



HAL
open science

Conception d'un outil logiciel graphique pour l'analyse comportementale d'un robot en mode dégradé

Farid Noureddine

► **To cite this version:**

Farid Noureddine. Conception d'un outil logiciel graphique pour l'analyse comportementale d'un robot en mode dégradé. *Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 1996, 11 (1-2), pp.199-214. hal-02135761

HAL Id: hal-02135761

<https://hal.science/hal-02135761>

Submitted on 21 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.




Open Archive Toulouse Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/23391>

Official URL:

To cite this version:

Noureddine, Farid  *Conception d'un outil logiciel graphique pour l'analyse comportementale d'un robot en mode dégradé.* (1996) *Revue Internationale de CFAO et d'informatique graphique*, 11 (1-2). 199-214. ISSN 0298-0924

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Conception d'un outil logiciel graphique pour l'analyse comportementale d'un robot en mode dégradé

Farid Noureddine

*Laboratoire Génie de Production
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
47, Avenue d'Azéreix, BP 1629, 65016 Tarbes cedex*

RÉSUMÉ. Notre travail est focalisé sur l'acquisition de la connaissance nécessaire au fonctionnement d'un système de diagnostic opérant sur un robot. Une approche originale, où l'aspect comportemental est privilégié par rapport à l'aspect structural, permet de mettre en évidence les effets d'une faute sur le comportement du robot par l'étude des positions et vitesses du robot. Un outil logiciel graphique 'Robdiag' est ainsi implémenté, son noyau est écrit en Autolisp, langage de programmation du logiciel Autocad.

ABSTRACT. This work is focussed on the acquisition of the necessary knowledge required for a diagnosis system operating on a robot. An original approach, where the behavioral aspect is given more importance than the structural allows us to point out the effect of the fault on the behaviour of the robot by the study of the positions and velocities of the robot. A graphical tool 'Robdiag' is thus implemented and its kernel is written in Autolisp which is the programming language of the software Autocad.

MOTS-CLÉS : robotique, conception assistée par ordinateur, faute, erreur, défaillance, diagnostic.

KEY WORDS : robotics, computer aided design, fault, error, failure, diagnosis.

1. Introduction

La sûreté de fonctionnement est souvent un aspect essentiel des systèmes et ce, quels que soient les domaines d'application. Si les conséquences de dysfonctionnement des systèmes peuvent dans certains cas s'avérer

catastrophiques, le domaine de l'aéronautique par exemple, ils peuvent avoir des implications économiques très néfastes dans les domaines industriels manufacturiers.

Les exigences de sûreté de fonctionnement des structures robotiques par exemple, impliquent l'engagement de techniques adaptées à tous les niveaux du cycle de vie de ces structures. Les robots occupent dans les systèmes industriels actuels une place importante et sont d'une criticité marquée pour la réalisation des missions affectées à ces systèmes.

La terminologie utilisée dans cet article est issue des travaux de la communauté scientifique dont le domaine d'activité est la sûreté de fonctionnement des systèmes informatiques, [LAP 95]. La définition et l'utilisation des termes fautes, erreurs et défaillances par rapport aux termes pannes, défauts, anomalies ou dysfonctionnements, permet une certaine rigueur dans la description des différentes situations. Ainsi la **défaillance** du robot survient lorsque la fonction n'est plus accomplie. L'**erreur** est la partie structurelle ou fonctionnelle de l'état du robot ayant entraîné la défaillance. La cause de cette erreur est une **faute**.

Deux approches peuvent être suivies pour l'obtention et l'amélioration de la sûreté de fonctionnement d'un système.

La première consiste à augmenter le temps moyen entre défaillances par engagement des techniques :

- d'évitement des fautes qui visent à minimiser, par construction, l'occurrence des fautes. Les techniques passent par l'étude détaillée du système et de son environnement ainsi que par la mise en oeuvre des outils et des méthodes d'analyse des systèmes (modélisation, évaluation, validation). Ces dernières permettent d'éliminer les erreurs de spécification et de conception et de garantir une parfaite adaptation du système avec son environnement. Elles passent également par l'emploi d'éléments constitutifs fiables du système, tant sur le plan matériel que logiciel.
- de tolérance aux fautes visant à assurer la continuité de l'accomplissement de la fonction avec des performances nominales ou dégradées mais tolérables malgré l'occurrence (passée ou présente) de fautes et à en limiter les conséquences (sachant qu'il est impossible d'éviter toutes les fautes). Cette approche impose la prise en compte de l'occurrence de ces fautes dès l'analyse.

La seconde approche consiste à réduire le temps moyen de réparation, ce qui implique, en particulier, la mise en oeuvre de techniques de détection et de diagnostic visant à doter le système de moyens permettant la détection des erreurs et le diagnostic des fautes, [NOU 94].

Le système de diagnostic et le système observé sont associés par un un lien de connaissance. Ce dernier correspond à la connaissance globale ou "a priori" sur le

système, telle qu'elle est désignée par certains auteurs [DUB 90]. La qualité du diagnostic dépend du degré de raffinement et d'approfondissement de la connaissance sur l'état anormal du système. La quantité, la qualité et la nature de cette connaissance sont les facteurs principaux qui interviennent dans la conception d'un système de diagnostic. La difficulté essentielle dans la conception d'un système de diagnostic réside donc dans la disponibilité, la complexité et la possibilité d'exploitation de cette connaissance.

Notre travail est focalisé sur l'élaboration ou la collecte de la connaissance a priori, en vue de la conception d'un système de diagnostic d'un robot industriel. Ce travail se concrétise par un outil logiciel graphique 'Robdiag' implémenté sous le logiciel Autocad.

Dans la première partie, nous présentons ce qu'est un système de diagnostic et notamment le diagnostic à base d'expertise. La modélisation dynamique du robot est ensuite présentée. Elle met en évidence les paramètres du modèle et permet de mener une étude sur la corrélation existant entre ces paramètres et certaines fautes pouvant affecter le robot.

La simulation et visualisation du robot en mode normal et en mode dégradé ainsi qu'une étude des profils des positions et vitesses articulaires en fonction d'un paramètre donné sont effectuées et fournissent les principaux résultats de ce travail.

Quelques cas particuliers de fautes sont simulés afin de fournir un exemple d'utilisation de ce logiciel.

2. Système de diagnostic - Diagnostic à base d'expertise

Un système de diagnostic reçoit et fournit une information. Il est informé sur le comportement du système observé, informe sur l'état de ce système et réalise le traitement de l'information acquise pour élaborer l'information à transmettre. Plusieurs fonctions sont à mettre en oeuvre : détection, localisation et identification des fautes. La spécification de ces fonctions dépend de l'objectif du diagnostic, des contraintes ou des limites de la connaissance, des moyens mis en oeuvre et, surtout, du contexte du système observé.

Le système de diagnostic réalise une fonction d'information; son organisation fonctionnelle implique un ensemble d'algorithmes et sa structure est celle d'une architecture informatique.

Plusieurs travaux de synthèse sur les méthodes de détection et de diagnostic ont été présentés [TZA 90], [LEI 93], [ZWI 95]. La classification de ces méthodes peut être effectuée selon plusieurs critères : trois catégories apparaissent alors :

- celles dont la source de connaissance est l'expertise, la connaissance des experts est collectée sous forme empirique,

- celles dont la source de connaissance du système est un modèle et qui peuvent à leur tour être classées selon la formulation du modèle en méthodes à base de modèle analytique ou de modèle symbolique,
- celles utilisant des données historiques sur le passé du système ou statistiques sur une population de systèmes.

Dans le diagnostic à base d'expertise, une connaissance de la relation directe entre la faute et ses effets est nécessaire. Cette connaissance, généralement empirique, est basée sur l'expérience des spécialistes (experts de maintenance, concepteurs du système). On peut alors procéder à l'analyse de deux façons différentes, [BER 95] :

- soit par une démarche inductive, considérant une faute donnée, les erreurs possibles dans la structure du robot sont mises en évidence ainsi que les effets de ces erreurs sur les modes de défaillances,
- soit par une démarche déductive, partant d'une erreur donnée dans la structure du robot, les fautes possibles pouvant être à l'origine de cette erreur sont recensées.

3. Analyse des erreurs

La structure matérielle d'un robot peut-être décomposée en l'armoire de commande du robot incluant l'interface de programmation d'une part et la structure mécanique articulée d'autre part. Ces deux ensembles peuvent subir des fautes qui seront causes d'erreurs et qui provoqueront l'échec du robot dans l'accomplissement de sa tâche, d'où défaillance. Les composants susceptibles d'être en état erroné ainsi que leurs effets sont résumés dans le tableau 1.

Composants en état erroné	Effets sur le mouvement
Actionneur	Immobilité du bras
Accouplement	Immobilité du bras
Réducteur	Immobilité du bras
Arbre de transmission	Immobilité du bras
Capteur de fin de course	Dépassement des limites de débattement
Capteur de position	Fortes oscillations du bras
Frein	Effondrement ou blocage du bras

Tableau 1. Effets des erreurs de la structure mécanique articulée sur le mouvement du robot

Les fautes pouvant survenir au niveau de l'armoire de commande du robot peuvent de la même façon provoquer une défaillance du robot. Les parties susceptibles d'être en état erroné ainsi que leurs effets, pour l'armoire de commande, sont résumés dans le tableau 2.

Parties en état erroné	Effets sur le mouvement
Amplificateur de puissance	Immobilité ou déplacement du bras à vitesse rapide
Carte de contrôle	Immobilité ou déplacement du bras à vitesse rapide
Programmation	Mauvaise trajectoire
Connection	immobilité ou oscillation du bras

Tableau 2. Effets des erreurs de l'armoire de commande sur le mouvement du robot

Compte tenu du caractère dynamique du robot, il est nécessaire de considérer son comportement et les liens avec les structures matérielles et fonctionnelles pour traiter les problèmes de diagnostic des fautes. Le comportement des composants est représenté par un modèle global qui est, dans notre cas, le modèle dynamique du robot. Ce dernier occupant une place centrale dans les processus industriels, il est particulièrement étudié et fait l'objet de plusieurs travaux de recherche, dans un contexte de sûreté de fonctionnement, [FRE 91], [ISE 91], [SIE 94].

4. Modélisation dynamique de robot et corrélation fautes-paramètres du modèle

Le robot considéré dans le cadre de cette étude est un robot à 5 degrés de liberté où les articulations sont de type rotoïde. Sa motorisation correspond à 5 moteurs électriques à courant continu et à aimants permanents. Les moteurs sont équipés de réducteurs et les moteurs des axes 2 et 3 de freins à "manque de courant". Un convertisseur tension-courant asservi en courant (amplificateur de puissance) est prévu pour l'alimentation de chaque moteur, voir figure 1. La position de chaque axe est obtenue par un codeur optique absolu. La vitesse est obtenue par un moyen de calcul qui est la dérivation numérique de la position. Nous considérons donc qu'il y a un seul capteur comme composant physique donnant la position et la vitesse.

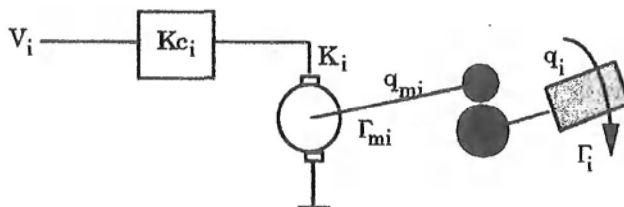


Figure 1. Actionneur et structure mécanique articulée

Le comportement dynamique est traduit d'une part par des variables connues (entrées d'action appliquées et sorties mesurées) et, d'autre part, par le modèle dynamique du robot. Le modèle dynamique exprime les couples exercés par les actionneurs en fonction des positions, vitesses et accélérations. Ce modèle est utilisé pour notre étude comme base de description du comportement normal du robot.

Pour chaque corps i , l'équation de la dynamique permet d'écrire, en tenant compte des frottements :

$$I a_i \ddot{q}_{mi} = \Gamma_{mi} - \Gamma_{ci} = \Gamma_{mi} - F_{vi} \dot{q}_{mi} - F_{si} \operatorname{sgn}(\dot{q}_{mi}) - \frac{\Gamma_i}{N_i} \quad (1)$$

$$\text{ou encore : } \Gamma_{mi} = I a_i \ddot{q}_{mi} + F_{vi} \dot{q}_{mi} + F_{si} \operatorname{sgn}(\dot{q}_{mi}) + \frac{\Gamma_i}{N_i} \quad (2)$$

avec comme définition des paramètres :

- q_{mi} : position articulaire instantanée de l'axe moteur i ,
- \dot{q}_{mi} : vitesse sur l'axe moteur i ,
- \ddot{q}_{mi} : accélération sur l'axe moteur i ,
- N_i : rapport de transmission de l'articulation i ,
- F_{si} : coefficient de frottement sec de l'actionneur i ,
- F_{vi} : coefficient de frottement visqueux de l'actionneur i ,
- $I a_i$: moment d'inertie du moteur i
- Γ_{mi} : couple fourni par le moteur de l'articulation i ,
- Γ_{ci} : couple résistant au niveau de l'articulation i englobant l'ensemble des couples de frottements sec et visqueux et le couple qu'il faut appliquer à la structure mécanique Γ_i .

Pour expliciter les couples Γ_i de l'articulation i ($i=1$ à 5), nous avons utilisé le formalisme de Lagrange [COI 86], [DOM 88]. Le vecteur couple peut être classiquement écrit sous la forme :

$$\Gamma = {}^0 H \ddot{q} + {}^0 F \dot{q} \dot{q} + {}^0 f \dot{q}^2 + {}^0 P \quad \text{où l'indice } {}^0 \text{ indique que nous nous situons au niveau de la structure mécanique articulée.}$$

${}^0 F$ est la matrice des termes de Coriolis de dimension (5×10) ,

${}^0 f$ est la matrice des termes centrifuges de dimension (5×5) ,

${}^0 P = [{}^0 P_1 \dots {}^0 P_5]^t$ est le vecteur des forces de gravité,

$$\dot{q} \dot{q} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2 \dots \dot{q}_1 \dot{q}_5 \dot{q}_2 \dot{q}_3 \dots \dot{q}_4 \dot{q}_5]^t,$$

$$\dot{q}^2 = [\dot{q}_1^2 \dots \dot{q}_5^2]^t.$$

En regroupant certains termes, le couple Γ_i peut s'écrire sous une nouvelle forme indice 1 :

$\Gamma_i = \sum_{j=1}^n ({}^1H_{ij}\ddot{q}_j + {}^1F_{ij}\dot{q}_j) + {}^1P_i$, soit sous forme matricielle :

$$\Gamma = {}^1H\ddot{q} + {}^1F\dot{q} + {}^1P \quad (3)$$

Reprenons l'équation 2, Γ_{mi} peut aussi être écrit : $\Gamma_{mi} = K_{ci}K_iV_i$, avec :

K_{ci} : gain du convertisseur courant-tension pour le moteur i,

K_i : constante du couple du moteur i,

V_i : tension aux bornes du moteur i.

Sachant que $\dot{q}_{mi} = N_i\dot{q}_i$, on obtient alors à partir de l'équation 2 :

$$K_{ci}K_iV_i = I_{ai}N_i\ddot{q}_i + N_iF_{vi}\dot{q}_i + F_{si}\text{sgn}(\dot{q}_{mi}) + \frac{1}{N_i} \left[\sum_{j=1}^n ({}^1H_{ij}\ddot{q}_j + {}^1F_{ij}\dot{q}_j) + {}^1P_i \right] \quad (4)$$

Cette équation de fonctionnement fait apparaître 4 types de paramètres :

* Les paramètres structuraux

Ce sont les différentes longueurs du robot.

* Les paramètres électriques

Le robot est équipé de moteurs à courant continu; ils sont donc commandés en courant. Les tensions de référence sont converties par des amplificateurs de puissance tension-courant. Les gains de ces amplificateurs correspondent aux paramètres électriques.

* Les paramètres électromécaniques

Ce sont les constantes de couple des moteurs.

* Les paramètres mécaniques

Ces paramètres sont les inerties propres des moteurs, les coefficients des frottements secs et visqueux, le rapport de transmission ainsi que les paramètres dynamiques du système articulé (distribution des masses et moments d'inertie).

Ces différents paramètres, en excluant les deux variables \dot{q} et \ddot{q} , sont des paramètres supposés connus ou devront être identifiés lorsqu'il s'agira de réaliser le contrôle en boucle fermée du robot.

Une certaine incertitude est toujours liée aux valeurs de ces paramètres. Ce fonctionnement dans un certain domaine contribue à définir le mode normal de fonctionnement.

Considérant le modèle dynamique établi, nous allons corrélérer au sein d'un tableau la typologie des fautes pouvant survenir sur le robot aux paramètres de ce modèle dynamique. Considérant un seul axe (l'indice i est omis), les paramètres sont décrits dans le tableau 3 dans l'ordre où ils apparaissent dans l'équation 4.

Paramètres normaux	Composants en état erroné	Fautes	Altération du paramètre
$K_c=0.057$	Actionneur	Surtension, surintensité	$K_c=0$ K_c indéfini
$K=0.818$	Amplificateur de puissance	Court-circuit, circuit ouvert	$K=0$ K indéfini
V : consigne	Electronique de commande	Court-circuit, circuit ouvert	$V=V_{saturation}$ $V=0V$
$I_a=0.000195$	Actionneur	Défaut géométrique	$I_a \neq I_{a_{normal}}$
$N=400$	Réducteur	Jeu, défaut géométrique	$N=0$ $N \neq N_{normal}$
$F_v=0.0006$	Actionneur	Usure, problème de graissage	F_v très grand
$F_s=0.00005$	Actionneur	Usure, problème de graissage	F_s très grand
H,F et P (variables)	Structure mécanique articulée	Charge trop importante, jeu dans les liaisons	Modification du tenseur d'inertie, déplacement du centre de gravité

Tableau 3. Corrélation fautes - paramètres du modèle

Remarques

- * Dans cette démarche, et du fait des incertitudes liées aux valeurs, une simulation de fautes et donc une altération de paramètres devra faire en sorte de s'éloigner nettement de la valeur nominale.
- * L'équation 4 traduit un fonctionnement en boucle ouverte du robot et, de ce fait, le paramètre relatif au codeur optique (capteur) n'apparaît pas dans le tableau 3.

5. Robot en mode dégradé - Apport de la C. A. O.

Le robot considéré est un robot à 5 degrés de liberté (3 articulations rotoïdes pour la structure porteuse et 2 pour le poignet), mais, dans cette étude, nous considérerons seulement le mouvement des 3 premiers axes, le poignet est donc supposé fixe. Cette restriction n'enlève rien au caractère général de la méthode, mais permet de traiter un modèle dynamique plus compact. Dans le paragraphe précédent, la correspondance entre le type de faute et la valeur d'un paramètre dans le modèle dynamique a été mise en évidence. Le problème que l'on peut se poser, en phase de conception du système de diagnostic, est de savoir s'il est possible de diagnostiquer les fautes à partir des seuls capteurs utilisés pour le contrôle du robot.

Dans une première phase d'étude, il convient de maîtriser le comportement dit dégradé du robot, c'est à dire étudier les évolutions des positions et vitesses articulaires de celui-ci lorsque des fautes sont injectées par altération de paramètres du modèle dynamique du robot. Ce type d'étude peut s'avérer fastidieux si les outils informatiques utilisés n'ont pas d'interfaces homme-machine conviviales, d'où notre souci d'élaborer un outil logiciel 'Robdiag' couplant un logiciel de simulation des systèmes non linéaires (Simnon) et un logiciel de dao (Autocad). 'Robdiag' est ainsi implémenté sous Autolisp, langage de programmation d'Autocad, Il gère un ensemble de logiciels qui communiquent sous DOS, soit pour :

- * simuler le fonctionnement du robot en mode normal, c'est à dire résoudre l'équation de fonctionnement du robot que nous avons au préalable exprimée dans l'espace d'état,
- * simuler le comportement du robot en mode dégradé par injection de fautes,
- * étudier les variations des positions et vitesses articulaires en fonction d'un paramètre donné.

6. Simulation et visualisation du robot en fonctionnement normal

A partir de l'équation du modèle dynamique 4, l'accélération peut-être exprimée par :

$$\ddot{q} = -H^{-1} \cdot F \cdot \dot{q} + H^{-1} N K_c K V - H^{-1} \cdot P \quad (5)$$

Le modèle, dans l'espace d'état, est obtenu directement à partir du modèle dynamique direct, en posant comme variables d'état les positions et les vitesses articulaires. Le vecteur d'état X de dimension 2n (n positions et n vitesses), avec n=3, s'écrit donc :

$$X = [q \quad \dot{q}]^t = [q_1, q_2, q_3, \dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3]^t,$$

et les équations d'état sont :

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A(X)X + B(X)V + G(X) \\ Y &= CX \end{aligned} \quad (6)$$

avec : $A = \begin{bmatrix} 0 & I_3 \\ 0 & -H^{-1}F \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ H^{-1}NK_cK \end{bmatrix}$ et $G = \begin{bmatrix} 0 \\ -H^{-1}P \end{bmatrix}$

- B : matrice (6x3), sa taille est fonction du nombre d'actionneurs considérés, soit 3 actionneurs, puisque le poignet est fixe,
- V : vecteur (3x1), représente les entrées d'actions (tensions d'entrées),
- G : vecteur colonne (6x1) représente les entrées connues non contrôlées.

En fixant les consignes de référence (vecteur d'entrée : V) et en résolvant l'équation 6 par le logiciel de simulation 'Simnon', nous trouvons, en un temps fixé a priori à t = 5 s, les valeurs des positions et vitesses articulaires.

6.1. Visualisation de la position initiale

La position initiale du robot est représentée en figure 2. Les différentes configurations sont représentées par une vue en perspective, ainsi que 3 vues en projections orthogonales. Les bras sont numérotés de 1 à 3 à partir du socle fixe.

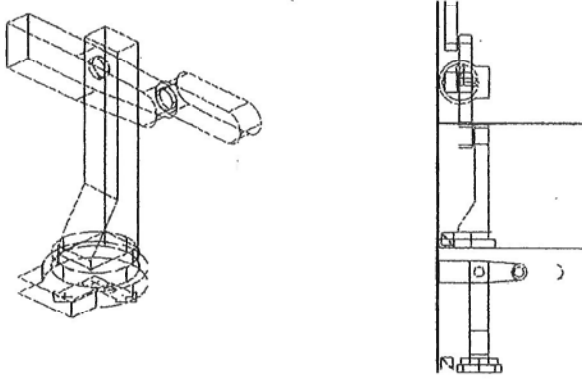


Figure 2. Position initiale du robot

6.2. Robot autonome

Considérons le cas où aucune entrée n'est appliquée au robot, ce dernier va donc évoluer, à partir de la position initiale, uniquement sous l'effet des forces de la pesanteur, (les freins sont désactivés).

A ce moment, le bras 1, puisque vertical, n'est soumis à aucune force et reste donc immobile. Par contre, les bras 2 et 3 subissent la force de pesanteur et atteignent une position d'équilibre où les bras sont verticaux.

Nous obtenons alors une configuration telle que décrite par la figure 3 où sont notées les positions articulaires des 3 bras au temps $t = 5$ s.

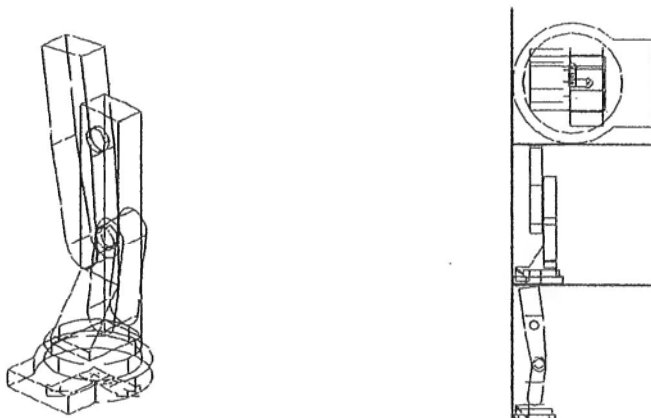


Figure 3. Robot autonome

7. Simulation et visualisation du robot en mode dégradé

La configuration visualisée en figure 3 correspond au mode de fonctionnement normal dans le cas où le robot n'est pas alimenté et fixe les positions articulaires des bras 1, 2 et 3 atteintes au temps $t = 5$ s.

Toute modification de paramètre, conséquence d'une faute survenant sur la structure du robot, produit de nouvelles valeurs des positions articulaires, images d'un fonctionnement dégradé. Cette nouvelle visualisation et sa comparaison avec la visualisation en fonctionnement normal amènent une clarté dans l'interprétation des effets de la faute.

7.1. Injection d'une faute sur l'actionneur

Considérant toujours le cas où les entrées sont nulles, étudions par exemple les effets d'une usure au niveau de l'actionneur du bras 2. Conformément au tableau 3, la correspondance en terme d'altération de paramètre peut se traduire par une augmentation du coefficient de frottement sec F_s .

Simulons le cas où F_s a une valeur égale à 0.05 soit 10^4 fois plus grand que la valeur normale ; il est clair que le mouvement de ce bras s'en trouvera ralenti et qu'au temps $t = 5$ s, la position atteinte ne sera pas aussi grande que dans le cas normal. Ceci est montré en figure 4, où la position en mode dégradé est notée en traits pointillés, tandis que le cas normal reste dessiné en traits continus.

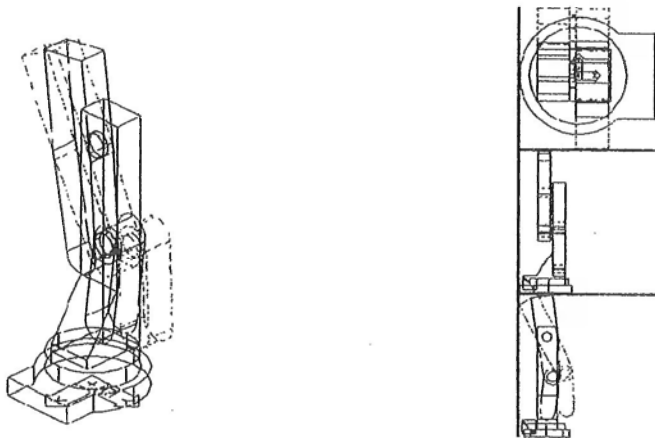


Figure 4. Trajectoires en modes normal et dégradé, avec faute sur l'actionneur

7.2. Injection d'une faute sur l'amplificateur de puissance

Considérons le cas où l'on applique respectivement des tensions de 2, -1 et 0 volts aux bras 1, 2 et 3.

Nous obtenons alors une configuration représentée en traits continus sur la figure 5. Etudions l'effet d'une faute survenant sur l'amplificateur de puissance du bras 1. Le tableau 3 indique une valeur de K nulle, notamment pour le cas où cet amplificateur serait en court-circuit.

Sous cette condition de mode dégradé, la simulation se traduit par une configuration visualisée en traits pointillés en figure 5 où il est à noter que le bras 1 reste immobile, (non transmission de la consigne de puissance puisque K=0).

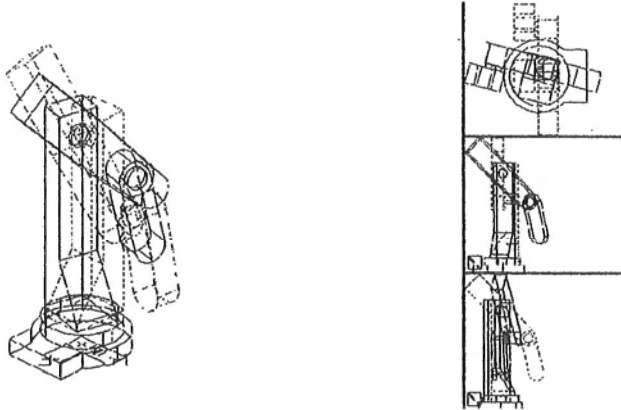


Figure 5. Trajectoires en modes normal et dégradé avec faute sur l'amplificateur de puissance

7.3. Interprétation des résultats - exploitation de Robdiag

Les deux situations traitées d'injection de fautes dans des cas élémentaires ont permis de mettre au point les différents modules de Robdiag et donc de le valider. L'intérêt d'un tel outil est maintenant de pouvoir répondre à des situations où il n'est pas évident d'appréhender l'effet d'une faute.

Considérons le système d'équations 5 ; en développant ce système nous pouvons remarquer que le modèle est constitué de deux systèmes structurellement découplés.

Le premier système concerne l'articulation 1, il est caractérisé par l'équation 7

$$N_1 K_c K_1 V_1 = H_{11} \ddot{q}_1 + F_{11} \dot{q}_1 + P_1 \quad (7)$$

Le second système concerne les deux articulations 2 et 3 et est caractérisé par le système de deux équations 8 :

$$\begin{bmatrix} N_2 K_c & {}_2K_2 V_2 \\ N_3 K_c & {}_3K_3 V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{22} & H_{23} \\ H_{23} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{22} & F_{23} \\ 0 & F_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Nous pouvons ainsi considérer chaque système séparément. Ceci ne modifie en rien la démarche générale mais permet une simplification des traitements.

- Le premier système d'état s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ b_{11} \end{bmatrix} v_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ G_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

en posant comme vecteur d'état : $[x_1 \ x_2]^t = [q_1 \ \dot{q}_1]^t$

- Le deuxième système d'état est donné par :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & a_{22} & a_{23} \\ 0 & 0 & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ b_{22} & b_{23} \\ b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad (10)$$

en posant comme vecteur d'état : $[x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6]^t = [q_2 \ q_3 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3]^t$

où les a_{ii} , b_{ii} et G_i sont dans les systèmes (9) et (10) fonctions de F_{ii} , H_{ii} , N_i , K_{ci} , K_{ci} et P_i .

Les deux dernières équations du système 10 mettent en évidence le couplage des variables des bras 2 et 3. Ainsi toute modification d'un paramètre du bras 2 influe, de façon non évidente, sur les positions et vitesses articulaires du bras 3.

Le rôle de Robdiag est, à ce moment, de permettre pour chaque cas de variation d'un paramètre, d'associer la configuration du robot à la variation du paramètre concerné et offrir ainsi une connaissance plus complète du robot en mode dégradé.

8. Etude des positions et vitesses articulaires en fonction d'un paramètre donné

Compte tenu des simulations effectuées, il apparaît que si l'étape de détection des erreurs est a priori envisageable de façon relativement aisée, la première phase de diagnostic, à savoir la localisation des fautes, à partir des informations sur les positions et vitesses articulaires, apparaît comme très difficile. Un point intéressant est, à ce moment, d'étudier les allures des positions et vitesses articulaires en fonction de la variation d'un paramètre donné, en anticipant le fait que celles-ci puissent porter la signature de la faute.

Nous allons étudier l'influence de la variation du coefficient de frottement sec F_s du bras 1. Les entrées sont égales pour le bras 1 à 2 volts et 0 volt pour les bras 2 et 3.

Pour une simulation en mode normal, les positions articulaires des bras 1, 2 et 3 sont représentées en figure 6, toujours au temps $t = 5$ s. La valeur du coefficient de frottement sec du bras 1 a pour grandeur sa valeur normale.

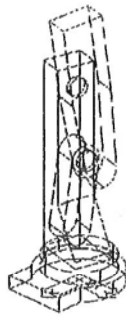
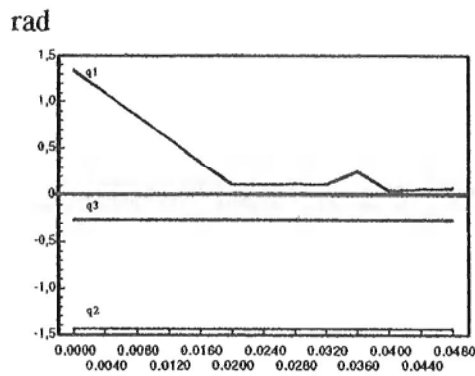


Figure 6. Mode normal du robot

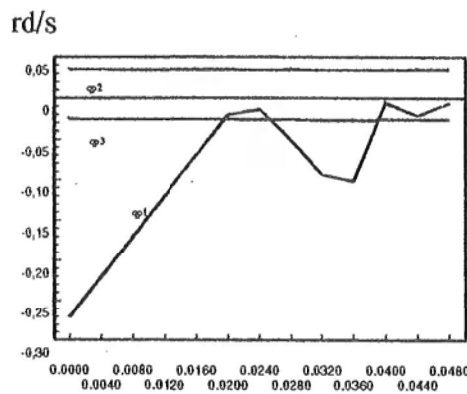
Nous allons établir et tracer les allures des positions et vitesses articulaires des 3 bras en fonction du coefficient de frottement sec du bras 1.

La borne inférieure du domaine de variation est choisie comme étant la valeur normale, tandis que la borne supérieure est choisie 1000 fois plus grande que cette valeur normale, voir figures 7a et 7b.



Fs1

Figure 7a. Positions articulaires du robot



Fs1

Figure 7b. Vitesses articulaires du robot où φ_i est noté en remplacement de \dot{q}_i .

Les positions articulaires des bras 2 et 3 ne sont pas influencées par les variations du coefficient de frottement sec du bras 1. Au fur et à mesure que ce coefficient augmente, la valeur de la position articulaire du bras 1 diminue. Il en est de même pour la vitesse articulaire. A partir d'une certaine valeur, cette dernière oscille autour d'une valeur très proche de 0, le bras 1 s'immobilise. Tout se passe comme si le couple résistant était supérieur au couple moteur.

Robdiag autorise donc l'enregistrement des profils de variations des positions et vitesses articulaires en fonction d'un paramètre du modèle dynamique. Le système de détection et diagnostic devra être conçu de façon à surveiller ces évolutions des positions et vitesses articulaires.

9. Conclusion

Nous avons conçu Robdiag afin de disposer d'un outil qui permette, lors d'une phase d'analyse préalable à toute conception d'algorithmes de diagnostic, d'étudier l'effet attendu des fautes sur les positions et vitesses articulaires d'un robot. Les fautes sont injectées par modification de certains paramètres du modèle dynamique.

L'utilisation d'un outil graphique permet d'assurer une bonne présentation des résultats, mais surtout facilite l'interprétation de l'influence des fautes sur le mouvement du robot. Il est à noter, à ce niveau, que cette démarche est généralisable à tout système dynamique.

Nous avons, pour valider nos algorithmes, étudié deux cas simples où les fautes considérées étaient relatives à une usure (ou un défaut de graissage) de l'actionneur du bras 2 et un court-circuit de l'amplificateur du bras 1.

Les résultats illustrés par les figures 5 et 6 sont en accord avec ce qui est prévisible, à partir du moment où l'on possède une certaine expérience dans la conduite de tels systèmes. Les routines de simulation, les échanges de données entre Simnon et Autocad, les modules de programmation en Autolisp de dessin sont donc validés.

Le second module de Robdiag autorise l'enregistrement des profils des positions et vitesses articulaires en fonction des variations d'un paramètre donné et permet donc la création d'une base de données susceptible d'être exploitée en phase de diagnostic.

Cette phase de création d'une base de connaissance liée à la conception d'algorithmes de diagnostic peut donc commencer avec un outil d'aide au diagnostic performant.

10. Bibliographie

[BER 95] BERGOT M., GRUDZIEN L., « Sécurité et diagnostic des systèmes industriels. Principaux concepts, méthodes, techniques et outils », *Revue européenne Diagnostic et sûreté de fonctionnement*, vol. 5, N° 3, 1995.

- [COI 86] COIFFET P., *La robotique, principes et applications*, édition Hermès, 1986.
- [DOM 88] DOMBRE E., KHALIL W., *Modélisation et commande des robots*, édition Hermès, 1988.
- [DUB 90] DUBUISSON B., *Diagnostic et reconnaissance des formes*, édition Hermès, 1990.
- [FRE 91] FREYERMUTH B., « Knowledge based incipient fault diagnosis of industrial robots », *Safeprocess '91, IFAC Symposia series*, N° 6 pp. 369-375, 1992.
- [ISE 91] ISERMAN R., Fault diagnosis of machines via parameters estimation and knowledge processing », *Safeprocess '91, FAC Symposia series*, N° 6 pp. 43-55, 1992.
- [LAP 95] LAPRIE J. C., *Guide de la sûreté de fonctionnement*, édition Cépaduès, 1995.
- [LEI 93] LEITCH R., « Engineering diagnosis : matching problems to solutions » *Tooldiag 93*, Toulouse. Vol. 3, pp. 837-844, 1993.
- [NOU 94] NOUREDDINE F., LAZEREGUE M., NOYES D., « Fault detection-location in robots using a scheme of observers », *Ifac Symp. Safeprocess '94*, vol.1 pp. 341-346, June 13-16, Helsinki, 1994.
- [SIE 94] SIEDLER T., « Fault diagnosis for robots », *Symp. Safeprocess '94*, vol.1 pp. 1-, June 13-16, Helsinki, 1994.
- [TZA 89] TZAFESTAS S., System fault diagnosis using the knowledge-based methodology. *Fault diagnosis in dynamic systems ; Theory and applications*. Edité par Ron Patton, Paul Frank and Robert Clark, Prentice Hall, (1989).
- [ZWI 95] ZWINGELSTEIN G., *Diagnostic des défaillances*, édition Hermès, 1989.