

ARHITECTURĂ DE CONTROL ADAPTIV PENTRU ROBOȚI REDUNDAȚI

ADAPTIVE CONTROL ARCHITECTURE FOR REDUNDANT ROBOTS

Aurel FRATU*, Laurent VERMEIREN**

*"Transilvania" University of Brasov, Romania

**University of Valenciennes, France

Rezumat. În această lucrare este propusă o arhitectură de control cu structură variabilă pentru comanda unui robot redundant. Cooperarea actuatorilor robotului, pentru efectuarea unei sarcini robotice, se realizează prin alocarea dinamică de sub-sarcini robot, pentru fiecare sub-controler al arhitecturii. Algoritmii de control al unui sub-controler autonom se bazează pe matricea Jacobian a robotului. Algoritmii de estimare a elementelor matricei Jacobian utilizează matricea de covarianță.

În lucrare este folosită tehnica factorizării matricei de covarianță pentru identificarea direcțiilor redundante din spațiul de mișcare al actuatorilor.

Cuvinte cheie: sub-controlere, alocarea dinamică de sub-sarcini, redundanță

1. Introducere

Un robot redundant are mai multe grade de libertate decât cele necesare pentru a-și poziționa efectatorul final.

O schemă de control pentru un robot redundant este destinată să asigure evitarea obstacolelor în spațiul de lucru în timpul mișcării și să permită robotului să își îndeplinească misiunea în cazul funcționării defectuoase a unor actuatori. În astfel de situații sunt activate gradele de libertate redundante.

Pentru controlul mișcării unui robot redundant autorii propun o arhitectură de control cu structură variabilă, formată dintr-un set cu număr variabil de sub-controlere adaptive, autonome.

Fiecare sub-controler comandă un actuator, ce deservește un singur grad de libertate.

Fiecare sub-controler funcționează ca un sub-sistem autonom și asigură controlul mișcării la nivelul unui grad de libertate.

Prin funcționarea sub-controlerelor, ca sub-sisteme cooperante, actuatorii sistemului robot vor coopera pentru îndeplinirea sarcinii robotice.

Pentru coordonarea funcționării actuatorilor se propune tehnica alocării dinamice de sub-sarcini robotice, pentru fiecare sub-controler în parte [1].

Numărul de grade de libertate active la un moment dat determină tipul de configurație a arhitecturii de control și nivelul de redundanță.

Abstract. In this paper, a control architecture with variable structure for redundant robot is proposed. The cooperation of the robot's actuators, to realise a robot task is made by the sub-tasks dynamical allocation for each sub-controller of the architecture. The control algorithm of a sub-controller with self-governing is based on robot Jacobian matrix.

The algorithm for the estimation of Jacobian matrix's elements uses the covariance matrix. In this paper, the factorization technique of the covariance matrix for the identification of the redundant directions inside the actuator motion space is used.

Key words: sub-controllers, sub-tasks dynamical allocation, redundancy

1. Introduction

A redundant robot has more degrees of freedom than those needed to position its end-effector.

A redundant robot control scheme is provided for the obstacles avoiding in the workspace, during of the movement and allows accomplishing its mission in the case of malfunction of several actuators. In such situations, the redundant degrees of freedom are activated.

For the motion control of a redundant robot we propose a control architecture with variable structure, formed by a set with variable number of adaptive, self-governing sub-controllers.

Each sub-controller commands an actuator which deserves a degree of freedom.

Each sub-controller works as an autonomous sub-system and assure the motion control at the level of one degree of freedom.

By the working of the sub-controllers as cooperative sub-systems, the actuators of the robot system will cooperate, to accomplish the robotic task.

For the coordination of the actuators' working one propose the sub-tasks dynamical allocation technique, for each sub-controller [1].

The number of the active degrees of freedom, at a given instant, determines the type of configuration for the control architecture and the level of redundancy.

Alocarea dinamică a sub-sarcinilor robot, pentru fiecare sub-controller, este o cerință esențială pentru sistemele robot cu actuatori cu funcționare autonomă.

Metoda de alocare dinamică a sub-sarcinilor, permite robotului să se adapteze mai ușor la schimbările mediului de operare și să își îndeplinească misiunea în cazul apariției unor disfuncționalități.

2. Arhitectură de control pentru roboți redundanți

2.1. Sub-controlere autonome

Să considerăm cea mai simplă structură de controller, controllerul proporțional, P . Robotul poate dobândi redundanță în raport cu o sarcină robotică dată dacă structura de control folosește tehnica alocării dinamice a sub-sarcinilor.

Prin combinarea sub-sarcinilor atribuite sub-controlerelor se obține o arhitectură de control în care actuatorii cooperează între ei.

Fie sub-sarcina i , a unui sub-controller, definită în spațiul de operare propriu actuatorului comandat [2]. Tipic, acest spațiu este un spațiu de acoperire al unui senzor exteroceptiv de prelevare de informații. Semnalul de ieșire al senzorului este dependent de deplasarea actuatorului:

$$x_i = x_i(\theta). \quad (1)$$

Diferențiind relația (1), în raport cu rata prelevării, se obține:

$$\Delta x_i(k) = J_i(k) \cdot \Delta \theta(k) \quad (2)$$

în pasul k al procesului de prelevare.

Matricea Jacobian este dată de:

$$J_i(k) = \frac{\partial x_i(k)}{\partial \theta(k)}. \quad (3)$$

Sub-sarcina $\Delta \theta(k)$, definită în spațiul articular trebuie exprimată în funcție de deplasarea dorită, x_{id} , și deplasarea curentă, x_i , din spațiul operațional.

Din relația (2) se obține pentru $\Delta \theta$ relația următoare:

$$\Delta \theta(k) = J_i^+(k) \cdot (x_{id}(k) - x_i(k)) + (I - J_i^+(k) \cdot J_i(k)) \cdot \theta_0. \quad (4)$$

Matricea J^+ reprezintă pseudo-inversa matricei Jacobian, J .

Acest rezultat este de o importanță fundamentală pentru stabilirea nivelului de redundanță, deoarece soluția (4) evidențiază posibilitatea de alegere a vectorului θ_0 , pentru a exploata serviciile gradelor de libertate redundante.

Contribuția lui θ_0 constă în a genera un spațiu nul de mișcare pentru a permite manipulatorului să se plaseze în postura din care are o mai mare dexteritate pentru executarea sarcinii date [3].

The dynamical sub-tasks allocation, for each sub-controller, is an essential demand for robot systems with autonomous actuators.

The dynamical sub-tasks allocation method, allows to robots to easily adapt at the environmental changes and to accomplish its mission in the malfunction cases.

2. Control architecture for redundant robots

2.1 Autonomous sub-controllers

Let us consider the simplest controller i.e., P controller. The robot can find out the redundancy with respect to one given sub-task, if the control structure uses the dynamical sub-tasks allocation technique.

By combining the sub-controllers offered to the sub controllers, he is obtained a control architecture, in which the actuators cooperate between them.

Let us the i -th sub-task for a sub-controller who is defined in the own space of the commanded actuator [2]. Typically, this sub-space is an output space of an external sample sensor. The sensor output x_i is a function of actuator displacement:

Differentiating the relation (1) with respect to the sampling rate, we can get

in the k -th sampling step.

The Jacobian matrix is defined as:

The sub-task $\Delta \theta(k)$ in the joint space, must be define in terms of a the desired shifting value, x_{id} and the current shifting, x_i inside the operational space.

From relation (2) one obtain the following equation:

The matrix J^+ denotes the pseudo-inverse of a Jacobean matrix, J .

This result is of fundamental importance for redundancy level establishing since solution (4) evidences the possibility of choosing the vector θ_0 , so as to exploit the services of the redundant degrees of freedom.

The contribution of θ_0 is to generate null space motions for allow to the manipulator, to put himself in the posture from which has more dexterity for the execution of the given task [3].

Dacă un actuator se deplasează în direcția dorită x_{id} , utilizând un control proporțional al vitezei, pentru sub-sarcina i avem comanda de forma:

$$u(k) = K_i \cdot J_i^+(k) \cdot (x_{id}(k) - x_i(k)) + (I - J_i^+(k) \cdot J_i(k)) \cdot \lambda, \quad (5)$$

unde I , K_i și λ sunt matricea identitate, matricea de câștig a buclei de reacție și respectiv, un vector arbitrar. Vectorul arbitrar λ reflectă aportul comenzii sub-controlerului la asigurarea redundanței pentru sistemul robot [4].

2.2. Estimare a matricei Jacobian

Dacă nu se cunosc caracteristicile mediului de operare și nu se cunosc toți parametrii dinamici ai robotului, matricea Jacobian $J_i(k)$ este necunoscută. Pentru a realiza un control adaptiv la schimbările de mediu, este necesar un mecanism de estimare a matricei Jacobian.

Utilizând metoda celor mai mici pătrate, în lucrarea [5] este propusă o relație de calcul pentru matricea Jacobian estimată, \hat{J} :

$$\hat{J}_i(k) = \hat{J}_i(k-1) + (\Delta x_i(k) - \hat{J}_i(k-1) \cdot \Delta \theta(k)) \cdot (\Delta \theta(k)^T \cdot P(k-1)) / (\rho + \Delta \theta(k)^T \cdot P(k-1) \cdot \Delta \theta(k)), \quad (6)$$

unde ρ , $0 < \rho < 1$, este un factor de uitare și $P(k)$ este o matrice de covarianță calculată cu:

$$P(k) = \frac{1}{\rho} \cdot \left\{ P(k-1) - \frac{P(k-1) \cdot \theta(k) \cdot \theta(k)^T \cdot P(k-1)}{\rho + \Delta \theta(k)^T \cdot P(k-1) \cdot \Delta \theta(k)} \right\}. \quad (7)$$

Mecanismul de estimare a matricei Jacobian se bazează pe observarea procesului robot-mediu și constă în prelevări aleatoare de informații din mediul în care operează robotul.

Numărul observațiilor, ca valoare statistică, este folosit la determinarea valorilor probabile ale elementelor matricei Jacobian.

Matricea de covarianță P se folosește pentru definirea valorilor probabile ale mărimilor estimate. Covarianța oferă o măsură a puterii de corelare între seturile de prelevări aleatoare de informații [6].

2.3. Estimare a redundanței

Caracteristicile estimatorului (6) permit identificarea direcției deplasării redundante.

Pentru a realiza acest lucru matricea de covarianță P se transcrie sub forma factorială astfel:

$$P = U \cdot D \cdot U^T, \quad (8)$$

unde U este o matrice superior triunghiulară cu elementele de pe diagonala principală egale cu unu, iar D este o matrice diagonală:

$$D = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & & \\ 0 & \ddots & & 0 \\ & & 0 & d_n \end{bmatrix}. \quad (9)$$

If an actuator move in the desired direction, x_{id} , using the proportional velocity control, for i -th sub-task, we have the control low:

where I , K_i and λ are an identity matrix, a feedback gain matrix, and an arbitrary vector. The arbitrary vector denotes the contribution of the sub-controller command, to the robot system redundancy [4].

2.2 Estimating the Jacobian matrix

If there is no a priori knowledge on the environment characteristics and the robot dynamic parameters, the Jacobean matrix, $J_i(k)$ is unknown. To make the adaptive control to the change of environment, a mechanism to estimate the matrix Jacobian is needed.

Using the least-mean-square method, in the paper [5] a computing relation is proposed for the Jacobian estimate matrix, \hat{J} :

where ρ , $0 < \rho < 1$, is a forgetting factor, and $P(k)$ is a covariance matrix calculated as:

The mechanism to estimate of the matrix Jacobian is made on the observations of the robot-environment process and consist in random samples about the environment in which the robot operate.

The number of observations, as statistical quantities, is used to determine the expected values of Jacobian matrix elements.

The covariance matrix P is used to define the expected values, of the estimated variables. The covariance provides a measure of the strength of the correlation between the sets of random samples [6].

2.3. Estimating the redundancy

The characteristics of the estimator (5), allows us to identify the redundant shifting direction.

To make this thing the covariance matrix P is written as factorial mode:

$$P = U \cdot D \cdot U^T, \quad (8)$$

where U is an upper triangular matrix whose diagonal elements are all 1, and D is a diagonal matrix:

Dacă matricea P este slab pozitivă, un element al diagonalei matricei D este apropiat de zero.

Nivelul de redundanță al robotului se poate determina prin observarea matricei D .

Dacă un element $d_i = 0$ sau este foarte mic, direcția corespunzătoare a lui $\Delta\theta$ este direcția redundantă în raport cu sub-sarcina dată.

3. Concluzii

Funcționarea unui robot în condiții de siguranță în medii necunoscute presupune existența unei capacități de adaptare ridicată. Adaptabilitatea robotului la condiții reale de lucru este posibilă prin activarea gradelor de libertate redundante.

Pentru un robot cu grade de libertate redundante se propune în lucrarea de față o arhitectură de control cu structură variabilă. Algoritmul de control se bazează pe matricea Jacobian a robotului.

Pentru a identifica elementele matricei Jacobian a fost propus un algoritm de estimare bazat pe corelarea între seturile de prelevări aleatoare de informații (covarianță).

Forma factorială a matricei de covarianță permite identificarea direcțiilor redundante din spațiul de mișcare al actuatorilor.

If the matrix P is weak-positive, one of the diagonal elements of D is near to zero.

The redundancy level of the robot one can find out by observing the matrix D .

If the element $d_j = 0$ or very small, the corresponding direction of $\Delta\theta$ is the redundant direction with respect to the given sub-task.

3. Conclusions

The robot working in the safety conditions, inside unknown environment supposes a high adaptability capacity. The robot adaptability at real work conditions is possible if are activate the redundant degrees-of-freedom.

For a robot with redundant degrees-of-freedom, he is proposed in this paper a control architecture with variable structure. The control algorithm is based on the Jacobian matrix of robot.

For identify the Jacobian matrix elements, an algorithm based on the covariance, has been proposed.

The factorial shape of the covariance matrix allows identifying the redundant direction inside of the motion space of actuators.

References

1. Parker, L.E.: *Distributed Algorithms for Multi-Robot Observation of Multiple Moving Targets*. Journal Autonomous Robots, Vol. 2, No. 3, May 2002, p. 231-255, ISSN 0929-5593, Springer Netherlands Publisher
2. Zavala-Rio, A., Brogliato, B.: *On the Control of a One Degree-of-Freedom Juggling Robot*. Journal Dynamics and Control, Vol. 9, No. 1, January 1999, p. 67-90, ISSN 0925-4668, Springer Netherlands Publisher
3. Yoshida, K.; Nenchev, D.N.: *Reaction null-space based control of under-actuated manipulators*. Proceeding of International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, p. 1358-1363, ISBN 0-7803-4465-0, October 1998, Victoria, BC, Canada
4. Hosoda, K., Igarashi, K., Asada, M.: *Adaptive hybrid control for visual servoing and force servoing in an unknown environment*. IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 5, No. 4, p. 39-43, December 1998, ISSN 1070-99321, University of South Florida, USA
5. Heejin, L., Hyunseok, S., Euntae, K., Seungwoo K., Mignon, P.: *Variable structure control of manipulator using linear time-varying sliding surfaces*. Proceeding of International Conferences on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, p. 806-811, ISBN 0-7803-4465-0, October 1998, Victoria, BC, Canada
6. Yuh, J.; Nie, J., Lee, W.C.: *Adaptive control of robot manipulators using bound estimation*. Proceeding of International Conferences on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, p. 1126-1131, ISBN 0-7803-4465-0, October 1998, Victoria, BC, Canada
7. Vainio, M., Appelqvist, P., Halme, A.: *Generic control architecture for a cooperative robot system*. Proceeding of International Conferences on Intelligent Robots and Systems, Vol. 2, p. 1119-1125, ISBN 0-7803-4465-0, October 1998, Victoria, BC, Canada
8. Fratu, A., Fratu, Mariana: *The problem of operational space control for redundant robots*. **RECENT**, Vol. 6, No. 3(15), December 2005, p. 52-55, ISSN 1582-0246, Brasov, Romania
9. Fischer, J., Breithaupt, R., Bode, B.: *Adaptive and economic data representation in control architectures of autonomous real-world robots*. Artificial Life and Robotics, Vol. 6, No. 4, December 2002, p. 200-204, ISSN 1433-5298, Springer Japan Publisher

Lucrare primită în Aprilie, 2007
(și în formă revizuită în Iunie, 2007)

Received in April, 2007
(and revised form in June, 2007)