1063

- [15] Hörmann, K.: Kollisionsfreie Bahnen für Industrieroboter. Berlin; Heidelberg; New York; Tokio: Springer-Verlag, 1988
- [16] Hoyer, H.: Verfahren zur automatischen Kollisionsvermeidung von Robotern im koordinierten Betrieb. Diss., FernUniversität Hagen, 1984
- [17] Hoyer, H.: On-line collision avoidance for industrial robots. Preprints Symposium on Robot Control, Barcelona 1985, S. 477–485
- [18] Ilari, J.; Torras, C.: 2D path planning: A configuration space heuristic approach. International Journal of Robotics Research, Vol. 9, No. 1, 1990, S. 75–91
- [19] Jacak, W.: Strategies of searching for collision-free manipulator motions: automata theory approach. Robotica, Vol. 7, 1989, S. 129–138
- [20] Jacak, W. et al.: Planning collision-free movements of a robot: A systems theory approach. Robotica, Vol. 5, 1988, S. 289–296
- [21] Kant, K.; Zucker, S. W.: Planning smooth collision-free trajectories: Path, velocity and splines in free-space. International Journal of Robotics and Automation, Vol. 2, No. 3, 1987, S. 117–126
- [22] Khatib, O.: Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 1, 1986, S. 90–98
- [23] Kirčanski, M.; Vukobratović, M.: Contribution to control of redundant robotic manipulators in an environment with obstacles. International Journal of Robotics Research, Vol. 5, No. 4, 1986, S. 112–119
- [24] Lee, B. H.; Lee, C. S. G.: Collision-free motion planning of two robots. IEEE Transaction on Systems, Vol. SMC-17, No. 1, 1987, S. 21–32
- [25] Lozano-Peréz, T.: An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles. Communications of the ACM, Vol. 22, No. 10, 1979, S. 560–570
- [26] Lozano-Peréz, T.: A simple motion-planning algorithm for general robot manipulators. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, 1987, S. 224–238
- [27] Luh, J. Y. S.; Zheng, Y. F.: Constraint relations between two coordinated industrial robots for motion control. International Journal of Robotics Research, Vol. 6, No. 3, 1987, S. 60–70
- [28] Lumelsky, V. J.: Effect of kinematics on motion planning for planar robot arms moving amidst unknown obstacles. IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol. RA-3, No. 3, 1987, S. 207–223
- [29] Mehrotra, R.: Collision detection between the wrists of two robot arms in a common workspace. Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 2, 1989, S. 29–41

- [30] Miyazaki, F. et al.: Sensory feedback based on the artificial potential for robot manipulators. Proceedings 9th IFAC, Budapest 1984, S. 2381–2386
- [31] Newman, W. S.: Automatic obstacle avoidance at high speeds via reflex control. Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, Scottsdale 1989, S. 1104–1109
- [32] Oommen, B. J.; Reichstein, I.: On the problem of translating an elliptic object through a workspace of elliptic obstacles. *Robotica*, Vol. 5, 1987, S. 187–196
- [33] Ozaki, H.; Shimadzu, T.; Mohri, A.: Collision-free path generation for a mobile robot by an artificial transformation of obstacle spaces. *Robotica*, Vol. 7, 1989, S. 139–142
- [34] Pavlov, V. V.; Voronin, A. N.: The method of potential functions for coding constraints of the external space in an intelligent mobile robot. *Soviet Automatic Control*, Vol. 6, 1984, S. 45–51
- [35] Red, W. E.; Kim, K. H.: Dynamic direct subspaces for robot path planning. *Robotica*, Vol. 5, 1987, S. 29–36
- [36] Roach, J. W.; Boaz, M. N.: Coordinating the motions of robot arms in a common workspace. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA-3, No. 5, 1987, S. 437–444
- [37] Shin, Y.; Bien, Z.: Collision-free trajectory planning for two robot arms. *Robotica*, Vol. 7, 1989, S. 205–212
- [38] Steininger, F.: Anpassung der automatischen Bahnbestimmung nach Freund-Hoyer an den Robotertyp PUMA 560. Diplomarbeit, München 1988
- [39] Stöck, H.-P.: On-line Kollisionsvermeidung bei Handhabungssystemen. Diss., TH Aachen, 1986
- [40] Sun, K.; Lumelsky, V.: Computer simulation of sensor-based robot collision avoidance in an unknown environment. *Robotica*, Vol. 5, 1987, S. 291–302
- [41] Warren, C. W. et al.: An approach to manipulator path planning. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 8, No. 5, 1989, S. 87–95
- [42] Zhang, W.; Wang, P. K. C.: Collision-free time-optimal control of a two-link manipulator. *International Journal of Robotics and Automation*, Vol. 1, No. 3, 1986, S. 96–104