

CONTROLUL MIȘCĂRII REPETITIVE ÎN TEHNICA ROBOȚILOR MANIPULATORI

REPETITIVE MOTION CONTROL IN ROBOTS MANIPULATORS' TECHNIQUE

Aurel FRATU, Mariana FRATU
Universitatea "Transilvania" din Brașov

Rezumat. Această lucrare este dedicată controlului mișcării repetitive a roboților manipulatori.

În această abordare vom analiza proprietățile importante ale mișcării repetitive: traiectoria este periodică sau este reinițializată la începutul fiecărui ciclu. Una din problemele principale în controlul mișcării brațului robot este specificarea traiectoriilor dinamice fezabile pentru planificarea mișcării. Vom aborda problema comenzilor necesare pentru controlul robotului în cazul mișcării pure de-a lungul traseului dorit, definit prin puncte de trecere ale traiectoriilor fezabile.

Cuvinte cheie: mișcare repetitivă, traiectorie periodică, controlul mișcării

1. Introducere

Roboții manipulatori sunt în principal dispozitive de poziționare cu multiple grade de libertate. Robotul, ca instalație ce trebuie controlată, este un sistem mecatronic neliniar, puternic cuplat, cu intrări/ieșiri multiple.

Principalele caracteristici specifice controlului mișcării roboților sunt complexitatea modelului dinamic și incertitudinile, atât parametrice, cât și dinamice. Incertitudinile parametrice apar de la cunoașterea imprecisă a parametrilor cinematici și inerțiali, în timp ce incertitudinile dinamice apar din cauza flexibilității articulațiilor și a legăturilor dintre articulații, a dinamicii actuatorilor, a frecării, a zgomotului senzorilor și a dinamicii necunoscute a mediului.

Traietoriile de mișcare ale robotului manipulator sunt în mod obișnuit specificate în spațiul sarcinii, sub forma evoluției în timp a pozițiilor, vitezelor și accelerațiilor efectorului final.

Pe de altă parte, la metodele de control în spațiul articular se presupune că traiectoria de referință este disponibilă sub forma evoluției în timp a pozițiilor și orientărilor articulațiilor brațului robot.

Strategia naturală pentru a realiza controlul în spațiul sarcinii urmează două etape succesive:

- prima etapă, cinematica robotului în spațiul variabilelor operaționale este trecută în spațiul variabilelor articulare corespunzătoare, și apoi

Abstract. This paper is devoted to the repetitive motion control of robots manipulators.

In this approach, we will analyze the important properties of repetitive motion: trajectory is periodical or is reinitialized at the beginning of each cycle. One of the central problems in the motion control of the robot arm is the specification of dynamically feasible trajectories for motion planning. We will attack the problem of commands needed for the robot control in case of pure movement along the desired path, that is definite in passing points of feasible trajectories.

Key words: repetitive motion, periodical trajectory, motion control

1. Introduction

Robots manipulators are basically multi-degree-of-freedom positioning devices. The robot, as the plant to be controlled, is a multi-input/multi-output, highly coupled, nonlinear mechatronic system.

The main specifically properties in the motion control of the robots manipulators are the complexity of the dynamics and uncertainties, both parametric and dynamic. Parametric uncertainties arise from imprecise knowledge of kinematics parameters and inertia parameters, while dynamic uncertainties arise from joint and link flexibility, actuator dynamics, friction, sensor noise and unknown environment dynamics.

Robot manipulator motion trajectories are typically specified in the task space in the terms of the time history of the end-effector's position, velocities and acceleration.

On the other hand, in the joint space control methods, is assumed that the reference trajectory is available in terms of the time history of joints positions and orientations of robot arm.

The natural strategy to achieve task space control goes through two successive stages:

- in the first stage, the robot's kinematics in the task space variables is passed into the kinematics corresponding joint space variables, and then

- în etapa a doua este proiectat controlul în spațiul articular.

Controlul roboților manipulatori este realizat în mod obișnuit în spațiul articular, deoarece intrările de comandă sunt cuplurile articulare. Cu toate acestea, utilizatorul specifică mișcarea în spațiul sarcinii și în consecință este important de-a extinde problema controlului la nivelul spațiului sarcinii. Acest lucru poate fi îndeplinit prin diferite strategii. Cea mai naturală strategie constă în inversarea modelului cinematic al manipulatorului pentru a calcula mișcarea articulară corespunzătoare mișcării impuse efectorului final.

O altă strategie constă în proiectarea schemei de control direct în spațiul sarcinii care utilizează modelul cinematic pentru a reconstrui variabilele din spațiul sarcinii plecând de la variabilele măsurate în spațiul articular.

Din cauza complexității cinematiei și dinamicii manipulatorului și a sarcinii care trebuie îndeplinită, problema controlului mișcării este în general descompusă în trei etape:

- planificarea mișcării,
- generarea traiectoriei și
- trasarea traiectoriei.

Să începem prezentarea celor trei etape:

În etapa de *planificare a mișcării*, traseul dorit este generat în spațiul sarcinii 3-D, fără specificarea vitezei sau accelerației de-a lungul traseului. O primă consecință este generarea unui traseu într-un spațiu de lucru fără obstacole.

În etapa *generării traiectoriei*, sunt calculate poziția, viteza și accelerația dorită de-a lungul traseului, ca o funcție de timp. Planificatorul de traiectorie poate parametriza traseul efectorului final direct în spațiul sarcinii. Se poate calcula o traiectorie pentru o articulație individuală a manipulatorului ca o curbă în spațiul configurațiilor.

În vederea calculării traiectoriei în spațiul articular, traseul dat efectorului final trebuie transformat într-un traseu în spațiul articular prin intermediul modelului cinematic invers. Din cauza dificultății calcului on-line a acestuia, abordarea uzuală este de-a calcula un set discret de vectori articulari pentru câteva puncte de-a lungul traseului dorit și de-a efectua o interpolare în spațiul articular între aceste puncte în vederea completării traiectoriei în spațiul articular.

Abordarea obișnuită a interpolării traiectoriei include interpolarea spline polinomială, utilizând traiectorii trapezoidale de viteză sau traiectorii polinomiale de ordinul trei.

- in the second stage is designed the control in the joint space.

Control of robot manipulators is naturally achieved in the joint space, since the control input are joint torques. Nevertheless, the user specifies a motion in the task space, and thus it is important to extend the control problem to the task space. This can be achieved by different strategies. The more natural strategy consists of inverting the kinematics of the manipulator to compute the joint motion corresponding to the given end-effector's motion.

Another strategy consists of designing a control scheme directly in the task space that utilizes the kinematics model to reconstruct task space variables from measured joint space variables.

Because of the complexity of both the kinematics and dynamics of the manipulator and of the task to be carried out, the motion control problem is generally decomposed into three stages:

- motion planning,
- trajectory generation, and
- trajectory tracking.

Let us start to illustrate those three stages:

In the *motion planning stage*, desired paths are generated in the space task 3-D, without specifying velocity or acceleration along the path. A primary concern is the generation of path in the collision-free workspace.

In the *trajectory generation stage*, the desired position, velocity, and acceleration along the path, as a function of time, are computed. The trajectory planner may parameterize the end-effector path directly in task space. One may compute a trajectory for the individual joints of the manipulator as a curve in the joint (configuration) space.

In order to compute a joint space trajectory, the given end-effector path must be transformed into a joint space path via the inverse kinematics mapping. Because of the difficulty of the computing this mapping on-line, the usual approach is to compute a discrete set of joint vectors for several points along the desired path and to perform an interpolation in joint space among these points in order to complete the joint space trajectory.

Common approach to trajectory interpolation include polynomial spline interpolation, using trapezoidal velocity trajectories or cubic polynomial trajectories, as well as trajectories generated by reference models.

Pentru *trasarea traiectoriei*, traiectoria de referință calculată este apoi prezentată controlerului, a cărui funcție este de-a determina robotul să urmărească traiectoria dată cât mai aproape posibil. Pentru proiectarea controlerului vom presupune că traiectoria de referință și traseul au fost precalculate.

2. Controlul repetitiv și Controlul prin învățare

Deoarece multe aplicații robotizate, cum sunt operațiile de preluare și plasare, de vopsire, de asamblare, presupun mișcări repetate, este normal ca datele achiziționate în ciclurile anterioare să se utilizeze pentru a îmbunătăți performanțele manipulatorului în ciclurile care urmează. Aceasta este ideea de bază a controlului repetitiv și a controlului prin învățare.

Considerăm modelul dinamic al unui braț robot dat de ecuația:

$$H(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + g(q) + f(q, \dot{q}) = m \quad (1)$$

și presupunem dată o traiectorie dorită pe un interval finit de timp, $y_d(t)$, $0 \leq t \leq T$, care poate reprezenta o traiectorie în spațiul articular sau o traiectorie în spațiul sarcinii.

Trajectoria de referință $y_d(t)$ este utilizată în cicluri repetate ale manipulatorului, presupunând fie

- că traiectoria este periodică, $y_d(T) = y_d(0)$ în cazul *controlului repetitiv*, fie
- că robotul este reinițializat să urmeze traiectoria dorită la începutul fiecărui ciclu în cazul *controlului prin învățare*.

Fie cuplul $m_k(t)$ ca intrare de comandă pentru sistemul robot, care produce o traiectorie $y_k(t)$, în timpul ciclului k . Perechea intrare/ieșire $\{m_k(t), y_k(t)\}$ poate fi memorată și utilizată în ciclul $k+1$ de comandă.

Pentru o intrare inițială $m_0(t)$, poate fi utilizată orice lege de control care produce o ieșire stabilă, cum ar fi de exemplu controlul PD.

3. Problema controlului prin învățare

Problema controlului prin învățare este de-a determina o lege recursivă de control:

$$m_{k+1}(t) = F(m_k(t), \Delta y_k(t)), \quad 0 \leq t \leq T. \quad (2)$$

cu $\Delta y_k(t) = y_k(t) - y_d(t)$, astfel încât, în spațiul de eroare să avem $|\Delta y_k(t)| \rightarrow 0$ când $k \rightarrow \infty$.

Algoritmii de control prin învățare sunt atractivi deoarece modelele dinamice nu trebuiesc cunoscute aprioric cu acuratețe. Anumite abordări au fost utilizate pentru a genera legea de învățare

For *trajectory tracking*, the computed reference trajectory is then presented to the controller, whose function is to cause the robot to track the given trajectory as closely as possible. For design of the tracking controller, we assume that the reference trajectory and path have been pre-computed.

2. Repetitive control and Learning control

Since many robotic applications, such as pick-and-place operations, painting, assembly involve repetitive motions, it is natural that the information obtained in previous cycles to be used to improve the performance of the manipulator in subsequent cycles. This is the basic idea of repetitive control and learning control.

We consider the rigid robot dynamics model, given by:

and suppose one is given a desired output trajectory on a finite time interval, $y_d(t)$, $0 \leq t \leq T$, which may represent a joint space trajectory or a task space trajectory.

The reference trajectory $y_d(t)$, is used in repeated cycles of the manipulator, assuming either

- that the trajectory is periodical, $y_d(T) = y_d(0)$ in the case of the *repetitive control*, or
- that the robot is reinitialized to lie on the desired trajectory at the beginning of each trial in the case of the *learning control*.

Let be the torque $m_k(t)$ the command input for robot system, which produces an output trajectory $y_k(t)$, $0 \leq t \leq T$, during the k -th cycle. The input/output pair $\{m_k(t), y_k(t)\}$ may be stored and utilized in the $k+1$ cycle.

For an initial input $m_0(t)$ can be used any control law, that produces a stable output, such as a PD control law.

3. Learning control problem

The learning control problem is to determine a recursive control law:

with $\Delta y_k(t) = y_k(t) - y_d(t)$, such that, in the error space we have $|\Delta y_k(t)| \rightarrow 0$ as $k \rightarrow \infty$.

The learning control algorithms are attractive because accurate models of the dynamics need not be known a priori. Several approaches have been used to generate a suitable learning law, F and

dorită, F , și a demonstra convergența erorii traiectoriei obținute.

Legea de învățare de tip proporțional, P , este una de forma:

$$m_{k+1}(t) = m_k(t) - \Phi \Delta y_k(t), \quad (3)$$

numită astfel deoarece termenul de corecție a cuplului de intrare, la fiecare iterație, este proporțional cu eroarea traiectoriei obținute, Δy_k .

Legea de învățare de tip D este una de forma:

$$m_{k+1}(t) = m_k(t) - \Gamma \frac{d}{dt} \{ \Delta y_k(t) \}. \quad (4)$$

Un algoritm de învățare mai general este de tipul PID și are forma:

$$m_{k+1}(t) = m_k(t) - \Gamma \frac{d}{dt} \{ \Delta y_k(t) \} - \Phi \Delta y_k(t) - \int \Psi \Delta y_k(u) du. \quad (5)$$

Convergența traiectoriei sintetizate, $y_k(t)$, către traiectoria de referință, $y_d(t)$, poate fi demonstrată făcând anumite supoziții asupra sistemului:

- Primele abordări consideră modelul dinamic al robotului liniarizat în jurul traiectoriei dorite și demonstrează convergența sistemului liniar variabil care rezultă;
- Abordările ulterioare demonstrează convergența bazându-se pe modelul Lagrange complet.

Deoarece cuplurile de intrare pentru sistemul robot sunt limitate de capacitatea actuatorilor:

$$m^{\min}(t) \leq m(t) \leq m^{\max}(t) \quad (6)$$

este natural să se considere problema de control în timp optimal.

4. Concluzii

În multe aplicații, ca cele de urmărire, efectorul final este constrâns să urmărească traseul de referință definit în spațiul sarcinii.

Pentru a urmări traiectoria de referință, de către efectorul final, trebuie generate semnale de referință pentru buclele de reglare.

Cercetarea în domeniul comenzii manipuloarelor s-a orientat către generarea în timp minim a traiectoriei de-a lungul unui traseu dat în spațiul sarcinii.

Problemele care trebuie rezolvate pentru creșterea performanțelor robotului sunt de-a determina convergența către zero a erorii de poziționare.

Principala problemă a controlului mișcării brațului robot este de-a genera mișcarea în spațiul sarcinii cu o comandă dată la nivelul articulațiilor.

prove convergence of the error of the output trajectory.

A P -type learning law is one of the forms:

so called, because the correction term to the input torque, at each iteration, is proportional to the error of the output trajectory, $D y_k$.

A D -type learning law is one of form:

A more general PID type learning algorithm has the form:

Convergence of the synthesized trajectory, $y_k(t)$, to the reference trajectory, $y_d(t)$ can be proved under various assumptions on the system:

- The earliest approach, consider the robot dynamics model linearized around the desired trajectory and proved convergence for the linear time-varying system that results.
- Latter approach proved convergence based on the complete Lagrangean model.

Since the input torques to the robot are limited by the capability of the actuators as:

it is natural to consider the problem of optimal control.

4. Conclusions

In many applications, such as tracking, the end-effector is constrained to follow the reference path defined in the task space.

To follow the reference path, by the robot's end-effector, the references signals to the feedback control loops, must be presented.

The research into the manipulators' command field, has gone into the problem of generating a minimum time trajectory along a given path in task space.

The problems which must be solved, in improving the robot's performances, are to determine the convergence to zero of positioning error.

The main problem of motion robot control is to generate the motion in the task space with a given command at joints level.

Controlul mișcării îndeplinește următoarele funcții:

- de-a găsi deplasările corespunzătoare în articulații;
- de-a genera semnalele de control pentru actuatori pentru a produce cuplurile de intrare;
- de-a sintetiza traseul programat.

Bibliografie

1. Fratu, A. ș.a.: *Generarea mișcării unui braț robot*. **RECENT**, ISSN 1582-0246, vol. 4(2003), nr. 1(7), p. 21-25
2. Fratu, A.: *Forma generală a comenzii unui sistem robot*. Lucrările Simpozionului Național de Electronică și Automatică, Academia Tehnică Militară, noiembrie, 1998, Brașov
3. Haugsjaa, K. ș.a.: *A computational model for repetitive motion*. In *Timing of Behavior: Neural, Computational, and Psychological Perspectives*. The MIT Press, Cambridge, MA, 1996
4. Tournassoud, P.: *Planification et contrôle en robotique*. Ed. Hermes, Paris, 1994
5. McCarthy, K.: *Accuracy in Positioning Systems*. www.neat.com/techinfo/accuracy

Motion control of robot arm accomplishes the following functions:

- to find of the corresponding movements in joints;
- to generate of control signals for the actuators to produce the input torques;
- to synthesise of programmed paths.

References