ETH zürich

ETH Library

Modellgestützte, mehrdimensionale, inverse Interpolation zur effizienten Verbesserung der Positionier- und Orientierungsgenauigkeit von Industrierobotern

Doctoral Thesis

Author(s):
Ghazvini, Masoud

Publication date:
1996

Permanent link:
https://doi.org/https://doi.org/10.3929/ethz-a-001696091

Rights / license:
In Copyright - Non-Commercial Use Permitted

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Diss. ETH Nr. 11889

Modellgestützte, mehrdimensionale, inverse Interpolation zur effizienten Verbesserung der Positionier- und Orientierungsgenauigkeit von Industrierobotern

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels
DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von
MASOUD GHAZVINI
Dipl. Informatik-Ing. ETH
geboren am 31. Dezember 1966
von Winterthur ZH

Angenommen auf Antrag von
Prof. Dr. G. Schweitzer, Referent
Prof. Dr. W. Gander, Korreferent

1996

Kurzfassung

Es wird untersucht, wie sich Interpolationstechniken zur recheneffizienten Verbesserung der Positionier- und Orientierungsgenauigkeit von sechsachsigen, nichtredundanten Industrierobotern für den gesamten Roboterarbeitsraum einsetzen lassen. Als Rechenzeit für die hierbei relevante Rückwärtstransformation wird 1 Millisekunde und als Positionier- und Orientierungsgenauigkeit die Wiederholgenauigkeit des Roboters angestrebt. Alle Lösungen (Gelenkkonfigurationen) der Rückwärtstransformation sollen bestimmbar sein. Auf die Verwendung externer Sensorik wird aus Kosten- und Rechenzeitgründen verzichtet.

Eine wesentliche Motivation für die Untersuchung von Interpolationstechniken besteht darin, dass bis anhin, trotz vieler Anläufe, kein Interpolationsverfahren entwickelt worden ist, welches für den gesamten Arbeitsraum und für alle Gelenkkonfigurationen die Anforderungen an die Genauigkeit und die Rechenzeit erfüllt.

Als Interpolationstechnik wird eine bezüglich der Genauigkeit verbesserte lokale Interpolation mit radialen Basisfunktionen eingesetzt. Diese zeichnet sich durch ihre inhärente Parallelisierbarkeit aus. Auf diese kann man aber verzichten. Denn die Rückwärtstransformation lässt sich für einen Industrieroboter Puma 560 auch unter Berücksichtigung von nichtgeometrischen Effekten wie Gelenkelastizität und Getriebespiel mit einem PowerPC 604 Prozessor und mit dem verwendeten Interpolationskonzept bereits innert 0.13 Millisekunden berechnen. Zur Erreichung der geforderten Positionier- und Orientierungsgenauigkeit benötigt man für die Interpolationstabelle nur 610 KByte Hauptspeicher.

Die sehr guten Rechenzeiten und der geringe Hauptspeicherbedarf sind unter anderem die Konsequenz einer Reduktion der ursprünglich unstetigen, 6-dimensionalen Rückwärtstransformation auf ein kinematisch äquivalentes, stetiges, 4-dimensionales Ersatzproblem, welches einfach interpolierbar ist. Der Kern dieses Ersatzproblems besteht in der zunächst paradox erscheinenden Interpolation der Vorwärtstransformation. Für den Erfolg ist hierbei auch wichtig, dass nicht die Funktionswerte der Vorwärtstransformation sondern lokal genaue Starrkörpermodelle als Stützwerte verwendet werden.

Diese lokalen Starrkörpermodelle besitzen die Eigenschaft, dass deren Rückwärtstransformation analytisch geschlossen und daher äusserst effizient berechenbar ist. Auf dieser Grundlage lässt sich die gesuchte, im gesamten Arbeitsraum gültige Rückwärtstransformation des Industrieroboters durch eine mehrdimensionale, modellbasierte, inverse Interpolation berechnen.

Der Interpolationsansatz wird im Hauptteil der Arbeit in eine neue Kalibrierungsmethode, die verteilte Kalibrierung, integriert. Hierbei baut die Methode auf den Vorteilen - Genauigkeit und geringe Anzahl benötigter Messpunkte - bisheriger, komplexer Kalibrierungstechniken auf und ergänzt sie durch eine recheneffizient durchführbare Vorwärts- und Rückwärtstransformation.

Der direkte Vergleich mit zwei wichtigen, modellbasierten Verfahren zur Berechnung der Rückwärtstransformation zeigt eine deutliche Überlegenheit der verteilten Kalibrierung insbesondere in der Umgebung von Robotersingularitäten auf. Gleichzeitig lässt sich ein 50-prozentiger Rechenzeitvorteil beobachten.

Die verteilte Kalibrierung wurde in eine objektorientierte Robotermodellbibliothek eingebettet. Dadurch lässt sich ein mit der verteilten Kalibrierung bestimmtes Robotermodell genauso einfach wie ein mit herkömmlichen Techniken bestimmtes Modell anwenden.

Die Arbeit stellt in bezug auf die Anwendung von Approximations- und Interpolationstechniken insofern einen Durchbruch dar, als erstmals Interpolationsverfahren rechen- und speichereffizient für den gesamten Arbeitsraum zur Berechnung der Rückwärts- und Vorwärtstransformation von 6-achsigen, nichtredundanten Industrierobotern eingesetzt werden können, wobei alle Lösungen der Rückwärtstransformation bestimmbar bleiben.

Abstract

It is investigated how interpolation techniques can be applied to the runtime-efficient improvement of the absolute position and orientation accuracy of a six-axis non-redundant industrial robot while the full workspace of the robot is considered and the computation of all the possible solutions of the inverse transformation is required. The inverse transformation has to be computed within 1 millisecond. For the absolute position and orientation accuracy the robot's repeatability is demanded. External sensors are avoided due to the high costs and the additional runtime burden.

One of the main motivations to explore interpolation techniques is the lack of interpolation-based solutions which can be applied for the full workspace and which determine all inverse transformation solutions without violating the requirements for accuracy and runtime.

The local interpolation is performed with radial basis functions, which has been improved with respect to its accuracy. This technique is suited for an implementation on a parallel computer system. But this is not necessary because using the new interpolation technique the inverse transformation of a Puma 560 industrial robot is computed within 0,13 milliseconds on a PowerPC 604. This is also true if nongeometric effects such as joint elasticity and gear backlash are taken into account. To fulfil the required position and orientation accuracy only 610 Kbytes of main memory are needed for the interpolation table.

The very good runtimes and the low main-memory requirements are the result of a new technique. This technique reduces the original discontinuous 6-dimensional inverse transformation to a continuos 4-dimensional alternative, but kinematically equivalent problem which can be interpolated easily. The core of this alternative problem consists in the interpolation of the forward transformation which may appear paradoxical at the first glance. Important for the success of the new method is also the fact that locally accurate rigid-body models are used to generate the interpolation table instead of the function values of the forward transformation.

These local rigid-body models have the property that a closed form solution exists for its inverse transformation, which therefore can be computed efficiently. Based on this, the required and for the full workspace valid inverse transformation of an industrial robot is determined by a multidimensional, model-based, inverse interpolation.

The interpolation approach is integrated into a new calibration method, the distributed calibration method. The new method is based on the advantages - accuracy and low number of needed measurements - of known and complex calibration techniques and is completed by runtime-efficient forward and inverse transformations.

The direct comparison with two important model-based methods for the inverse transformation computation reveals a clear superiority of the distributed calibration method, especially near robot singularities. Furthermore, runtime improvements of 50% are recorded.

The distributed calibration method has been integrated into an object-oriented robot model library. Therefore, models which have been determined with the distributed calibration method can be used in application programs as easily as any other robot model.

For the first time, approximation and interpolation techniques are successfully applied to the runtime and main-memory efficient computation of the forward and inverse transformations of six-axis, nonredundant industrial robots while the full workspace is considered and all the solutions of the inverse transformation can be determined.