

Bildbasierte Kollisionstests für Randomized-Roadmap-Bahnplaner

D. Henrich, T. Gecks, D. Ebert, Lehrstuhl für Angewandte Informatik III (Robotik und Eingebettete Systeme) Universität Bayreuth, D-95440 Bayreuth, {dominik.henrich|thorsten.gecks}@uni-bayreuth.de, dirk.ebert@dirk-ebert.de, <http://ai3.inf.uni-bayreuth.de/de/>

Kurzfassung

Es werden bildbasierte Kollisionstests für Randomized-Roadmap-Planer verglichen. Ein Kollisionstest wird vorgestellt, der das durch den Roboter überstrichene Volumen (Swept-Volume) entlang einer Punkt-zu-Punkt(PTP)-Bewegung auf Kollisionen überprüft. Das überstrichene Volumen wird mit Hilfe einer Bounding Box approximiert. Der Kollisionstest arbeitet bildbasiert in einem Kamera-überwachten Arbeitsraum. [Schlüsselwörter: Bahnplanung, Swept-Volume, Bounding Box, Randomized Roadmap, bildbasiert, sensorbasiert]

1. Einleitung

Aus Sicherheitsgründen müssen zur Zeit die Arbeitsräume von Industrierobotern und Menschen durch Schutzeinrichtungen getrennt werden. Dies kommt daher, dass die Roboter ihre Umwelt nicht wahrnehmen können. Für viele Bereiche ist es wünschenswert, Mensch und Roboter im selben Arbeitsraum arbeiten zu lassen, beispielsweise in der kooperativen Montage/Demontage.

Die für einen Menschen im Arbeitsraum gefährlichste Bewegung ist die freie Transferbewegung, denn dabei werden große Distanzen schnell zurückgelegt. Die betrachtete Aufgabe besteht daher darin, die Transferbewegungen eines Roboters kollisionsfrei durchzuführen. Von einer gegebenen Startkonfiguration aus soll der Roboter auf einer möglichst kurzen, kollisionsfreien Bahn in eine gegebene Zielkonfiguration fahren.

Diese Bahn und die Kollisionsdetektion soll möglichst effizient online berechenbar sein, um hohe Geschwindigkeiten und sichere Bewegungen zu ermöglichen.

Kapitel 2 behandelt den für die Zielstellung relevanten Stand der Forschung, Kapitel 3 gibt einen Überblick über das realisierte Prototypsystem und Kapitel 4 stellt das Konzept des Swept-Volume-Kollisionstest dar. Kapitel 5 schließlich präsentiert experimentelle Ergebnisse und bietet damit die Grundlage für die abschließende Diskussion und Zusammenfassung in Kapitel 6.

2. Stand der Forschung

Für viele Bahnplaner (z.B. A*-Bahnplaner) ist es notwendig, den Konfigurationsraum zu diskretisieren. Für Industrieroboter mit einer hohen Anzahl von Freiheitsgraden ergeben sich hochdimensionale Konfigurationsräume und daraus eine große Anzahl von diskreten Konfigurationen. In [4] wurde eine Untersuchung von Bahnplanern mithilfe von Bahnplaner-Benchmarks durchgeführt und die besondere Eignung der Randomized-Roadmap-Bahnplaner (vgl. z.B. [11]) für hochdimensionale Konfigurationsräume ermittelt. Dieser Bahnplaner überprüft aufgrund seines Algorithmus' oft lange Bahnen im Konfigurationsraum. Für raumgreifende Roboterbewegungen wird daher ein effizienter Kollisionstest benötigt, der den Aufwand für den Test jeder einzelnen Konfiguration entlang der diskreten Bahn reduziert.

Eine mögliche Methode besteht darin, das vom Roboter auf seiner Bahn überstrichene Volumen zu berechnen und den Kollisionstest für dieses Volumen durchzuführen. Für die Berechnung von überstrichenen Volumen stellt [1] ein speziell auf Roboterbewegungen optimiertes Verfahren vor, welches die Oberfläche des tatsächlich überstrichenen Volumen mittels eines triangulierten Polyeders approximiert. Über die Definition eines maximalen Fehlers ε zur exakten Oberfläche wird die Rechenintensität des Verfahrens beeinflusst. Dieses Verfahren ist für praktische Anwendungen sehr rechenintensiv und verlangt viele Zwischenschritte vom Start zum Ziel der Bewegung.

Eine andere Methode beruht auf der Vergrößerung der Robotergeometrie [2]. Damit kann die Anzahl der Zwischenschritte reduziert und die Berechnung der triangulierten Oberfläche vermieden werden. Bei diesem Verfahren wird der Roboter in jeder Richtung um d Einheiten vergrößert, sodass keine Hinderniskollision auftreten kann, wenn sich jeder Punkt des Roboters maximal um $2d$ Einheiten bewegt. Diese grobe Abschätzungen führt zu einer hohen Anzahl an Kollisionstests oder einem stark erweiterten Robotermodell. In [3] wird dieses Verfahren daher verändert, indem eine Reihe von getesteten Konfigurationen zusammengeführt wird und für diese eine konvexe Hülle berechnet wird. Dabei wird der

Roboter ebenfalls vergrößert, um die Fehler zu kompensieren, die durch die linearisierte Bewegung entstehen.

Hier wird das überstrichene Volumen durch eine Bounding Box approximiert, um den Berechnungsaufwand zu verringern. Dieses Konzept wird in Kapitel 4 vorgestellt.

3. Konzept des Gesamtsystems

Im folgenden wird zunächst ein Überblick über die wesentlichen Komponenten des Gesamtsystems gegeben, beginnend mit einer Beschreibung der Hardware (Kapitel 3.1), über die Beschreibung notwendiger, vorbereitender Schritte (Kapitel 3.2), bis zum Datenfluss innerhalb der Software (Kapitel 3.3, 3.4).

3.1 Systemaufbau

Die Roboterzelle wird von mehreren, stationär montierten Grauwert-Kameras überwacht. Jede einzelne überblickt den gesamten Arbeitsraum des Roboters. Die Bilddaten werden durch einen Standard-PC mit Hilfe mehrerer Framegrabber verarbeitet. Zusätzlich erhält dieser PC über eine Netzwerkverbindung Kontakt zur Robotersteuerung, um Bewegungsbefehle zu übermitteln und die aktuelle Position des Roboters abzufragen.

Die Software auf dem PC berechnet einen Pfad um erkannte Hindernisse für eine durch die Robotersteuerung vorgegebene Start/Ziel-Kombination. Zur Erkennung der Hindernisse wird ein Differenzbildverfahren verwendet. Darauf aufbauend liefert ein bildbasierter Kollisionstest die Grundlage für die eingesetzten Planungsverfahren [5, 6, 7, 8].

3.2 Referenzbilderstellung

Das Differenzbildverfahren beruht auf einem Vergleich der Bilddaten eines Kamerabildes zu einem Referenzbild der Arbeitszelle. Die Referenzbilder sollen nur die statischen Objekte der Zelle enthalten. Daher muss der Roboterarm in einem vorbereitenden Schritt aus ihnen eliminiert werden.

Der Roboter wird dazu in unterschiedliche Positionen gebracht, im aktuellen System sind dies drei Positionen pro Kamera. Aus diesen Bildern wird für jedes Pixel der Median der aufgenommenen Werte berechnet. Dadurch wird das Bild des Roboters bis auf seine unbewegliche Basis aus den Bildern entfernt. Der Roboter darf sich dabei in den gewählten Positionen im Bild bis auf seine Basis nicht überlappen. Da der Roboter sich auf einer festen Bahn bewegt muss in diesem Schritt eine Kollisionsfreiheit dieser Bahn garantiert sein. Auch müssen die Kamerabilder bis auf den Roboterarm statisch sein, d.h. die Arbeitszelle muss in dieser Zeit unverändert bleiben.

3.3 Differenzbildberechnung

Die aktuell aufgenommenen Grauwertbilder werden gleichmäßig in Kacheln segmentiert. Für jede Kachel werden aus den enthaltenen Pixeln Merkmale berechnet (Bild 1 a,b). Die Unterteilung in Kacheln und Merkmalsberechnung wird in gleicher Art und Weise auch für das Referenzbild durchgeführt (Bild 1 c,d). Die absoluten Merkmalsdifferenzen werden als Eingabe für eine Klassifizierungsfunktion verwendet, die eine Kachel als Vordergrund klassifiziert, wenn signifikante Unterschiede zum Referenzbild auftreten, ansonsten wird die Kachel als Hintergrund klassifiziert. Die Vordergrundpixel werden den Hindernissen und dem Roboter zugerechnet. Für die Klassifikation wurden verschiedene lineare und statistische Klassifikatoren untersucht. Die Erkennungsrate lag für eine Benchmark-Umgebung bei 97% korrekter Klassifikation [10].

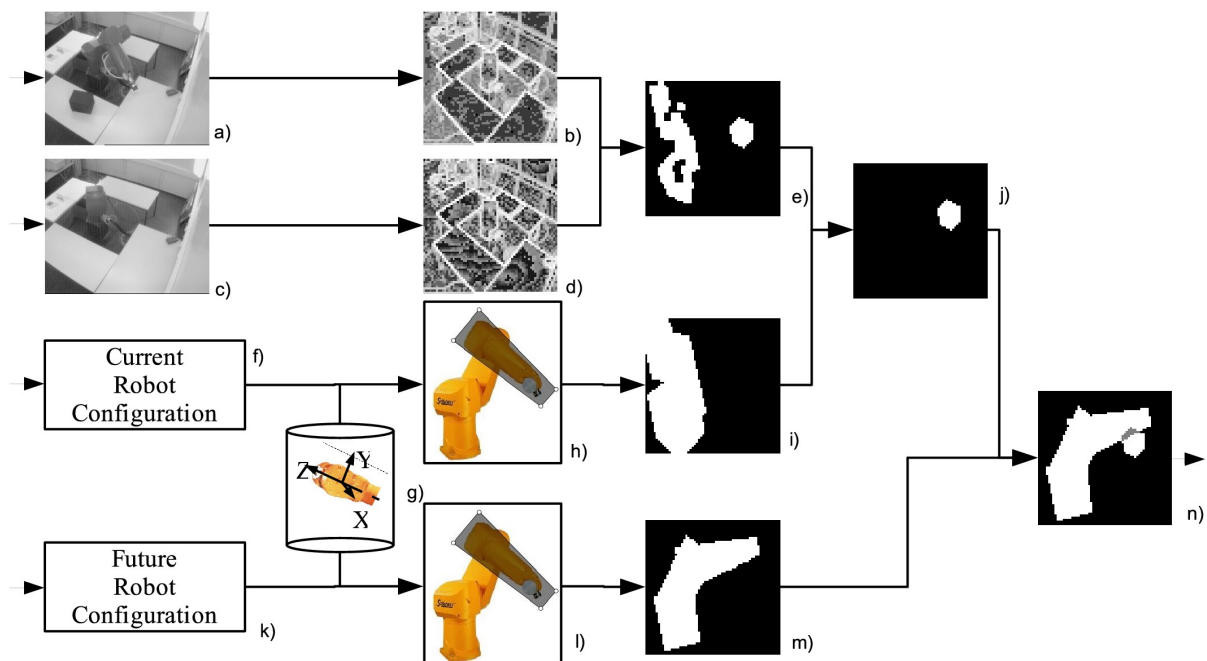


Bild 1: Datenfluss mit simplifizierten Teilschritten (keine Iterationen dargestellt)

3.4 Bahnplanung

Die Bahnplanung baut auf einem bildbasierten Kollisionstest auf. Dabei wird zunächst der Roboter aus dem aktuellen Differenzbild eliminiert, um ein reines Hindernisbild zu erhalten. Mit Hilfe eines Robotermodells wird dazu ein Abbild des Roboters für jede Kamera berechnet (Bild 1 f,g,h,i). Dieses Bild wird verwendet, um den Roboter im aktuellen Differenzbild zu maskieren, sodass das aktuelle Hindernisbild resultiert (Bild 1 j).

Die Bahnplanung findet im Konfigurationsraum des Roboters statt. Um für eine geplante Roboterposition eine Aussage über die Kollision mit Umweltobjekten treffen zu können, wird mit Hilfe des Robotermodells ein Abbild dieser Position errechnet (Bild 1 k,g,l,m). Die

Vordergrundpixel dieses Bildes werden auf eine Schnittmenge mit den Pixeln des Hindernisbildes überprüft für jede der vorhandenen Kameras. Übersteigt die Anzahl der nichtleeren Schnittmengen einen bestimmten Schwellwert, gilt die Position als kollisionsbehaftet.

4. Swept-Volume-Kollisionstest

Der verwendete Randomized-Roadmap-Bahnplaner benötigt für lineare, unterschiedlich lange Bewegungen des Roboters im Konfigurationsraum eine Aussage über die Kollision mit Hindernissen. Der in Kapitel 3.4 vorgestellte positionsorientierte Kollisionstest wird daher auf beliebige PTP-Bewegungen des Roboters erweitert.

Das hier vorgestellte Verfahren berechnet die Extremwerte der Raumdimensionen für im Vorfeld bestimmte Punkte des Roboters. Diese Extremwerte werden zur Bestimmung einer Bounding Box herangezogen, die das überstrichene Volumen des Roboters umfasst. Diese Bounding Box wird auf die Kamerabilder abgebildet und auf Schnittmengen mit Hindernispixeln getestet. Wird eine Kollision detektiert, wird die Bahn zweigeteilt und die Bounding Box rekursiv für diese Teilstücke berechnet, da die Bahn kollisionsfrei sein kann wenn die Hindernisse innerhalb der Bounding Box liegen, jedoch nicht in dem tatsächlich vom Roboter überstrichenen Volumen (siehe Bild 2 als Beispiel für den zwei-dimensionalen Fall).

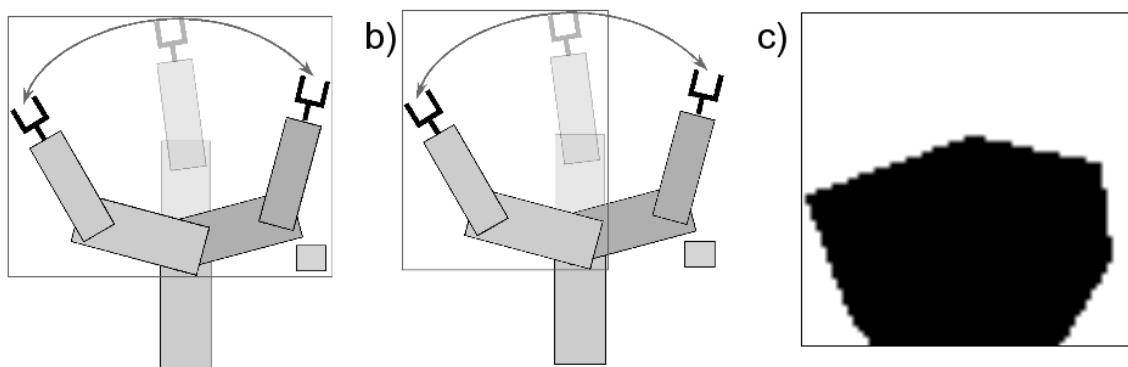


Bild 2: Rekursive Aufteilung der Bahnberechnung. a) Die Bounding Box (grauer Rahmen) enthält ein Hindernis (graues Rechteck); b) Die Roboterbahn wurde rekursiv aufgeteilt, für eine der beiden entstehenden Bounding Boxes liegt damit keine Kollision vor, die andere muss weiter unterteilt werden; c) Die Projektion einer Bounding Box in ein Kamerabild (invertiert dargestellt)

Die gewählten Punkte des Roboters sind die Eckpunkte eines Skelettmodells, das auf den Denavit-Hartenberg-Koordinatensystemen des Roboters aufbaut [9]. Die Punkte liegen

damit innerhalb des Roboterkörpers. Die berechneten Extremwerte werden daher noch um die abgeschätzte Distanz zur Roboterhülle erweitert (Bild 3).

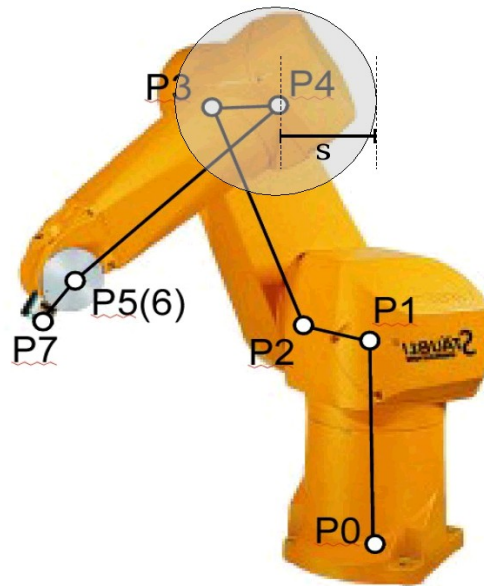


Bild 3: Skelettmodell (die Extremwerten jedes Punktes werden um eine punktspezifische Größe s erweitert, im Bild symbolisiert durch eine Kugel um $P4$)

Die Bewegungsgleichung für eine bestimmte Raumdimension ergibt sich aus der jeweiligen Koordinatengleichung der homogenen Matrix des Roboterpunktes und ist im allgemeinen eine komplizierte Kombination aus trigonometrischen Funktionen. Da die untersuchte Bewegung im Konfigurationsraum linear ist, ist die Bewegungsgleichung nur von einem Parameter t abhängig (siehe Gleichung 1).

$$D_{P_i} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & X_i(\Phi_1(t), \dots, \Phi_6(t)) \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & Y_i(\Phi_1(t), \dots, \Phi_6(t)) \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & Z_i(\Phi_1(t), \dots, \Phi_6(t)) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Die Ableitung dieser trigonometrischen Gleichung wird mit Hilfe einer Taylorreihe approximiert. Aus den Nullstellen der resultierenden Polynomgleichung werden die Extremwerte für den Parameter t berechnet und die Bounding Box mit den daraus berechneten Koordinatenwerten entsprechend angepasst. Je nach Zuordnung der Skelettpunkte zu einer Bounding Box und je nach Anzahl dieser Punkte lässt sich die Approximation des tatsächlich überstrichenen Volumens verbessern. Es kann z.B. die Bounding Box für den gesamten Roboter berechnet werden oder jeweils eine Bounding Box für jedes Glied usw., wobei der Berechnungsaufwand mit dem Detaillierungsgrad steigt.

Die rekursive Aufteilung der Bahn ist bis zu einer minimalen Streckenlänge im Konfigurationsraum beschränkt. Tritt auf der untersten Stufe weiterhin eine Kollision auf, so wird die Bewegung als kollisionsbehaftet angesehen.

5. Experimente

Für die Experimente werden zwei unterschiedlich große Arbeitsräume betrachtet. Die Anzahl der diskreten Konfigurationen bleibt in beiden Fällen gleich, wodurch in dem kleinen Arbeitsraum eine feinere Diskretisierung erreicht wird. Zusätzlich wird noch zwischen der Existenz oder Nicht-Existenz eines Hindernisses im Planungsraum unterschieden. Diese Hindernisse sind statisch.

Die Versuchsergebnisse (Tabelle 1) machen deutlich, dass der Swept-Volume-Kollisionstest vor allem in freien Arbeitsräumen ohne Hindernisse eine Effizienzsteigerung bieten kann. Hindernisse im Arbeitsraum führen jedoch bei diesem Kollisionstest zu eventuell notwendigen rekursiven Kollisionstestaufrufen. Im kleinen Arbeitsraum führt ein Hindernis zu einer höheren Zahl an kollisionsbehafteten Konfigurationen als dasselbe Hindernis in einem großen Arbeitsraum. Dadurch tritt eine erhöhte Anzahl an notwendigen Rekursionen auf, die dazu führen, dass der Swept-Volume-Kollisionstest relativ zu dem Einzelschrittkollisionstest eine längere Berechnungsdauer besitzt. Im schlechtesten Fall führt der Swept-Volume-Kollisionstest $2n-1$ bildbasierte Tests aus bei einer Bahnlänge von n diskreten Positionen.

Tabelle 1: Relative Laufzeit verwendeter Kollisionstests

	Kleiner Arbeitsraum		Großer Arbeitsraum	
	Mit Hindernis	Ohne Hindernis	Mit Hindernis	Ohne Hindernis
Einzelschritt-kollisionstest	100%	100%	100%	100%
Swept-Volume-Kollisionstest	127,2%	15,5%	26,5%	5,8%

6. Zusammenfassung

Für Randomized-Roadmap-Bahnplaner im Konfigurationsraum werden Kollisionstests benötigt, die eine beliebige PTP-Bewegung des Roboters effizient testen. Der vorgestellte Ansatz berechnet eine Bounding Box für das durch den Roboter überstrichene Volumen und testet diese bildbasiert auf Kollisionen mit der durch visuelle Sensoren gelieferten aktuellen Hindernissituation. Der Ansatz bietet eine höhere Effizienz im Vergleich zu schrittweisen Verfahren für hindernisfreie Arbeitsräume. Wenn Hindernisse existieren, bzw. auftauchen, ist es je nach Größe des Arbeitsraumes und Diskretisierung sinnvoll, dynamisch auf einen anderen Kollisionstest umzuschalten oder langsamer zu verfahren.

7. Literatur

- [1] S. Abrams, P. K. Allen: "Computing Swept Volumes for Sensor Planning Tasks", Center for Research in Intelligent Systems, Columbia University, in Proceedings of 23rd Image Understanding Workshop, San Francisco, 1994
- [2] B. Baginski: "Efficient Dynamix Collision Detection using Expanded Geometry Models", AG Echtzeitsysteme und Robotik, TU München, in Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), München, 1997
- [3] B. Baginski: "Motion Planning for Manipulators with Many Degrees of Freedom - The BB-Method", Dissertation, AG Echtzeitsysteme und Robotik, TU München, 1999
- [4] M. Heintz: "SIMERO : Implementierung und Vergleich von Bahnplanungsverfahren im Konfigurationsraum", Projektarbeit, AG Eingebettete Systeme und Robotik (RESY), Universität Kaiserslautern, 2003
- [5] Ebert, D., Henrich, D.: „Safe Human-Robot-Cooperation: Problem Analysis, System Concept and Fast Sensor Fusion" In: IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, pp. 239-244, Baden-Baden, Germany, August 20 - 22, 2001
- [6] Ebert, D., Henrich, D.: „SIMERO - Sicherheitsstrategien für die Mensch-Roboter-Kooperation" In: „OTS-Systeme in der Robotik – Roboter Ohne Trennende Schutzeinrichtungen“, Reihe BKM Berichte, Herbert Utz Publishing, pp. 5.1-5.17, München, June 25 2002
- [7] Ebert, D., Henrich, D.: „Safe Human-Robot-Cooperation: Image-based collision detection for Industrial Robots" In: IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1826-1831, Lausanne, October 2 - 4, 2002
- [8] Ebert, D., Henrich, D.: „SIMERO - Sichere Mensch-Roboter-Koexistenz“, In: „2. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik – Mensch und Roboter ohne trennende Schutzsysteme“, Stuttgart, June 24 2003
- [9] Gecks, T.: „SIMERO - Erzeugung von flüssigen, schnellen Roboterbewegungen“, Diploma Thesis, Informatics Faculty, University of Kaiserslautern, Germany, 2003
- [10] Heinzen, F.: „SIMERO – Robuste und Schnelle Erzeugung von Silhouetten aus Grauwertbildern“, Diploma Thesis, Informatics Faculty, University of Kaiserslautern, Germany, 2003
- [11] Yu Y., Gupta K.: „Sensor-Based Roadmaps for Motion-Planning for Articulated Robots in Unknown Environment: Some Experiments with an Eye-in-hand System“. In: IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1707-1714, 1999.