

Automatische Bestimmung kollisionsfreier Bewegungsbahnen für Industrieroboter

W. Li, Saarbrücken

Automatic determination of collision-free paths for general robots

Abstract. This paper describes an approach to automatic determination of collision-free paths for general robots. The most important step of the approach is the representation of obstacles in the configuration space of a robot. On the basis of the defined fundamental area and fundamental obstacles of the robot obstacles are fast mapped from the workspace into the configuration space. Then the collision recognition of configurations and paths of the robot are on-line executed. Furthermore global collision-free paths of the robot can be automatically determined. The approach is adapted to general robot and successfully employed as an example on a robot PUMA 560.

Zusammenfassung. In dieser vorliegenden Arbeit wird ein Verfahren zur automatischen Bestimmung kollisionsfreier Bewegungsbahnen für generelle Roboter beschrieben. Der wichtigste Schritt dieses Verfahrens ist die Darstellung von Hindernissen im Konfigurationsraum eines Roboters. Auf der Basis der definierten Fundamentalfläche und Fundamentalhindernisse des Roboters wurden die Hindernisse aus dem Arbeitsraum in den Konfigurationsraum schnell abgebildet. Dann wurde die Kollisionserkennung von Konfigurationen und Bewegungsbahnen des Roboters on-line durchgeführt. Weiterhin sind globale kollisionsfreie Bahnen des Roboters automatisch zu bestimmen. Das Verfahren gilt für generelle Industrieroboter und wurde als Beispiel am Roboter PUMA 560 erfolgreich verwendet.

1 Einleitung

Der weitergehende Einsatz von Industrierobotern im Bereich von Montageaufgaben und zur Teilrealisierung von unbemannten Fabriken fordert, daß ein Roboter kollisionsfreie Bewegungsbahnen zwischen Hindernissen im Arbeitsraum gemäß den Aufgaben automatisch bestimmen kann. Dazu wurden manche Arbeiten auf diesem Gebiet durchgeführt. Ein wichtiger Beitrag stammt von [5]. Er führt die Bahnplanung im Konfigurationsraum (configuration space) durch und benutzt mengengeometrische Hilfsmittel zur analytischen Beschreibung von Kollisionsräumen, wobei nur drei translatorische Freiheitsgrade berücksichtigt werden. [3] und [6] zeigten die Verfahren zur Planung kollisionsfreier Bewegungsbahnen für generelle Roboter. Eine Kernaufgabe

dieser Verfahren ist die Abbildung von Hindernissen aus dem Arbeitsraum in den Konfigurationsraum des Roboters, die hohe Rechenzeiten benötigt. Ihre praktische Eignung für eine automatische on-line-Kollisionsvermeidung ist eingeschränkt. In [2] wurde ein Verfahren zur automatischen on-line-Kollisionsvermeidung für Roboter vorgestellt. Das Verfahren wurde aber unter der Voraussetzung diskutiert, daß ein Roboter einen rotatorischen Freiheitsgrad und zwei translatorische Freiheitsgrade hat. Das Verfahren ist von Robotertypen wie z. B. Robotern der sog. PUMA-Klasse der Firma Unimation bei schwierigeren Fällen begrenzt. In dieser Arbeit wurde ein Verfahren, das unabhängig von Robotertypen ist, zur schnellen Abbildung von Hindernissen aus dem Arbeitsraum in den Konfigurationsraum entwickelt. Das Verfahren basiert auf der definierten Fundamentalfläche und den Fundamentalhindernissen eines Roboters. Dieser Algorithmus braucht keine konvexe Hülle für Hindernisse in drei Dimensionen zu berechnen sondern nur die Bildmengen der entsprechenden Fundamentalhindernisse, die reale Hindernisse approximieren, im Konfigurationsraum zu vereinigen, deswegen reduziert dieses Verfahren sehr stark die Rechenzeiten im Vergleich zu den Verfahren in [3, 6]. Mit Hilfe von Bildmengen von Hindernissen im Konfigurationsraum (configuration space obstacles) wurde die Kollisionserkennung der Konfigurationen und der gegebenen Bewegungsbahnen des Roboters ausgeführt und kollisionsfreie Bahnen gemäß Aufgaben zwischen Hindernissen automatisch bestimmt. Das Verfahren wurde erfolgreich am Roboter PUMA 560 verwendet. Die Berechnungsergebnisse wurden durch ein Graphiksystem simuliert und bestätigt.

2 Abbildung von Hindernissen

Die globalen Verfahren, die zur automatischen Bestimmung kollisionsfreier Bewegungsbahnen von Robotern angewandt werden, fordern die Abbildung von Hindernissen aus dem kartesisch beschriebenen Arbeitsraum in den Konfigurationsraum, der durch alle Konfigurationsmöglichkeiten des Roboters beschrieben wird. Wegen unterschiedlicher Robo-

tertypen und der Mehrdeutigkeit der inversen Kinematik werden bei vielen Verfahren lange Rechenzeiten benötigt. Im Folgenden wird ein neues Verfahren zur schnellen Abbildung von Hindernissen vorgestellt.

2.1 Fundamentalfläche und Fundamentalhindernisse

Die Fundamentalfläche (fundamental area) eines Roboters ist aus den Eigenschaften des Roboters so zu definieren, daß der Arbeitsraum des Roboters durch ihre regelmäßigen Bewegungen gebildet werden kann. Die Fundamentalfläche eines Roboters PUMA 560 wurde im Bild 1 gezeigt. Die Bereiche dieser Fläche wurden durch Kollisionsfälle angeordnet. Mit einem Hindernis im Bereich 1 kann nur der Unterarm des Roboters kollidieren. Mit einem Hindernis im Bereich 3 kann nur der Oberarm kollidieren. Mit einem Hindernis im Bereich 2 können der Unterarm sowie der Oberarm kollidieren. Im Bereich 4 treten keine Kollisionen zwischen den Armgliedern und einem Hindernis wegen der Endanschläge von Armachsen auf.

Die Fundamentalfläche des Roboters wird weiterhin durch ein Gitter digitalisiert. Die Schnittpunkte des Gitters werden als Fundamentalhindernisse (fundamental obstacles) $\{FO_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$) definiert, die als Fundamentelemente zur Abbildung realer Hindernisse $\{O_i\}$ danach verwendet werden. Im Bild 1 werden drei Fundamentalhindernisse $\{FO_{ia}(880, 0), FO_{ib}(280, 280), FO_{ic}(400, -440)\}$ auf dieser Fläche als Beispiel angeführt. Die Fundamentalhindernisse $\{FO_i\}$ auf der rechten Hälfte dieser Fläche kann man zur Abbildung der linken Konfigurationen verwenden. Die andere Hälfte der Fundamentalhindernisse $\{FO_i\}$ ist zur Abbildung der rechten Konfigurationen zu verwenden.

2.2 Abbildung der Fundamentalhindernisse

Die Abbildung eines Fundamentalhindernisses FO_i in den Konfigurationsraum bedeutet, alle Kollisionsmöglichkeiten, die als Bildmenge $CO_R(FO_i)$ im Konfigurationsraum bezeichnet werden, zwischen den Oberflächen der Armglieder und dem Fundamentalhindernis FO_i zu berechnen. Im Prinzip kann man $CO_R(FO_i)$ dadurch erhalten, daß sich jeder Punkt auf den Oberflächen der Armglieder gemäß der kinematischen Ketten bewegt und er FO_i berührt. Dieses Verfahren ist aber nicht zu verwenden. Ein praktisches Verfahren dazu ist, daß die geometrischen Modelle von Roboterarmen durch Einfachkörper ersetzt und diese Einfachkörper gemäß der kinematischen Ketten um FO_i bewegt werden. Im Bild 2 sind die entsprechenden Bildmengen $\{CO_R(FO_{ia}), CO_R(FO_{ib}), CO_R(FO_{ic})\}$ im Konfigurationsraum dargestellt. Weil FO_{ib} im Bereich 2 liegt, müssen sowohl der Oberarm als auch der Unterarm bei den Berechnungen betrachtet werden. Die Tabellen 1, 2 und 3 sind die tabellarischen Darstellungen von $\{CO_R(FO_{ia}), CO_R(FO_{ib}), CO_R(FO_{ic})\}$. Tatsache ist: je näher ein Fundamentalhindernis auf der Fundamentalfläche am Ursprung liegt, desto größer ist das verbotene Intervall des Roboters.

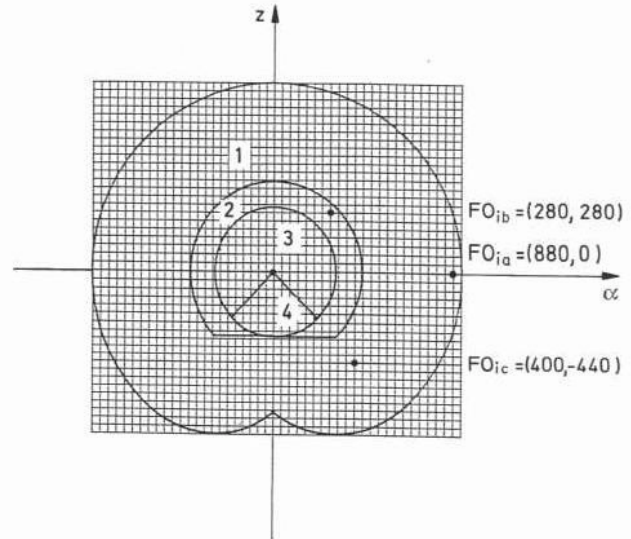


Bild 1. Fundamentalfläche und Fundamentalhindernisse eines Roboters PUMA 560

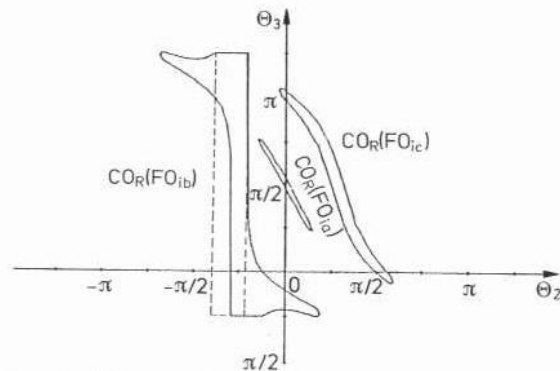


Bild 2. Bildmengen $\{CO_R(FO_{ia}), CO_R(FO_{ib}), CO_R(FO_{ic})\}$ im Konfigurationsraum des Roboters PUMA 560

Die Auswirkungen der Handorientierung auf die Kollisionsmöglichkeiten mit Fundamentalhindernissen $\{FO_i\}$, die von den Handachsen 4, 5 und 6 bestimmt werden, kann man durch einen umhüllenden Einfachkörper mit berücksichtigen, in dem Raum sich Roboterhand und das gegriffene Objekt bewegen. Alle Bildmengen $\{CO_R(FO_i)\}$ können vorher berechnet und abgespeichert werden.

2.3 Abbildung der realen Hindernisse

Bevor reale Hindernisse $\{O_i\}$ in den Konfigurationsraum abgebildet werden, werden die Bewegungsintervalle der Fundamentalfläche berechnet. Beim Roboter PUMA 560 sind die Bewegungsintervalle die Kollisionsintervalle $\cup_j [\theta_{1jmin}, \theta_{1jmax}]$ der ersten Roboterachse. Während sich die Fundamentalfläche in einer festgelegten Richtung in $\cup_j [\theta_{1jmin}, \theta_{1jmax}]$ durch $\{O_i\}$ bewegt, erhält man geschnittene Hindernisse (slice obstacles) $\{S_j O_i\}$ auf dieser Fläche. Die Rahmenkurven von $\{S_j O_i\}$ werden durch die nächsten Fundamentalhindernisse $\{FO_{ik}\}$ angenähert, die außerhalb der

Tabelle 1a und b. Bildmenge $CO_R(FO_{ia})$ a des Unterarmes, b des Oberarmes

a $\theta_1 \in [-2,88, 2,85]$								
θ_2	-24,44	-21,87	-19,30	-14,15	-9,85	-5,47	-3,28	-1,09
θ_3	134,61	126,46	120,94	110,99	102,68	94,07	89,77	85,47
θ_2	1,09	3,96	9,00	12,03	16,72	19,30	21,87	24,44
θ_3	81,17	76,64	66,46	60,70	52,56	48,71	45,59	45,39
θ_2	-24,44	-21,87	-19,30	-16,72	-12,03	-9,00	-3,86	-1,09
θ_3	134,61	134,41	131,29	127,44	119,30	113,54	103,36	98,83
θ_2	1,09	1,29	5,47	9,85	14,15	19,30	21,87	24,44
θ_3	94,53	93,19	85,93	77,32	69,01	59,06	53,54	45,39

b $\theta_1 \in \phi; \theta_2 \in \phi; \theta_3 \in \phi$

Tabelle 2a und b. Bildmenge $CO_R(FO_{ib})$ a des Unterarmes, b des Oberarmes

a $\theta_1 \in [-9,46, 8,69]$								
θ_2	-122,4	-120,5	-118,7	-116,8	-113,0	-110,4	-106,5	-98,10
θ_3	221,81	217,36	215,29	213,72	211,58	209,96	207,67	203,17
θ_2	-94,65	-90,17	-86,68	-81,03	-75,43	-67,05	-61,13	-55,24
θ_3	200,63	196,50	193,89	189,07	183,43	173,11	161,63	109,30
θ_2	-53,38	-14,57	-8,97	-3,32	14,24	20,41	30,53	32,41
θ_3	-45,00	-45,00	-42,20	-40,83	-41,83	-43,20	-44,60	-41,81
θ_2	-122,41	-120,53	-110,41	-104,24	-90,17	-81,03	-75,43	-36,62
θ_3	221,81	224,60	223,20	221,83	220,61	222,20	225,00	225,00
θ_2	-34,76	-28,87	-22,95	-14,57	-8,97	-3,32	-0,17	4,65
θ_3	70,70	18,37	6,89	-3,43	-9,07	-13,89	-16,50	-20,63
θ_2	8,10	16,49	20,41	23,04	26,78	28,66	30,53	32,41
θ_3	-23,17	-27,67	-29,96	-31,58	-33,72	-35,29	-37,36	-41,81

b $\theta_1 \in [-41,76, -9,12]; \theta_2 \in [-70,59, -37,85]; \theta_3 \in [-45,00, 225,00]$

Tabelle 3a und b. Bildmenge $CO_R(FO_{ic})$ a des Unterarmes, b des Oberarmes

a $\theta_1 \in [-6,45, 6,19]$								
θ_2	-10,39	-8,90	-5,92	-1,46	5,684	9,127	14,515	19,358
θ_3	193,14	188,26	183,78	179,61	170,23	166,74	158,86	148,57
θ_2	23,98	28,60	32,49	37,84	44,43	48,82	55,42	64,20
θ_3	140,19	133,80	120,12	97,00	72,76	56,58	35,31	20,60
θ_2	69,14	73,78	78,41	83,50	91,49	99,89	104,35	105,84
θ_3	11,85	6,88	2,93	-1,37	-8,19	-14,18	-15,60	-13,14
θ_2	-10,389	-8,90	-4,43	3,96	11,95	17,05	21,67	26,32
θ_3	193,14	195,60	194,18	188,19	181,37	177,07	173,12	168,15
θ_2	31,25	40,04	46,63	51,02	57,61	62,96	66,85	71,47
θ_3	159,40	144,69	123,42	107,24	83,00	59,88	46,20	39,81
θ_2	76,09	80,94	86,33	89,77	96,91	101,38	104,35	105,84
θ_3	31,43	21,14	13,26	9,77	0,385	-3,78	-8,26	-13,14

b $\theta_1 \in \phi; \theta_2 \in \phi; \theta_3 \in \phi$

Fläche von $\{S_j O_i\}$ liegen. Die entsprechenden Bildmengen $\{CO_R(FO_{ik})\}$ sind in den Datensätzen zu suchen. Durch die Vereinigung

$$CO_R(S_j O_i) = CO_R(FO_{i1}) \cup \dots \cup CO_R(FO_{ik}) \cup \dots \quad (1)$$

$$CO_R(O_i) = CO_R(S_1 O_i) \cup \dots \cup CO_R(S_j O_i) \cup \dots \quad (2)$$

erhält man $\{CO_R(O_i)\}$ im Konfigurationsraum. Diese Abbildung kann sofort bei Verarbeitungen der von Sensoren aufgenommenen Informationen über Hindernisse ausgeführt werden. Bild 3a zeigt einen Roboter und ein Hindernis O_1 in

seinem Arbeitsraum. Das graphische Modell dieses Hindernisses O_1 steht in der Tabelle 4. Das bezügliche Koordinatensystem wird im Bild 3a gezeigt. Bild 3b zeigt die Bildmenge $CO_R(O_1)$ im Konfigurationsraum.

3 Kollisionserkennung der Konfigurationen

Wegen der Mehrdeutigkeit der inversen Kinematik entspricht ein Punkt im Arbeitsraum mehreren Konfigurationen

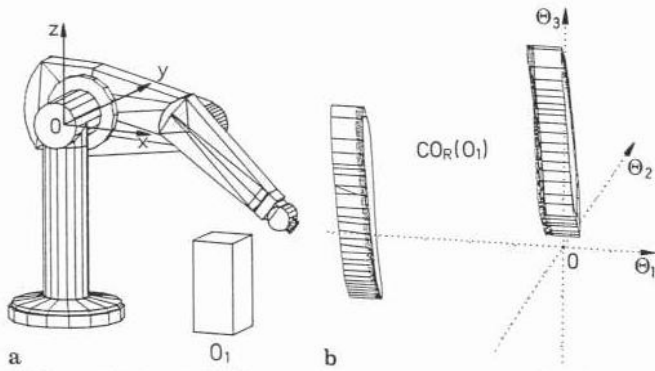


Bild 3. a) Hindernis O_1 im Arbeitsraum des Roboters; b) Bildmenge $CO_R(O_1)$ des Hindernisses O_1 im Konfigurationsraum des Roboters

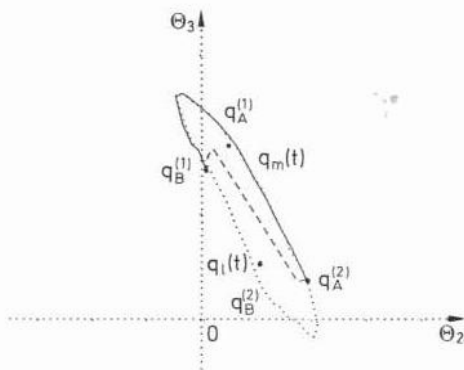


Bild 4. Untermenge von $CO_R(O_1)$, Konfigurationen $\{q_A^{(1,2)}, q_B^{(1,2)}\}$ und Bewegungsbahnen $\{q_l(t), q_m(t)\}$ im Konfigurationsraum

Tabelle 4. Geometrische Daten des Hindernisses O_1

Flächen	Linien	Punkte
S_1 l_1, l_2, l_3, l_4	l_1 p_1, p_2	p_1 $x=520,0, y=-100,0, z=-660,0$
S_2 l_5, l_6, l_7, l_8	l_2 p_2, p_3	p_2 $x=520,0, y=100,0, z=-660,0$
S_3 l_1, l_{10}, l_5, l_9	l_3 p_3, p_4	p_3 $x=680,0, y=100,0, z=-660,0$
S_4 l_2, l_{11}, l_6, l_{10}	l_4 p_4, p_1	p_4 $x=680,0, y=-100,0, z=-660,0$
S_5 l_4, l_{12}, l_8, l_9	l_5 p_5, p_6	p_5 $x=520,0, y=-100,0, z=-360,0$
S_6 l_3, l_{11}, l_7, l_{12}	l_6 p_6, p_7	p_6 $x=520,0, y=100,0, z=-360,0$
	l_7 p_7, p_8	p_7 $x=680,0, y=100,0, z=-360,0$
	l_8 p_8, p_5	p_8 $x=680,0, y=-100,0, z=-360,0$
	l_9 p_1, p_5	
	l_{10} p_2, p_6	
	l_{11} p_3, p_7	
	l_{12} p_4, p_8	

nen des Roboters. Bei Kollisionsberechnungen muß man feststellen, unter welchen Konfigurationen der Roboter nicht mit Hindernissen kollidiert und den gegebenen Punkt erreichen kann.

3.1 Mehrdeutigkeit der inversen Kinematik

Um die Lösung der inversen Kinematik eines Roboters zu ermitteln, wurden viele Arbeiten durchgeführt. [8] hat die

sog. Pieper's Lösung für die inversen Kinematik von Sechsaachsenrobotern gegeben. Man kann die analytischen Gleichungen der inversen Kinematik für einen Sechsaachsenroboter nur erhalten, wenn die Gleichungen der Armachsen 1, 2, 3 und der Handachsen 4, 5, 6 des Roboters voneinander getrennt werden können. [10] hat die Ergebnisse über die Mehrdeutigkeit der inversen Kinematik für solche Roboter mitgeteilt. Ein Roboter kann einen gegebenen Punkt maximal durch 16 Konfigurationen erreichen. Die folgenden kinematischen Gleichungen beschreiben die Beziehungen zwischen einem Punkt im Arbeitsraum und den entsprechenden Konfigurationen eines Roboters PUMA 560 [4]:

$${}^0T(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} {}^0R(\mathbf{q}) & {}^0P(\mathbf{q})_{6ORG} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

$${}^0R(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$${}^0P(\mathbf{q})_{6ORG} = \begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \quad (5)$$

Der Vektor \mathbf{q} besteht aus sechs rotatorischen Freiheitsgraden $\{\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6\}$. Die Rotationsmatrix ${}^0R(\mathbf{q})$ bestimmt die Orientierung der Roboterhand, und der Vektor ${}^0P(\mathbf{q})_{6ORG}$ bestimmt die Position der Roboterhand.

3.2 Kollisionserkennung der Konfigurationen des Roboters

Mit Hilfe von $\{CO_R(O_i)\}$ kann man schnell und deutlich feststellen, unter welchen Konfigurationen der Roboter am zu erreichenden Punkt mit Hindernissen $\{O_i\}$ kollidiert oder nicht. Durch die inversen kinematischen Transformationen werden die entsprechenden Konfigurationen $\{\mathbf{q}^{(k)}\} = \{(\theta_1^{(k)}, \theta_2^{(k)}, \theta_3^{(k)}, \theta_4^{(k)}, \theta_5^{(k)}, \theta_6^{(k)})\}$ für einen Punkt im Arbeitsraum bestimmt. Zur Kollisionserkennung von $\{\mathbf{q}^{(k)}\}$ sind die Beziehungen zwischen $\{\mathbf{q}^{(k)}\}$ und $\{CO_R(O_i)\}$ zu ermitteln. Weil die Auswirkungen der Handachsen auf die Kollisionsmöglichkeiten durch die Umhüllung eines Einfachkörpers betrachtet wurden, braucht man nur die von den Armachsen verursachten Kollisionen zu berücksichtigen. Wenn $\{\mathbf{q}^{(kl)}\} \subseteq \{\mathbf{q}^{(k)}\}$ zu $\{CO_R(O_i)\}$ gehören, dann kollidiert der Roboter nach $\{\mathbf{q}^{(kl)}\}$ mit $\{O_i\}$. Wenn der Roboter die Komplementärmenge $\neg\{\mathbf{q}^{(kl)}\}$ nimmt, treten keine Kollisionen auf. Falls $\neg\{\mathbf{q}^{(kl)}\} = \phi$ ist, dann kann der Roboter diesen gegebenen Punkt wegen $\{O_i\}$ nicht erreichen. Wenn $\{\mathbf{q}^{(k)}\} \notin \{CO_R(O_i)\}$ ist, kann der Roboter durch jede Konfiguration von $\{\mathbf{q}^{(k)}\}$ den gegebenen Punkt ohne Kollisionen erreichen.

Bild 4 stellt die Untermenge der im Bild 3 b gezeigten $CO_R(O_1)$ im $[\theta_{1a}, \theta_{1b}]$ auf der Ebene $\theta_2 O \theta_3$ und die Konfigurationen $\{q_A^{(1,2)}, q_B^{(1,2)}\}$ im linken Konfigurationsraum dar,

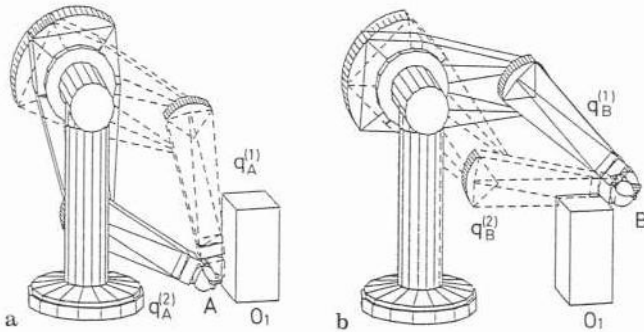


Bild 5. a Konfigurationen $\{q_A^{(1,2)}\}$ am Punkt A; b Konfigurationen $\{q_B^{(1,2)}\}$ am Punkt B

die dem Anfangspunkt A und dem Endpunkt B

$${}^0P_{6(A)} = \begin{pmatrix} 500,0 \\ 110,0 \\ -650,0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$${}^0P_{6(B)} = \begin{pmatrix} 800,0 \\ 90,0 \\ -360,0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

im Arbeitsraum entsprechen. Weil $\{q_A^{(1)}, q_B^{(2)}\}$

$$q_A^{(1)} = \{-4,57, 23,23, 145,84, 0, 0, 0\} \quad (8)$$

$$q_B^{(2)} = \{-4,28, 45,19, 49,93, 0, 0, 0\} \quad (9)$$

zu $CO_R(O_1)$ gehören, kollidiert der Roboter nach $\{q_A^{(1)}, q_B^{(2)}\}$ mit O_1 . Bild 5 zeigt die graphischen Simulationen der Berechnungsergebnisse. Die Konfigurationen des Roboters, die von den durchgezogenen Linien dargestellt werden, repräsentieren, daß der Roboter die Punkte A und B ohne Kollisionen erreichen kann, weil er $\{q_A^{(2)}, q_B^{(1)}\}$

$$q_A^{(2)} = \{-4,57, 82,79, 34,16, 0, 0, 0\} \quad (10)$$

$$q_B^{(1)} = \{-4,28, 2,55, 130,47, 0, 0, 0\} \quad (11)$$

$\notin CO_R(O_1)$ einnimmt. Die Darstellung der gestrichelten Linien zeigt, daß der Roboter an den Punkten A und B mit O_1 kollidiert, weil er $\{q_A^{(1)}, q_B^{(2)}\} \in CO_R(O_1)$ nimmt. Der Roboter nimmt $\{q_A^{(2)}, q_B^{(1)}\}$ in weiteren Diskussionen ein. Die Untersuchungen der Kollisionen im rechten Konfigurationsraum sind ähnlich zu behandeln.

4 Kollisionserkennung der Bewegungsbahnen

Nach den Aufgaben werden Bewegungsbahnen des Roboters vom Anfangspunkt bis zum Endpunkt erzeugt. Bei Bewegungen des Roboters müssen die erzeugten Bewegungsbahnen daraufhin untersucht werden, ob der Roboter bei Bewegungen mit Hindernissen kollidiert.

4.1 Erzeugung der Bewegungsbahnen

In [1] wurde ein Verfahren zur Erzeugung einer Bewegungsbahn zwischen dem Anfangspunkt A und dem Endpunkt B

vorgelegt. Zuerst sind die Konfigurationen vom Anfangspunkt A und dem Endpunkt B durch die kinematische Kette zu bestimmen. Dann sucht man ein kubisches Polynom im Konfigurationsraum als Bewegungsbahn des Roboters:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (12)$$

Durch die folgenden Grenzbedingungen kann man die Parameter $\{a_0, a_1, a_2, a_3\}$ bestimmen.

$$\begin{cases} q(t_A) = q_A \\ q(t_B) = q_B \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \dot{q}(t_A) = 0 \\ \dot{q}(t_B) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

[7] und [9] haben die Verfahren zur Erzeugung linearer Bewegungsbahnen gezeigt. Diese Verfahren beruhen auf der Interpolation von genügenden Zwischenpunkten auf der linearen Bahn zwischen dem Anfangspunkt A und dem Endpunkt B. Die Konfigurationen dieser Zwischenpunkte wurden durch die inversen kinematischen Ketten berechnet. Wenn der Roboter unter diesen Konfigurationen läuft, erzeugt er eine approximative lineare Trajektorie (Bild 6 a).

4.2 Kollisionserkennung der Bewegungsbahnen des Roboters

Eine Bewegungsbahn des Roboters ist durch $q(t)$ im Konfigurationsraum darzustellen. Die Kollisionsmöglichkeiten auf der Bewegungsbahn $q(t)$ kann man durch die Schnittmengen $q(t) \cap \{CO_R(O_i)\}$ feststellen. Wenn $q(t) \cap \{CO_R(O_i)\} = \emptyset$ sind, ist die gegebene Bewegungsbahn $q(t)$ kollisionsfrei. Wenn $q(t) \cap \{CO_R(O_i)\} \neq \emptyset$ sind, ist sie nicht kollisionsfrei. Der Roboter kollidiert mit $\{O_i\}$ nach $q(t) \cap \{CO_R(O_i)\} \neq \emptyset$. Bild 4 zeigt diese Untersuchung. Die Bahn

$$q_i(t) = \{q_1, q_2, q_3, q_4, q_5\}$$

$$q_1 = \{-4,571, 82,79, 34,16, 0, 0, 0\} \quad (15)$$

$$q_2 = \{-4,456, 76,24, 32,63, 0, 0, 0\} \quad (16)$$

$$q_3 = \{-4,396, 8,734, 145,36, 0, 0, 0\} \quad (17)$$

$$q_4 = \{-4,333, 4,771, 139,5, 0, 0, 0\} \quad (18)$$

$$q_5 = \{-4,283, 2,551, 130,07, 0, 0, 0\} \quad (19)$$

(die gestrichelten Kurven im Bild 4) repräsentiert die lineare Bewegungsbahn vom Punkt A bis B im Konfigurationsraum. Bild 6 a zeigt die Simulation der Roboterbewegung. Hier wird sehr deutlich, daß der Roboter mit dem Hindernis O_1 kollidiert, wenn er auf der linearen Bahn fährt, weil $q_i(t) \cap CO_R(O_1)$ überquert.

5 Bestimmung kollisionsfreier Bahnen

Die Hauptaufgabe bei Kollisionsberechnungen ist, eine kollisionsfreie Bewegungsbahn automatisch zu bestimmen, wenn eine gegebene Bewegungsbahn nicht kollisionsfrei ist. Wenn $q_i(t) \cap \{CO_R(O_i)\} \neq \emptyset$ sind, kollidiert der Roboter

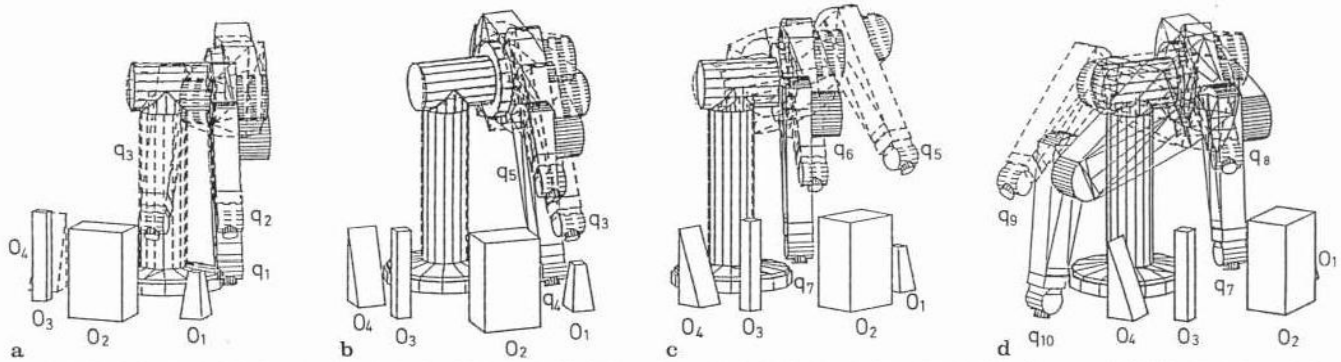


Bild 8a–d. Animation der Roboterbewegungen auf der kollisionsfreien Bahn $q_m(t)$; **a** die Konfigurationen $\{q_1, q_2, q_3\}$; **b** die Konfigurationen $\{q_3, q_4, q_5\}$; **c** die Konfigurationen $\{q_5, q_6, q_7\}$; **d** die Konfigurationen $\{q_7, q_8, q_9, q_{10}\}$

wurden im Bild 7b mit den dickeren Kurven dargestellt. Bild 8a zeigt die ersten drei Konfigurationen. Der Roboter fährt vom Punkt A ab und umgeht das Hindernis O_1 . Bild 7b zeigt, daß der Roboter den Punkt B erreicht und ihn verläßt. Im Bild 8c umgeht der Roboter das Hindernis O_2 und erreicht den Punkt C. Im Bild 8d verläßt der Roboter den Punkt C, umgeht die Hindernisse O_3 und O_4 , und erreicht den letzten Punkt D. Bei dem ganzen Vorgang der Roboterbewegungen treten keine Kollisionen auf.

7 Ausblick

Das beschriebene Verfahren ist nicht durch Robotertypen begrenzt, da man die Fundamentalfläche und die Fundamentalhindernisse für alle Roboter definieren kann. Bei der on-line Kollisionsberechnung sind die Sensoren einzusetzen. Bei Verarbeitungen der aufgenommenen Informationen sind die Hindernisse in den Konfigurationsraum sofort abzubilden, und globale kollisionsfreie Bahnen automatisch zu bestimmen.

Die Abbildung von Hindernissen auf der Basis der Fundamentalfläche und Fundamentalhindernisse ist ein neues mathematisches Modell. Eine weitere Arbeit ist die vertiefte Untersuchung der Fundamentalhindernisse. Zumindest kann man die Fundamentalhindernisse auf eine Fundamentalachse reduzieren, um die besetzten Speicherplätze zu vermindern.

Literatur

1. De Boor, C.: A practical guide to splines. New York Berlin Heidelberg: Springer 1978
2. Freund, E.; Hoyer, H.: Roboterforschung: Entwicklung zu neuen Anwendungsbereich. Proc. 4. Europäische Kongreßmesse für Technische Automation (Komm-Tech) Essen 1987
3. Hörmann, K.: Ein Verfahren zur Planung kollisionsfreier Bahnen für Industrieroboter. Diss. Universität Karlsruhe 1987
4. Craig, J.: Introduction to robotics mechanics and control. Massachusetts: Addison-Wesley 1986
5. Lozano-Perez, T.: Spatial planning: A configuration space approach. IEEE Trans. Comput. c-32 1983
6. Lozano-Perez, T.: A simple motion – planning algorithm for general robot manipulators. IEEE J. Robotics Automation RA-3 (1987)
7. Paul, R. P.; Zong, H.: Robot motion trajectory specification and generation. 2nd Int Sym on Robotics Research, Kyoto, Japan, August 1984
8. Pieper, D.: The kinematics of manipulators under computer control. Ph.D. Thesis, Stanford University, 1968
9. Taylor, R.: Planning and execution of straight line manipulator trajectories in robot motion. Bray et al. (eds) Cambridge: MIT press 1983
10. Tsai, L.; Morgan, A.: Solving the kinematics of the most general six- and five-degree-of-freedom manipulators by continuation methods. Paper 84-DET-20, ASME Mechanisms Conference, Boston, Massachusetts, October 7–10, 1984

Wei Li, M. Sc.

Lehrstuhl für Systemtheorie der Elektrotechnik
Universität des Saarlandes
W-6600 Saarbrücken 11, BRD

Eingegangen am 12. April 1990