

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

MAHDADI Mohamed & BOUAFIA Hichem

Thème

**ETUDE COMPARATIVE DES INDICES D'OBSERVABILITE POUR
L'ETALONNAGE DES ROBOTS**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
DEBIH ALI	MCA	Président
SLAMANI MOHAMED	PR	Encadreur
MAKRI Hocine	MCA	Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous n'oublions pas d'adresser nos sincères remerciements à notre Dieu le grand créateur qui a guidé nos pas pour arriver à ce niveau.

Il nous est très agréé de pouvoir exprimer nos reconnaissances et nos gratitude envers ceux qui ont su contribuer de près ou de loin à la réalisation et à l'aboutissement de ce modeste travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à Monsieur Dr. Slamani Mohamed. Docteur à l'Université Mohamed Boudiaf (M'sila), pour la confiance qu'il nous a accordée en acceptant la direction de notre mémoire de fin d'études de master, son dévouement, sa disponibilité et ses conseils.

Nous remercions le Dr. DEBIH Ali, Docteur à l'Université Mohamed Boudiaf (M'sila), qui nous a fait l'honneur de présider le jury.

Nos sincères remerciements à monsieur le Dr. MAKRI Hocine, Docteur à l'Université Mohamed Boudiaf (M'sila), qui nous a fait l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos enseignants du département du génie mécanique de l'université de Mohamed Boudiaf (M'sila), de nous avoir fait profiter de leurs expérience scientifique et pour les précieux enseignements et conseils qu'ils nous ont prodigués tout au long de notre parcours d'étude.

Nous ne pourrions terminer ces remerciements sans y associer nos familles, nos parents, nos frères et sœurs, et tant d'autres sans le soutien desquels nous n'aurions pu entreprendre ces études.

Dédicace

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail :

A l'âme de mon père ;

A ma mère ;

A mes chères sœurs ;

A mes chers frères ;

A tous mes amis et collègues ;

A tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.

Mohamed ✍

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma mère.....

Le proverbe dit : « derrière chaque grand homme une femme », ma chère mère est l'idéal, ces succès et ces efforts ont été soutenus et encouragés grâce à elle beaucoup.

A mon père, école de mon enface, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner aide et à me protéger.

Que dieu les gardes et les protège.

Je remercie tous mes amis qui m'ont soutenu dans mon étude d'eux : bouafia alaeddine et sahraoui Faouzi et hadji mamdouh et mon cousin qui a été une grande aide pour moi sur ce projet

All the best

Bouafia hichem

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	09
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE I : GENERALITES ET REVUE LITIRATURE

I. Introduction	12
II. Robotique de service	13
III. Classification des robots.....	13
III.1 Robots sériels.....	15
III.2 Robots parallèles.....	16
III.3 Comparaison des robots parallèles et sériels.....	17
IV. Précision absolue, répétabilité et résolution.....	18
V. Causes de manque de précision des robots industriels et approches d'étalonnage appropriées.....	18
V.1 Facteurs articulaires.....	19
V.2 Facteurs géométriques.....	19
V.3 Facteurs non géométriques.....	20

CHAPITRE II : INDICES D'OBSERVABILITÉ

I. Introduction.....	22
I.1 Le premier indice.....	24
I.2 Le deuxième indice.....	24
I.3 Le troisième indice.....	25
I.4 le quatrième indice.....	25
I.5 Le cinquième indice.....	25

CHAPITRE III : MODÉLISATION GÉOMÉTRIQUE DU ROBOT

INDUSTRIEL IRB120

I. Introduction.....	28
II. Présentation du robot (Structure du robot manipulateur IRB-120)	28
III. Modèle géométrique	29

III.1 Géométrie directe	30
III.1.1 Analyse cinématique directe du robot manipulateur IRB-120 6 DOF...	32
III.1.2 Exemple numérique.....	35
III.2 Géométrie inverse.....	37
III.2.1 Analyse cinématique inverse du robot manipulateur IRB-120 6 DOF .	37
III.2.2 Exemple numérique.....	41

CHAPITRE IV : Sélection de l'indice d'observabilité pour l'étalonnage du robot

I. Critères et procédure de sélection	44
--	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Structure générale d'un robot industriel.....	12
Figure I.2 : Classification des robots selon leur structure cinématique.....	14
Figure I.3 : Robots sériels (a) ABB IRB 2400 (b) KUKA KR 30 jet (c) Stäubli TS80 SCARA.....	15
Figure I.4: Espace de travail les Robots ABB IRB 140 et 2400.....	16
Figure I.5: Robot Delta (a) ABB IRB 340 (trois ddl)	17
Figure I.6 : Atteinte de positions selon la précision et la répétitivité.....	18
Figure I.7 : Sources de manque de précision des robots et approches d'étalonnage correspondante [10]	19
Figure II.1 : Représentation géométrique de la relation entre les erreurs des poses et des paramètres. Tirée de Nahvi et Hollerbach (1996).....	24
Figure III.1 : Aspects importants du robot IRB-120 (Unité: mm).....	29
Figure III.2: Structure du modèle cinématique.....	30
Figure III.3: allocation paramétrée de trame D-H	31
Figure III.4 Paramètres D-H du robot IRB-120.....	32
Figure III.5 : Schéma des systèmes de coordonnées, des articulations, des angles des articulations et des centres de masse du robot IRB-120.....	33
Figure III.6 : Placement du robot ABB IRB 120 dans les variables cinématique directes Pour $\theta = [0 ; 0; 0 ; 0 ; 0 ; 0]$	35
Figure III.7 : Placement du robot ABB IRB 120 dans les variables cinématique directes Pour $\theta = \left[0 ; 0; -\frac{\pi}{2} ; -\frac{\pi}{2} ; \frac{\pi}{2} ; -\frac{\pi}{2} \right]$	36
Figure III.8 : Schéma montre la cinématique inverse.....	38
Figure III.9 : robot ABB IRB 120 avec systèmes de coordonnées et articulations.....	38
Figure III.10 : Les huit configurations du tableau III.3.....	42
Figure IV.1: Indice d'observabilité O1 en fonction du nombre de poses d'étalonnage.....	50
Figure IV.2. Convergence vers une solution pour l'indice O1.....	51

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Comparaison entre les robots parallèles et sériels.....	17
Tableau III.1 : Gamme de changements dans les axes communs du robot IRB-120...	29
Tableau III.2 : Paramètres D-H du robot IRB-120.....	33
Tableau III.3 : Résultats de la cinématique inverse	42
Tableau IV.1 : Les 19 paramètres retenus	49
Tableau IV.2 : Paramètres vrais versus paramètres estimés pour chaque indice d'observabilité.....	52
Tableau IV.3 : Comparaison de la performance de chaque indice.....	52

INTRODUCTION GENERALE

Depuis la naissance de l'industrie robotisée, les robots industriels ont été conçus afin de remplacer les humains dans des tâches répétitives, fatigantes et qui impliquent souvent un travail manuel dangereux. Actuellement, grâce à l'augmentation de la production et à la diminution des prix, les robots industriels sont utilisés dans une infinité d'applications, dans les domaines de l'industrie, de la médecine et militaire. Cette utilisation doit satisfaire une exigence de précision de plus en plus forte. Pour répondre à cette demande, il est nécessaire de connaître avec exactitude le modèle géométrique des structures mécaniques sérielles ou parallèles employées. Quels que soient les modèles employés pour représenter la géométrie des robots, leur précision dépend de l'exactitude des paramètres implantés dans les calculateurs.

Les erreurs géométriques de pose de l'effecteur de l'outil sont principalement dues aux erreurs de transformation cinématique résultant des incohérences entre le comportement du modèle géométrique implémenté dans la commande du robot et le comportement géométrique réel de la structure du robot. En effet, la structure du robot est fabriquée et usinée, le comportement géométrique du robot est donc influencé par les défauts d'usinage et d'assemblage des éléments.

Ces défauts bornés par le tolérancement mis en place génèrent un écart entre les dimensions nominales du robot et les dimensions réelles de la structure assemblée. Il est alors nécessaire d'identifier les dimensions influentes sur la pose de l'effecteur final et de les maîtriser par un tolérancement adapté, par le développement d'un modèle géométrique adapté associé à une méthode d'identification de ces paramètres géométriques. Les modèles géométriques des robots reposent généralement sur un ensemble d'équations mathématiques permettant de définir la pose de l'effecteur final en fonction des valeurs des variables articulaires et de paramètres géométriques. Les méthodes de modélisation les plus répandues reposent généralement sur le formalisme de Denavit-Hartenberg (D-H). Ce formalisme est enrichi par divers travaux scientifiques afin de s'adapter plus particulièrement à certains types de structures. Toutefois, la complexité des modèles développés ne garantit pas une meilleure précision géométrique. En effet, l'ajout de paramètres géométriques rend le modèle plus sensible aux erreurs d'identification. Il est nécessaire de limiter le nombre de paramètres géométriques aux paramètres influents et identifiables. De même, afin d'améliorer la précision de réalisation d'une tâche, il est nécessaire d'étudier l'influence de chaque

paramètre géométrique sur la tâche et d'identifier ses paramètres dans les conditions de réalisation de la tâche.

En fait, durant l'identification des paramètres, les résultats numériques peuvent être divergeant, en présence de bruits élevés dans les valeurs mesurées. Ainsi, choisir les poses d'étalonnage adéquates en faisant recours à une analyse d'observabilité devient indispensable pour éviter ce problème d'instabilité et avoir des solutions convergentes.

Le but de la présente étude est de contribuer à l'amélioration de la précision absolue d'un robot manipulateur sériel à six degrés de liberté en se basant sur l'approche d'indice d'observabilité. Une comparaison par simulation est réalisée afin de déterminer l'indice d'observabilité le plus approprié, ce qui permet la meilleure identification des paramètres d'un robot calibré, et donc conduisant à la meilleure amélioration de la précision du robot.

Le reste de ce mémoire est organisé comme suit : Le premier chapitre présente des généralités sur les robots plus une vue d'ensemble de la littérature théorique et empirique récente sur l'étalonnage des robots. Le deuxième chapitre traite la théorie reliée à l'utilisation des cinq indices d'observabilité, tandis que le troisième chapitre est consacré à la modélisation géométrique du robot industriel ABB IRB120 qui fait l'objet de cette étude. Le quatrième chapitre propose une étude comparative des indices d'observabilité utilisés pour l'étalonnage du robot ABB IRB120. Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :

**Généralités et revue de
littérature**

Chapitre I : Généralités et revue de littérature

I. Introduction

Un robot manipulateur, quelle que soit la fonction qui lui est attribuée (transfert d'objet, soudage, assemblage), est un mécanisme capable de déplacer et de situer un objet appelé « organe terminal » ou « point outil » dans une partie de l'espace appelé « volume de travail ».

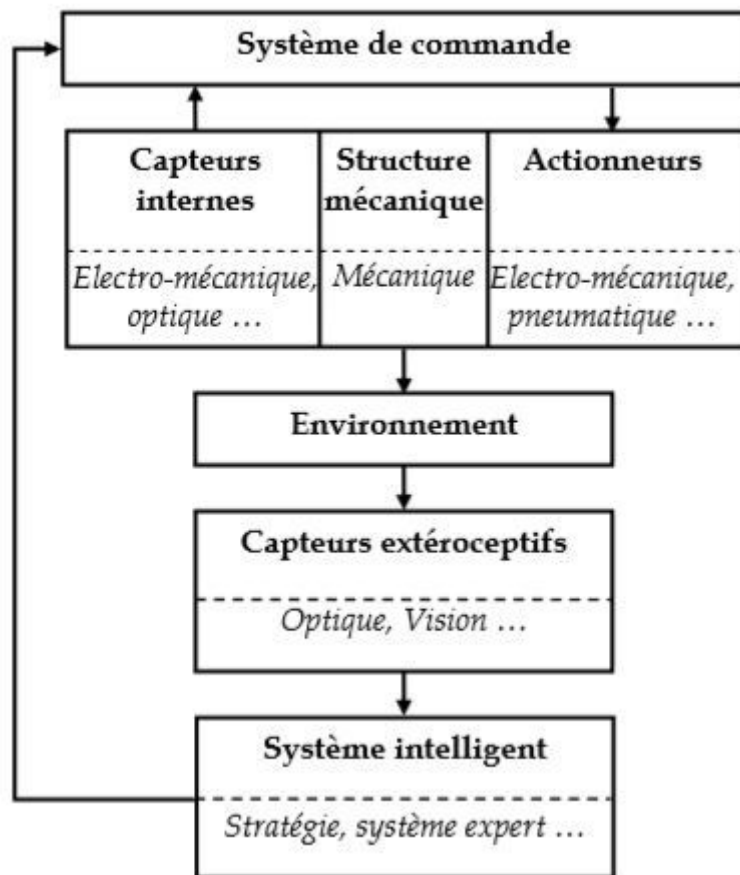


Figure I.1 : Structure générale d'un robot industriel.

Afin de différencier les robots que nous allons étudier des manipulateurs simples dont les mouvements sont déterminés par des butées rigides, nous parlerons de « robot industriel » dont la définition générale est donnée ci-dessous. Un robot industriel est un manipulateur à plusieurs degrés de liberté contrôlé automatiquement, reprogrammable et multitâche qui peut être fixe ou mobile pour une application en automatisation industrielle.

Autre définition : (Robot industriel pour manipulation). Système de manipulation programmable de trois axes ou plus, à usage multiple, contrôlé automatiquement,

reprogrammable, qui peut être mobile ou fixe lors de son utilisation automatique (définition ISO 8373).

Le robot industriel se compose d'une structure mécanique animée par des actionneurs, à partir d'ordres élaborés par un ordinateur (Figure I.1). Ces ordres dépendent des informations délivrées par les capteurs. L'utilisation de capteurs externes, capteurs « extéroceptifs », pour évaluer et mesurer l'interaction du robot avec l'environnement directement depuis son organe terminal devient une pratique de plus en plus courante dans les applications robotiques de haute précision.

II. Robotique de service

Si la robotique est restée pendant longtemps relativement confinée à des applications industrielles manufacturières, les avancées technologiques font que depuis quelques années de nombreux autres domaines sont explorés, en vue notamment de développer une robotique de service.

Un robot de service est un robot mi ou totalement autonome accomplissant un travail directement utile à un usager ou sur un équipement, à l'exception des tâches de production industrielle.

On peut citer ici quelques domaines d'utilisation des robots de service : robotique médicale (chirurgie télé opérée), robotique de manutention, robotique d'exploration et de surveillance (terrestre, sous-marine, aérienne, spatiale), robotique pour la sécurité civile, robotique agricole, robotique minière, robotique militaire (déminage, soldat robotisé, drone), robotique de chantier (ou du bâtiment), robotique de nettoyage et d'entretien, robotique de divertissements (jouets, robots de compagnie), robotique d'aide à la personne (aide aux handicapés, prothèses), etc.

III. Classification des robots

Les robots peuvent être classifiés selon divers critères comme : le nombre de degrés de liberté, leur structure cinématique, la taille et la forme de leur espace de travail ou les caractéristiques de leur mouvement. Les robots peuvent alors être aussi définis comme des robots sériels (figure II.2a), des robots parallèles (figure II.2b) ou des robots hybrides. Chacun

possédant des avantages et des inconvénients par rapport à l'autre, les deux divisions ont évolué cote à cote pendant plusieurs années.

Un robot est dit sériel lorsqu'il a une structure basée sur une chaîne cinématique ouverte constituée parue succession de corps rigides ou bras chacun d'eux liés à son prédécesseur par une articulation à un degré de liberté.



a) Robot ABB IRB 2400.



b) Robot ABB IRB 360.

Figure I.2 : Classification des robots selon leur structure cinématique.

Les robots sériels sont caractérisés par leur conception : ils possèdent un seul enchaînement d'articulation de leur base jusqu'à la plaque de montage de l'outil. Leurs mouvements sont similaires à ceux d'un bras humain. Ils possèdent l'avantage d'avoir une grande enveloppe de travail. Par contre, l'enchaînement de leur mécanique diminue leur précision et leur répétabilité. Ces robots sont principalement utilisés comme manipulateurs dans les domaines de la soudure, la palettisation ou encore la peinture. Les robots parallèles, aussi appelés machines à cinématique parallèle, possèdent plusieurs enchaînements d'articulation de leur base jusqu'à la plaque de montage de l'outil. Cette caractéristique leur permet d'avoir une grande rigidité structurale, une grande capacité de charge, de haute vitesse et accélération de l'effecteur et une grande précision de l'effecteur. Ils sont utilisés principalement dans les domaines tels la chirurgie, l'usinage, la manufacture de composants électroniques ou encore l'assemblage.

III.1 Robots sériels

Ces robots sont composés de plusieurs liens montés en série, entre une base et un élément terminal (Figure I.3), formant ainsi une chaîne cinématique ouverte. Le mouvement de chacun de ces liens est effectué au niveau d'une articulation par un servomoteur, via un système de réduction de vitesse (boîte d'engrenages). Les mouvements sont asservis grâce des signaux de rétroaction provenant d'encodeurs. La similarité morphologique entre la structure des robots sériels et celle du bras humain, offre plus de versatilité à ces manipulateurs. Cependant, leur structure sérielle fait en sorte que chacun des servomoteurs supporte les liens subséquents, ce qui explique le fait que les actionneurs sont de plus en plus gros, en allant de l'effecteur vers la base du robot. Ce phénomène d'accumulation de lâchage cause une amplification non-souhaitable des erreurs, en allant de la base vers l'effecteur.



(a)



(b)



(c)

Figure I.3 : Robots sériels (a) ABB IRB 2400 (b) KUKA KR 30 jet (c) Stäubli TS80 SCARA

L'espace de travail d'un robot sériel est défini comme l'espace atteignable par l'effecteur final (FigI.4). La taille de l'espace de travail est fonction de plusieurs facteurs : le nombre de degrés de liberté, la longueur des éléments constituant le robot, la disposition des articulations, les limites des articulations et les interférences mécaniques entre ses éléments.

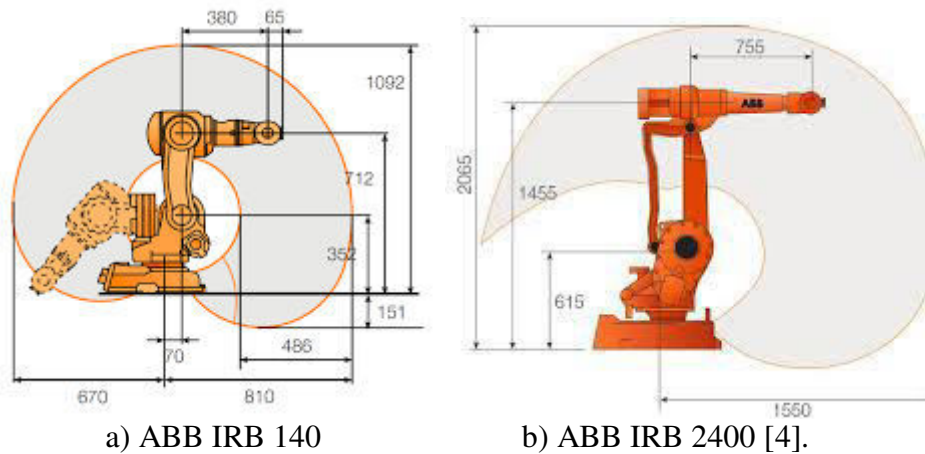


Figure I.4: Espace de travail des Robots ABB IRB 140 et 2400.

III.2 Robots parallèles

Ces robots sont composés de plusieurs chaînes cinématiques indépendantes (jambes ou segments) montées en parallèle (Fig.I.5). Celles-ci lient la base du manipulateur à son organe terminal, formant par conséquent une chaîne cinématique fermée. Cette structure fermée permet une meilleure répartition des charges du robot sur ses différentes composantes et lui donne plus de rigidité, tout en restreignant son espace de travail. En outre, la morphologie décente catégorie de robots offre une excellente répétabilité et éventuellement, une meilleure précision, suite à leur étalonnage. Notons ici que le facteur de répétabilité influence directement la précision après étalonnage.



Figure I.5 : Robot Delta (a) ABB IRB 340 (trois ddl)

III.3 Comparaison des robots parallèles et sériels

Comme nous l'avons expliqué dans les deux sections précédentes, chaque catégorie de robots représente des points forts et des points faibles. En synthèse, voici un tableau comparant leurs caractéristiques :

Tableau I.1 : Comparaison entre les robots parallèles et sériels

Caractéristiques	Robots parallèles	Robots sériels
Modèles cinématiques (Majarena <i>et al.</i> , 2010)	Généralement complexes et moins standardisés	Simple et plus standardisés
Espace de travail	Restreint	Large
Versatilité	Faible	Élevée
Répétabilité (Merlet, 2006)	Très bonne	Plus faible
Précision	Bonne (après ÉG)	Plus faible, même après ÉG
Rapport charge utile/masse du robot (Patarinski, 1993)	Élevé	Plus faible
Rigidité (Patarinski, 1993)	Élevée	faible
Capacité dynamique (Patarinski, 1993)	Bonne	Plus faible

IV. Précision absolue, répétabilité et résolution

La précision d'un robot est définie par la déviation entre une position commandée et l'apposition atteinte de l'effecteur (position et orientation). Cette déviation est définie dans un repère de référence et est quantifiée par la précision absolue et la répétabilité.

La répétabilité nommée également précision relative, est la capacité d'un robot à retourner aune position précédente. Elle est définie par la dispersion sur la position de l'organe terminal visée « n » fois (FigureI.6). Elle est influencée essentiellement par les jeux et le frottement entre les différents composants mécaniques du robot, le bruit électrique, la résolution des encodeurs, et d'autres erreurs de type stochastique.

La précision absolue correspond à la tolérance à l'intérieur de laquelle l'effecteur peut être placé par rapport à la position désirée. Elle est principalement limitée par des facteurs tels quelles perturbations de l'environnement de travail, la différence entre la structure réelle et le modèle géométrique utilisé par le contrôleur, l'effet des forces de frottement, les jeux dans les articulations, les déflexions des articulations et des segments de la structure, la boucle dérèglage et l'incertitude entre le repère de référence et celui de l'effecteur.

La résolution d'un robot représente le plus petit incrément de déplacement qui peut être exécuté (FigureI.6). Elle est déterminée par le type d'actionneur et les capteurs de position. Cependant, la résolution effective par rapport à l'organe terminal peut être influencée par l'environnement de travail, le frottement, les jeux et l'élasticité dans la structure du robot.

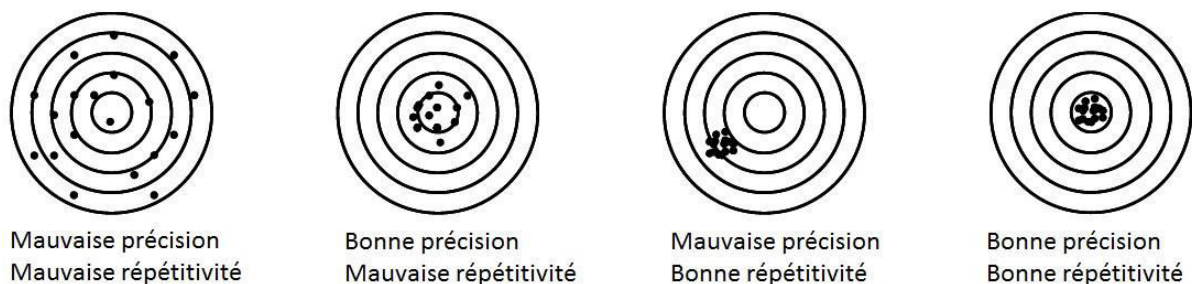
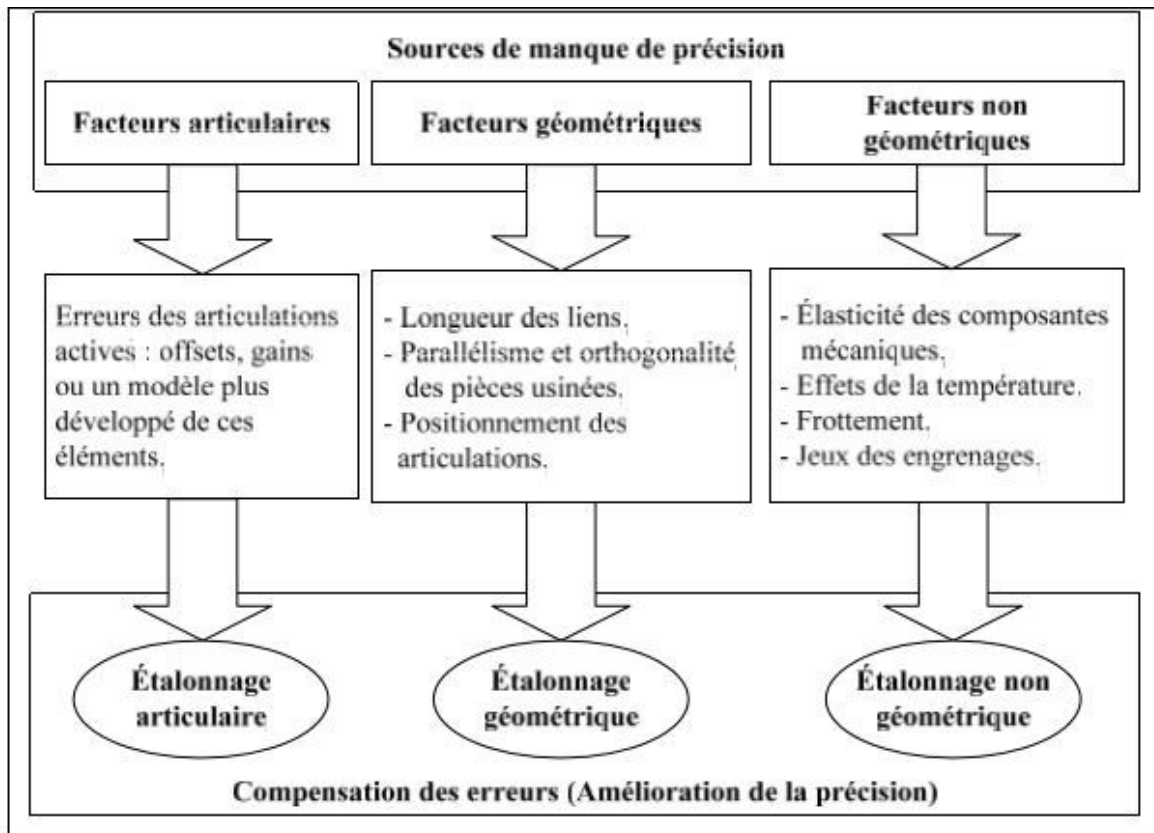


Figure I.6 : Atteinte de positions selon la précision et la répétabilité

V. Causes de manque de précision des robots industriels et approches d'étalonnage appropriées

Plusieurs travaux de recherche ont discuté de l'origine des erreurs de poses des robots industriels (Schroer, 1994; Greenway, 2000). Celles-ci sont attribuées aux erreurs désarticulations actives, à la précision des modèles cinématiques et aux erreurs occasionnées

parles aspects mécaniques des robots. Ces sources d'erreurs, présentées à la FigureI.7, sont appelées respectivement, les facteurs articulaires, les facteurs géométriques et les facteurs non géométriques.



FigureI.7 : Sources de manque de précision des robots et approches d'étalonnage correspondantes [10].

V.1 Facteurs articulaires

Ces facteurs de manque de précision correspondent aux erreurs des capteurs des articulations actives du robot. Elles représentent les différences entre les valeurs fournies par les encodeurs des actionneurs et les mouvements articulaires réellement effectués.

V.2 Facteurs géométriques

Les facteurs géométriques sont liés à la précision du modèle cinématique du robot, utilisé par son contrôleur pour calculer les mouvements de l'effecteur. Un modèle qui ne représente pas exactement la géométrie réelle du robot est une source fondamentale de manque de précision.

Les principales causes d'erreurs géométriques sont:

- ✓ les longueurs nominales des liens différentes des longueurs réelles. Ceci est causé principalement par les tolérances de fabrication et d'assemblage;
- ✓ les caractéristiques géométriques des pièces usinées (parallélisme, orthogonalité, planéité, etc.);
- ✓ le positionnement des articulations liées à la base et à l'élément terminal du robot;
- ✓ les erreurs de localisation du référentiel de la base du robot par rapport à celui de la cellule;
- ✓ les erreurs de localisation du référentiel de l'outil sur l'organe terminal.

V.3 Facteurs non géométriques

Les facteurs non géométriques sont attribués à la qualité des composantes mécaniques du robot. Ils comptent plusieurs éléments dont voici les principaux :

- ✓ l'élasticité des composantes mécaniques;
- ✓ les jeux mécaniques, notamment ceux des engrenages;
- ✓ les effets de la température.

Bien que tous ces éléments (articulaires, géométriques et non géométriques) contribuent à dégrader la qualité de la précision des robots, leurs degrés d'impact varient. Plusieurs recherches démontrent que ce sont les erreurs articulaires et celles d'origine géométrique qu'affectent le plus la précision des robots. Ainsi, selon Judd et Knasinski (1990) et Damak(1996), les sources de manque de précision sont classées par ordre d'importance comme suit :

- les erreurs articulaires (offsets de la position zéro et gains);
- les erreurs causées par les tolérances d'usinage et d'assemblages (erreurs géométriques);
- les erreurs non géométriques.

Chapitre II:

Indices d'observabilités

CHAPITRE II : INDICES D'OBSERVABILITES

I. Introduction

Cinq indices d'observabilité ($O_1 \dots O_5$) sont présentés dans la littérature. Ils sont issus de l'analyse de la décomposition en valeurs singulières (SVD) de la matrice Jacobine d'indentification J . Cette dernière représente les dérivées des équations de la cinématique (équations utilisées dans le processus d'étalonnage) par rapport au vecteur des paramètres à identifier au voisinage des poses d'étalonnage. Soit J la matrice jacobine d'identification, qui représente la relation entre les erreurs de pose dans les configurations d'étalonnage (dX), et les erreurs de paramètres (Δ)

$$dX = J \Delta \dots\dots\dots (II.1)$$

Dans cette section, nous considérons que tous les paramètres sont identifiables et indépendants, c.-à-d. la matrice Σ de l'analyse SVD génère un nombre n des valeurs singulières σ_i non nulles (rang = n) égal au nombre des paramètres à identifier. En utilisant le SVD, Eq. (II.1) devient :

$$dX = (U\Sigma V')\Delta \dots\dots\dots (II.2)$$

Où U et V sont des matrices orthogonales et Σ est la matrice diagonale, composée de valeurs singulières σ_i ($i = 1 \dots m$), disposées en un ordre décroissant. Pour m paramètres identifiables, Σ est présenté comme suit :

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_m \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.3)$$

Le nombre de lignes de Σ correspond au nombre d'équations utilisées pour l'étalonnage et le nombre de colonnes représente le nombre de paramètres à identifier. Par exemple, dans le cas d'un robot à trois ddl, la dimension de Σ sera $3m \times n$, où m correspond au nombre de poses d'étalonnage.

Notons que nous différencions la pose d'étalonnage de la configuration d'étalonnage, car, pour la plupart des robots, une pose donnée peut être obtenue avec plusieurs configurations différentes. Pour une pose donnée, une configuration spécifique peut être

obtenue en utilisant le mode de travail approprié, qui est représenté par une combinaison de coefficients binaires (± 1) associés à la cinématique inverse de chaque bras.

L'explication suivante des indices d'observabilité suppose que tous les paramètres sont identifiables et indépendants, c'est-à-dire que le nombre m de valeurs singulières non nulles σ_i est égal au nombre de paramètres à identifier (dans le cas de la redondance des paramètres, certains d'entre eux peuvent être regroupés pour rendre le nombre de paramètres qui sera identifié égal au rang de J). Compte tenu de cette hypothèse, les erreurs dans les paramètres Δ sont observables à partir des erreurs de pose d'étalonnage dX . Selon Borm et Menq, en considérant le vecteur Δ comme constant, les erreurs de pose dX forment un ellipsoïde les erreurs de pose dont la norme $\|dX\|$ est bornées par $\sigma_m \|\Delta\|$ et $\sigma_1 \|\Delta\|$.

Les σ_i nous fournissent de l'information sur la capacité du système mathématique à identifier les paramètres. Le fait que les σ_i changent de valeurs selon les poses d'étalonnage explique l'importance de bien choisir ces poses. Ainsi, les indices d'observabilité nous permettent de faire des liens quantifiables entre les poses d'étalonnages, et par le fait même les valeurs des σ_i , d'un côté et l'efficacité d'identification des paramètres de l'autre. Les formules mathématiques de calcul des indices d'observabilité sont présentées dans les paragraphes qui suivent. Pour donner plus de sens à ces calculs, nous présentons leurs significations géométriques.

Selon Menq *et al.* (1989), si toutes les valeurs singulières σ_i sont différentes de zéro, les erreurs des paramètres Δ sont observables à partir des erreurs mesurées dX des poses d'étalonnage. Géométriquement, en considérant que le vecteur Δ est constant, les erreurs dX forment un ellipsoïde dont la norme $\|dX\|$ est limitée par $\sigma_1 \|\Delta\|$ comme valeur maximale et $\sigma_m \|\Delta\|$ comme valeur minimale :

$$\sigma_m \leq \frac{\|dX\|}{\|\Delta\|} \leq \sigma_1 \dots\dots\dots(II.4)$$

Pour une meilleure visualisation géométrique, Nahvi et Hollerbach (1996) proposent l'approche suivante : en assumant que les erreurs des paramètres sont englobées dans un cercle de rayon unité, les erreurs de poses qui en résultent forment un ellipsoïde dont les axes sont les valeurs singulières σ_i de J (Figure II.1) Ainsi, ce phénomène peut être figuré comme

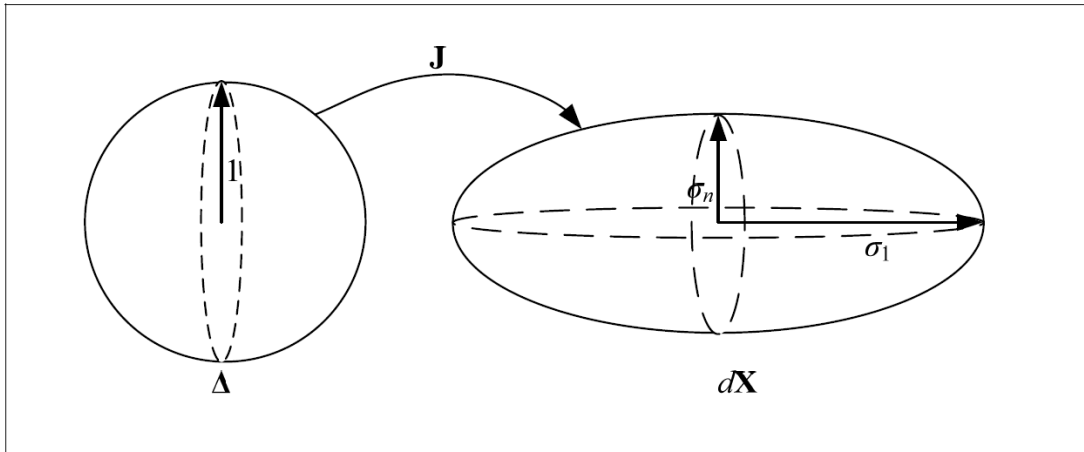


Figure II.1 : Représentation géométrique de la relation entre les erreurs des poses et des paramètres. Tirée de Nahvi et Hollerbach (1996).

I.1 Le premier indice

Le premier indice, introduit par Borm et Menq, provient de la signification géométrique de σ_i . L'objectif est de maximiser le produit des valeurs singulières, ce qui signifie augmenter le volume de l'ellipsoïde, comme expliqué par Nahvi et Hollerbach. L'estimation des paramètres est dite meilleure, en ce que cet indice permet de trouver des configurations d'étalonnage où les erreurs de paramètres génèrent les erreurs de pose maximales. Cet indice est défini par l'équation suivante :

$$O_1 = \frac{(\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_m)^{\frac{1}{m}}}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (II.5)$$

Où n est le nombre de configurations d'étalonnage et m est le nombre de paramètres à identifier.

I.2 Le deuxième indice

Le deuxième indice, proposé par Driels et Pathre, est l'inverse du nombre de conditions de J. Maximiser cet indice conduit à des valeurs plus uniformes de σ_i , ce qui améliore l'excentricité d'ellipsoïde. Il en résulte également une minimisation du nombre de conditions, ce qui réduit l'impact du bruit de mesure sur l'identification des paramètres. Cet indice est défini par l'équation suivante :

$$O_2 = \frac{\sigma_m}{\sigma_1} \dots\dots\dots (II.6)$$

I.3 Le troisième indice

Le troisième indice, introduit par Nahvi et Hollerbach, est basé sur la première inégalité d'Eq. (4), ce qui nous permet d'écrire $\sigma_m \|\Delta\| \leq \|dX\|$. Une analyse rapide de cette équation montre que l'augmentation de la valeur singulière minimale de J entraîne des erreurs de pose plus importantes. Par conséquent, σ_m est utilisé comme OI :

$$O_3 = \sigma_m \dots\dots\dots (II.7)$$

L'augmentation de cet indice augmente le plus petit rayon ellipsoïde. Par conséquent, le volume de l'ellipsoïde est maximisé. Cela implique que les configurations d'étalonnage choisies sont plus sensibles aux erreurs de paramètres.

I.4 Le quatrième indice

Nahvi et Hollerbach ont montré que, dans certains cas, l'utilisation séparée des trois premiers OIs (O_1 , O_2 ou O_3) peut être trompeuse, conduisant à des résultats contradictoires dans le choix de l'ensemble optimal de configurations d'étalonnage. Pour pallier cet inconvénient, les auteurs proposent un quatrième indice basé sur le produit de O_2 et O_3 . En incluant cet indice, le petit axe de l'ellipsoïde est plus grand et l'axe maximum plus petit (en d'autres termes, une excentricité plus petite). Cet indice est défini par l'équation suivante :

$$O_4 = O_2 \times O_3 = \frac{\sigma_m^2}{\sigma_1} \dots\dots\dots (II.8)$$

Cet indice est également appelé indice d'amplification du bruit : selon les auteurs qui l'ont proposé, O_4 donne une indication de l'amplification du bruit de mesure et des erreurs non modélisées. Ainsi, l'augmentation de la valeur de cet indice conduit à une précision améliorée du processus d'identification.

I.5 Le cinquième indice

Le cinquième indice est proposé par Sun et Hollerbach, basé sur la minimisation de la somme des inverses de σ_i . Cela conduit à une maximisation de l'inverse de cette somme, notée O_5 et calculée comme suit :

$$O_5 = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1}{\sigma_i}\right)} = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \dots + \frac{1}{\sigma_m}} \dots\dots\dots (II.9)$$

En résumé, cet indice représente la moyenne harmonique de toutes les valeurs singulières divisée par le nombre de paramètres à identifier. Son objectif géométrique est similaire à celui de O_1 , qui est d'augmenter le volume de l'ellipsoïde, entraînant une augmentation de la sensibilité des erreurs de pose d'étalonnage aux erreurs de paramètres.

Chapitre III :

Modélisation

géométrique du robot

industriel IRB120

Chapitre III : Modélisation géométrique du robot industriel IRB120

I. Introduction

Le comportement géométrique nominal d'un robot est différent du comportement réel. L'identification du comportement géométrique est nécessaire pour maîtriser la précision du robot. Cette identification passe par la proposition d'un modèle géométrique et l'identification des paramètres associés. L'identification des paramètres géométriques permet d'améliorer le niveau de précision du robot. L'étalonnage est basé sur la détermination de l'écart entre les valeurs de poses géométriques estimées par le modèle nominal et les valeurs des poses géométriques réelles. La minimisation de cet écart permet de corriger les valeurs nominales des paramètres géométriques afin d'améliorer la précision statique du robot.

La modélisation repose sur la définition du modèle géométrique et des paramètres géométriques influents sur la précision du robot. Dans la littérature, il existe une grande variété de modèles géométriques, le but de cette étape est de trouver un modèle cohérent avec le comportement géométrique du robot et permettant un niveau de prédiction satisfaisant après l'étape d'identification.

En général, un robot est composé de plusieurs bras ou éléments rigides liés entre eux par des articulations considérées comme idéales (sans jeu mécanique et sans déformation) et dotés d'un effecteur final. Pour garantir la qualité de réalisation de la tâche, la précision de la pose de l'effecteur final doit être maîtrisée. Un modèle géométrique cohérent avec le comportement géométrique de la structure du robot doit être développé.

II. Présentation du robot (Structure du robot manipulateur IRB-120)

Le robot industriel polyvalent, IRB-120, a été présenté par la société ABB. Un manipulateur robotique avec 6 DOF possède toutes les capacités et les fonctionnalités de conception avancées du grand robot d'ABB, mais il est très léger et rentable. Il a une masse de seulement 25 kg, et il a une accessibilité à 580 mm et la capacité d'atteindre 112 mm sous sa propre base. Il a une structure de bras rotatif et une structure de poignet sphérique, et une structure similaire à celle du robot PUMA-560. Les aspects importants du robot IRB-120 et la gamme de changements dans chaque axe articulaire sont présentés dans la figure 1 et le tableau 1, respectivement.

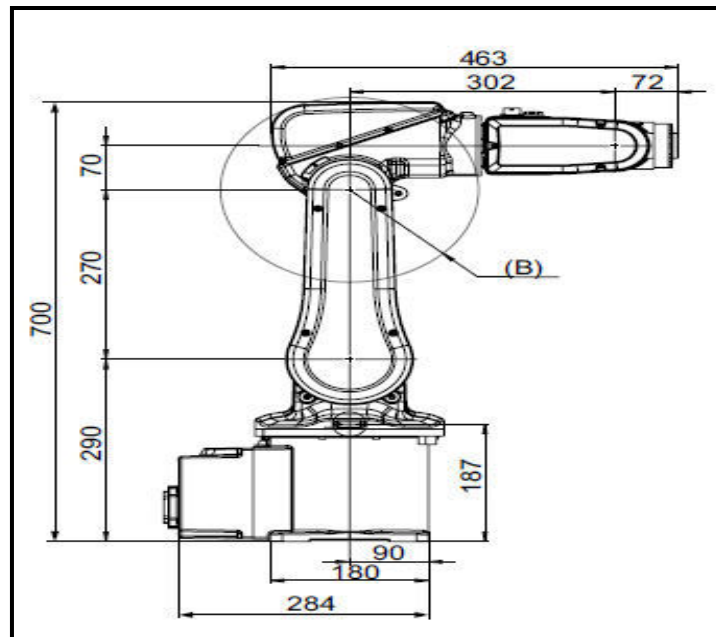


Figure III.1 : Aspects importants du robot IRB-120 (Unité: mm).

Tableau III.1 : Gamme de changements dans les axes communs du robot IRB-120

Plage de travail (°)	Mouvement d'axe
165– –165	Axis 1 rotations
110– –110	Axis 2 arm
70– –110	Axis 3 arm
160– –160	Axis 4 wrist
120– –120	Axis 5 bend
400– –400	Axis 6 turn

III. Modèle géométrique

L'analyse de modèle géométrique des robots consiste en l'analyse de modèles à deux composants: le modèle géométrique directe et le modèle géométrique inverse. Le modèle géométrique directe traite des propriétés de liaison comme entrées et nous donne la pose relative de l'effecteur terminal du bras robotique. Le modèle géométrique inverse est l'inverse du modèle géométrique directe, c'est-à-dire que la pose de l'effecteur terminal est connue et nous découvrons les paramètres de liaison du bras robotique.

III.1 Géométrie directe

Le problème de géométrie directe pour un manipulateur de chaîne en série est défini comme la recherche de la pose (position et orientation) de l'effecteur terminal par rapport à la base étant donné les valeurs des variables conjointes et les paramètres de liaison géométrique. Il peut être résolu en calculant la transformation entre les trames fixées dans l'extrémité et dans la base. Cette transformation peut être obtenue en concaténant simplement les transformations entre les trames fixes des liens adjacents.

Le calcul de l'orientation et de la position de l'extrémité du robot est appelé analyse cinématique directe. Afin de modéliser une analyse géométrique directe pour le robot, il existe généralement une méthodologie à suivre. Premièrement, numérotez les liens et les articulations ainsi que la fixation de systèmes de référence de coordonnées locales à chaque lien. Maintenant, établissez les paramètres D-H de chaque lien pour chaque lien.

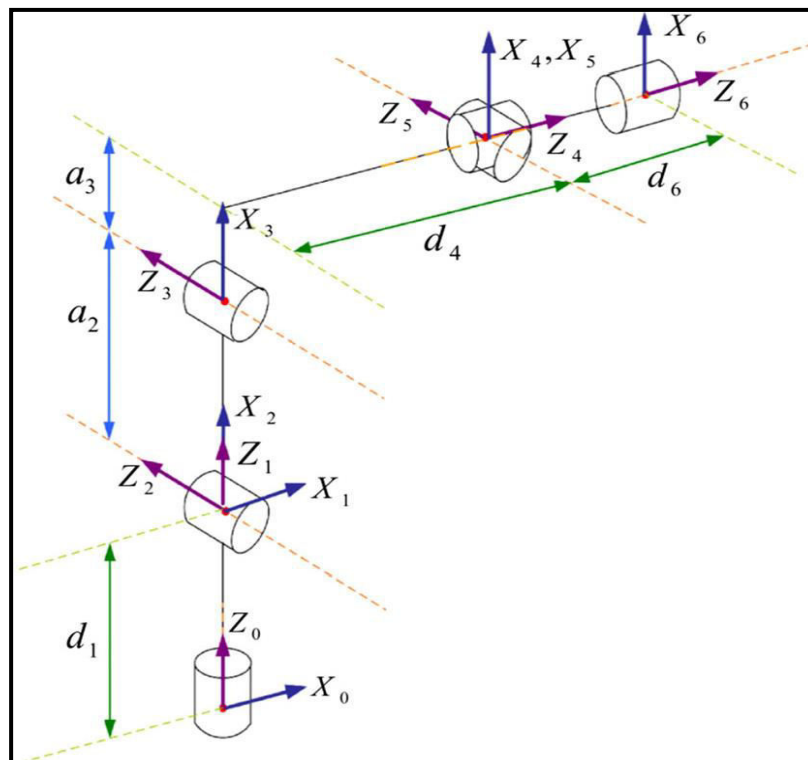


Figure III.2: Structure du modèle cinématique.

Faisant référence à la figure III.3. En utilisant les cadres attachés (D-H), les quatre paramètres qui localisent un cadre de référence par rapport à un autre sont définis comme:

θ_i (angle de joint) est l'angle entre les axes x_{i-1} et x_i autour de l'axe z_{i-1} ; d_i (décalage de lien) est la distance entre l'origine de la trame x_{i-1} et l'axe x_i le long de l'axe z_{i-1} ; a_i (longueur de lien) est la distance entre les axes z_{i-1} et z_i le long de l'axe x_i pour les axes qui se croisent

est parallèle à z_{i-1} ; α_i (torsion de lien) est l'angle entre les axes z_{i-1} et z_i autour de l'axe x_i .

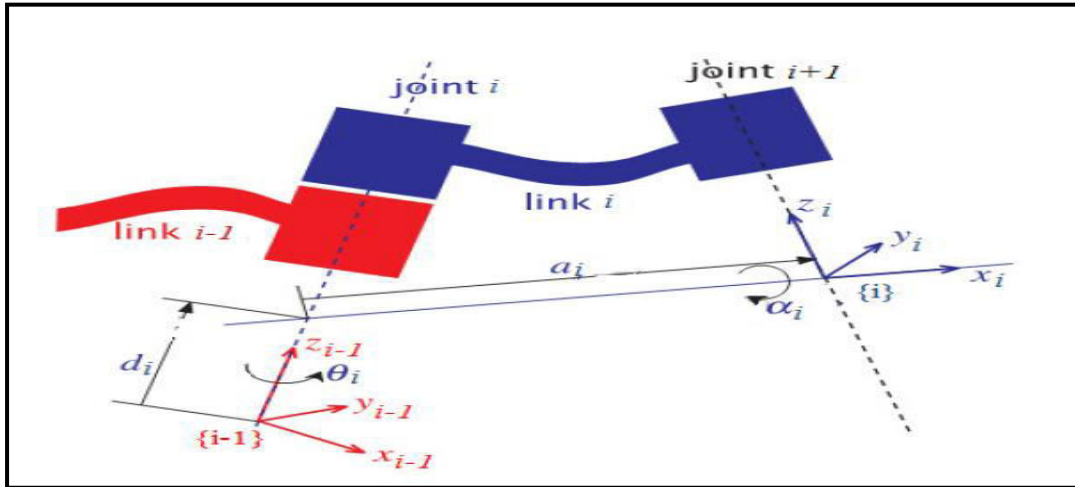


Figure III.3: allocation paramétrée de trame D-H.

Maintenant, des matrices de transformation homogènes sont calculées pour chaque lien, puis les équations cinématiques du manipulateur sont calculées. La transformation homogène équivalente comme résultat final de toutes les concaténations individuelles:

$$T_i^{i-1}(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = Rot_z(\theta_i) \cdot Trans_z(d_i) \cdot Trans_x(a_i) \cdot Rot_x(\alpha_i) \dots\dots\dots(III.1)$$

Où **R** et **T** sont la matrice de transformation homogène 4x4 pour le mouvement de translation et de rotation.

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.2)$$

L'équation cinématique d'un robot série contenant n liens est :

$$T_n^0 = \prod_{i=1}^n T_i^{i-1} \dots\dots\dots(III.3)$$

Où T_i^{i-1} est la matrice de transformation homogène de la trame i par rapport à la trame i-1.

III.1.1 Analyse cinématique directe du robot manipulateur IRB-120 6 DOF

La figure III.4 montre les paramètres de Denavit-Hartenberg (D-H) pour IRB-120. Les paramètres D-H pour IRB-120 répertoriés dans le tableau 3 sont \mathbf{a}_i (longueur de lien), α_i (torsion de lien), \mathbf{d}_i (décalage de lien) et θ_i (angle de joint).

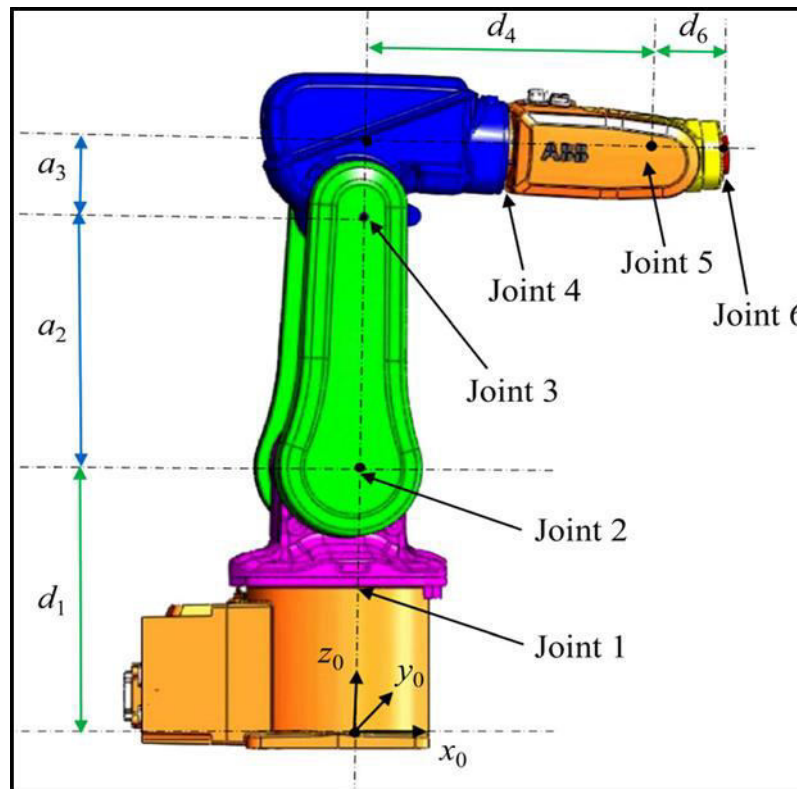


Figure III.4 Paramètres D-H du robot IRB-120.

La figure III.5 est une vue schématique des systèmes de coordonnées, des articulations, des angles des articulations et des centres de masse du robot manipulateur IRB-120. Parce que toutes les articulations du robot IRB-120 sont révolutives, le mécanisme du robot est 6-R (révoluté). Dans les trois articulations du bras, les axes des deuxième et troisième articulations sont parallèles entre eux et verticaux par rapport à la première articulation. Dans les trois axes de la cheville, les axes des quatrième et cinquième articulations sont verticaux l'un par rapport à l'autre, et la quatrième articulation est parallèle à la sixième articulation (figures III.2 et III.5)

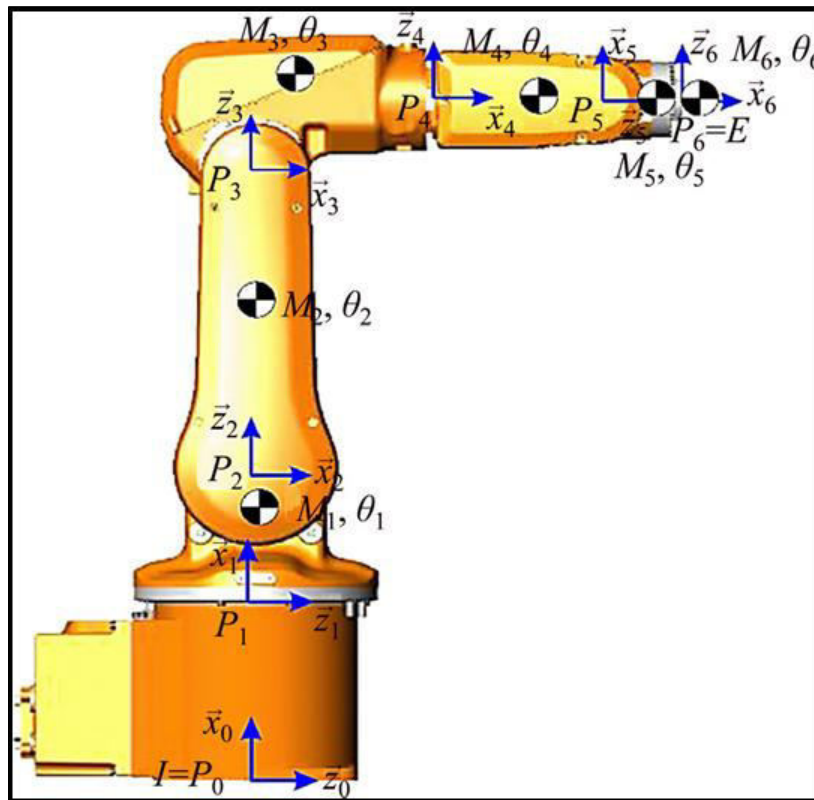


Figure III.5 : Schéma des systèmes de coordonnées, des articulations, des angles des articulations et des centres de masse du robot IRB-120.

Tableau III.2 : Paramètres D-H du robot IRB-120.

Joint i	$\theta_i/(\circ)$	d_i/mm	a_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$
1	θ_1	290	0	$-\pi/2$
2	$\theta_2 - (\pi/2)$	0	270	0
3	θ_3	0	70	$-\pi/2$
4	θ_4	302	0	$\pi/2$
5	θ_5	0	0	$-\pi/2$
6	$\theta_6 + \pi$	72	0	0

Compte tenu des paramètres du **tableau III.2**, les matrices de transformation pour les liens du robot sont obtenues comme suit :

$$\mathbf{T}_i^{i-1}(\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i) = \text{Rot}_z(\theta_i) \cdot \text{Trans}_z(d_i) \cdot \text{Trans}_x(a_i) \cdot \text{Rot}_x(\alpha_i) \dots \dots \dots (\text{III.4})$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots(III.5)$$

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 290 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.6)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c(\theta_2 - \pi/2) & -s(\theta_2 - \pi/2) & 0 & 270 * c(\theta_2 - \pi/2) \\ s(\theta_2 - \pi/2) & c(\theta_2 - \pi/2) & 0 & 270 * s(\theta_2 - \pi/2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.7)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & 70 * c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & 70 * s\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.8)$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 302 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.9)$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} c\theta_5 & 0 & -s\theta_5 & 0 \\ s\theta_5 & 0 & c\theta_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.10)$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} -c\theta_6 & s\theta_6 & 0 & 0 \\ -s\theta_6 & -c\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 72 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.11)$$

III.1.2 Exemple numérique

A. Calculer T_6^0 pour $\theta = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 374 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 630 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.12)$$

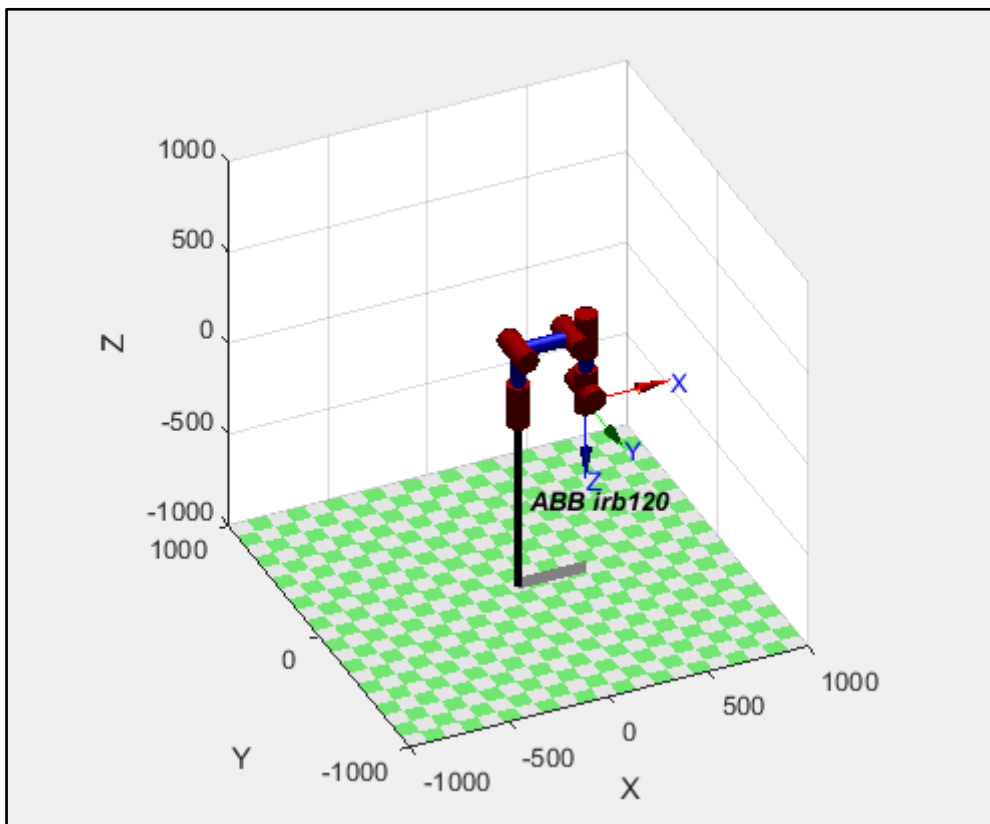


Figure III.6 : Placement du robot ABB IRB 120 dans les variables cinématique directes

Pour $\theta = [0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0 ; 0]$

B. Calculer T_6^0 pour $\theta = \left[0 ; 0 ; -\frac{\pi}{2} ; -\frac{\pi}{2} ; \frac{\pi}{2} ; -\frac{\pi}{2} \right]$

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & -70 \\ 0 & 0 & -1 & -72 \\ 0 & -1 & 0 & 862 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(III.13)$$

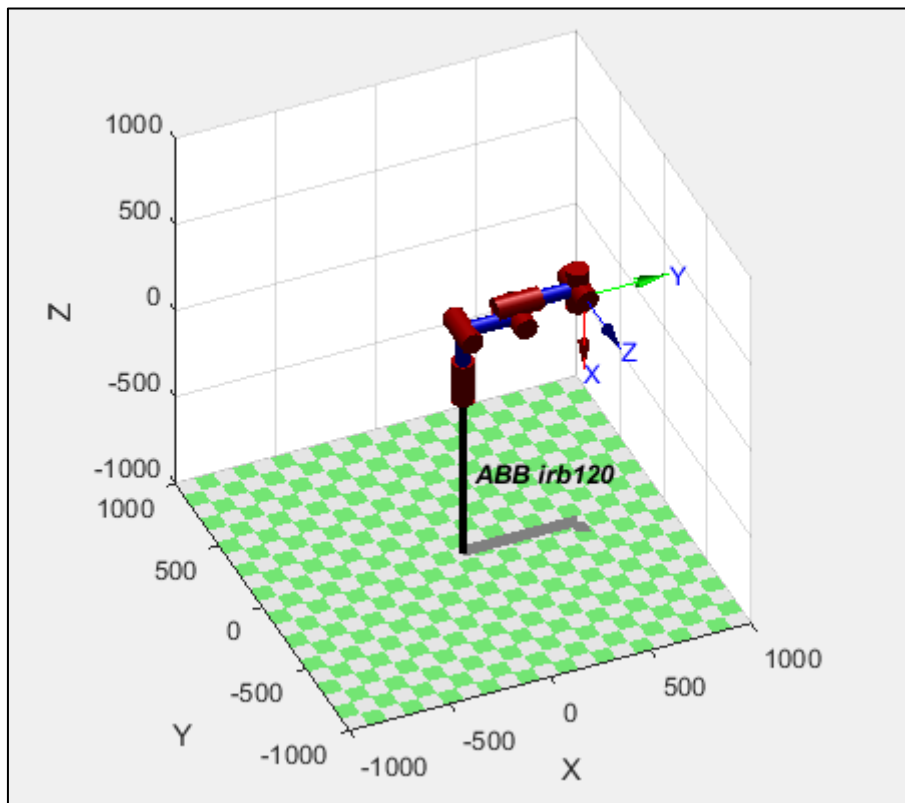


Figure III.7 : Placement du robot ABB IRB 120 dans les variables cinématique directes

Pour $\theta = \left[0 ; 0 ; -\frac{\pi}{2} ; -\frac{\pi}{2} ; \frac{\pi}{2} ; -\frac{\pi}{2} \right]$

III.2 Géométrie inverse

Nous avons vu que le modèle géométrique direct du robot a permis de calculer les coordonnées opérationnelles tout en donnant l'état du membre final en fonction des coordonnées articulées alors que le problème inverse réside dans le calcul des coordonnées articulées correspondant à une situation donnée de l'organe terminal. Lorsqu'il est présent, la forme simple qui donne toutes les solutions possibles (rarement il y a une solution) constitue le soi-disant modèle d'ingénierie inverse (MGI).

L'existence de solution de l'équation $X = f(q)$ est conditionnée par le fait que l'effecteur évolue dans le domaine atteignable. Ce domaine est défini d'une part par des limitations dimensionnelles des éléments mécaniques formant le vecteur X et d'autre part d'éventuelles limitations structurelles

$$\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \\ 1 \end{bmatrix} = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 \cdot \begin{bmatrix} X_6 \\ Y_6 \\ Z_6 \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{..(III.14)}$$

$$[{}^0T_6] = [{}^0T_6]^{-1}$$

$$\begin{pmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} n_x & n_y & n_z & -((p_x \cdot n_x) + (p_y \cdot n_y) + (p_z \cdot n_z)) \\ o_x & o_y & o_z & -((p_x \cdot o_x) + (p_y \cdot o_y) + (p_z \cdot o_z)) \\ a_x & a_y & a_z & -((p_x \cdot a_x) + (p_y \cdot a_y) + (p_z \cdot a_z)) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots\dots \text{..(III.15)}$$

III.2.1 Analyse cinématique inverse du robot manipulateur IRB-120 6 DOF

Le problème de la cinématique inverse pour un manipulateur à chaîne série est défini comme la recherche des valeurs des variables conjoints étant donné la pose de l'organe terminal. Par rapport à la base et les paramètres de liaison géométrique.

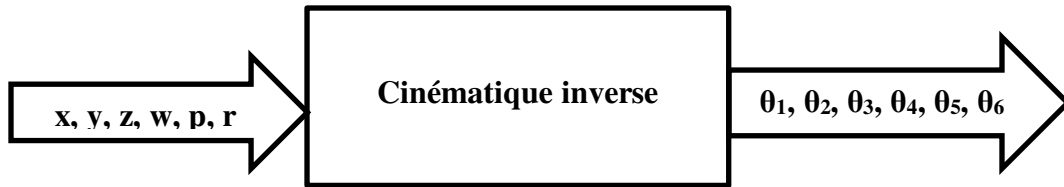


Figure III.8 : Schéma montre la cinématique inverse

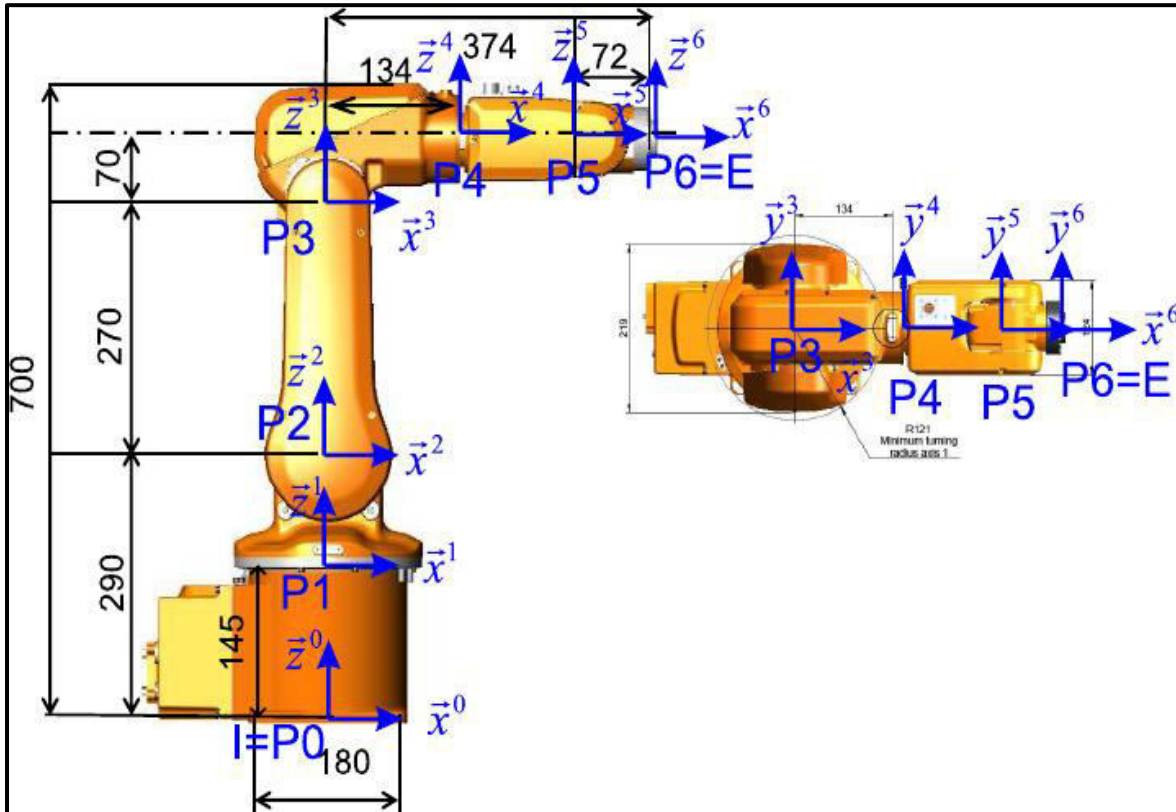


Figure III.9 : robot ABB IRB 120 avec systèmes de coordonnées et articulations

Nous avons : $T_6=X$

$$A_1A_2A_3A_4A_5A_6 = X \dots \dots \dots (III.16)$$

On ne peut rien faire de l'équation matricielle initiale, car les douze équations scalaires sont trop compliquées

Alors :

$$A_1A_2A_3A_4 = X(A_5A_6)^{-1} \dots \dots \dots (III.17)$$

La partie position de cette équation est la position du centre du poignet par rapport à F_0 . Ce centre ne dépend que de θ_1, θ_2 et θ_3 . Effectivement, on a

- $2\cos\theta_1(151\cos\theta_{23} + 35\sin\theta_{23} + 135\sin\theta_2) = -72a_x + p_x$
- $2\sin\theta_1(151\cos\theta_{23} + 35\sin\theta_{23} + 135\sin\theta_2) = -72a_y + p_y$
- $290 - 302\sin\theta_{23} + 70\cos\theta_{23} + 270\cos\theta_2 = -72a_z + p_z \dots\dots\dots (III.18)$

On ne peut pas trouver facilement ni θ_1 , ni θ_2 , ni θ_3 à partir de ces trois équations. Par contre, on va définir les constants X_p, y_p et z_p , qui représentent la position du centre du poignet par rapport à un référentiel obtenu en déplaçant F_0 de 290 mm le long de z_0 :

$$\begin{cases} X_p = -72a_x + p_x \\ y_p = -72a_y + p_y \\ z_p = -72a_z + p_z - 290 \end{cases} \dots\dots\dots (III.19)$$

$$A_2A_3A_4 = (A_1)^{-1} X (A_5 A_6)^{-1} \dots\dots\dots(III.20)$$

La partie position de cette équation matricielle est

$$\begin{aligned} q_1s_2 + q_2c_2 &= q_3 \\ q_2s_2 - q_1c_2 &= q_4 \\ 0 &= y_p \cos\theta_1 - x_p \sin\theta_1 \dots\dots\dots (III.21) \end{aligned}$$

Où

$$\begin{aligned} q_1 &= -302s_3 + 70c_3 + 270 \\ q_2 &= 302c_3 + 70s_3 \\ q_3 &= x_p c_1 + y_p s_1 \\ q_4 &= -z_p \dots\dots\dots (III.22) \end{aligned}$$

$\theta_1 = ?$

La troisième équation nous donne les deux solutions pour θ_1 :

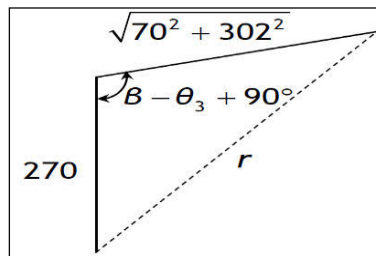
$$\begin{aligned} \theta_{1,1} &= \text{atan2}(y_p, x_p) \\ \theta_{1,2} &= \text{atan2}(-y_p, -x_p) \end{aligned} \dots\dots\dots(\text{III.23})$$

$\theta_3 = ?$

Pour obtenir θ_3 , on met les deux premières équations au carré et on fait leur somme ce qui nous donne :

$$-302s_3 + 70c_3 = \frac{42251}{135} + \frac{r^2}{540} \quad \text{où } r^2 = x_p^2 + y_p^2 + z_p^2 \dots\dots\dots (\text{III.24})$$

C'est à dire r est la distance entre le centre du poignet et l'axe 2



L'équation $-151s_3 + 35s_3$ peut être écrit comme

$$\sin(\theta_3 - \beta) = \frac{270^2 + 70^2 + 302^2 - r^2}{2(270)\sqrt{70^2 + 302^2}} \equiv t \dots\dots\dots (\text{III.25})$$

Où $\beta = \text{atan2}(70, 302)$

Alors les deux solutions sont

$$\begin{aligned} \theta_{3,1} &= \text{atan2}(t, \sqrt{1-t^2}) + \beta \\ \theta_{3,2} &= \text{atan2}(t, -\sqrt{1-t^2}) + \beta \end{aligned} \dots\dots\dots (\text{III.26})$$

$\theta_2 = ?$

Pour obtenir θ_2 , on résout pour s_2 et c_2 le système de deux premières équations

$$s_2 = \frac{q_1 q_3 + q_4 q_2}{q_1^2 + q_2^2}, \quad c_2 = \frac{q_2 q_3 + q_1 q_4}{q_1^2 + q_2^2} \dots\dots\dots (\text{III.27})$$

Où il est facile de démontrer que $q_1^2 + q_2^2 = r^2$

Les quatre solutions pour θ_2 sont obtenues de :

$$\theta_2 = \text{atan2} (q_1 q_3 + q_4 q_2 , q_2 q_3 + q_1 q_4) \dots\dots\dots (III.28)$$

$\theta_4, \theta_5, \theta_6 = ?$

$$A_4 A_5 A_6 = (A_1 A_2 A_3)^{-1} X \dots\dots\dots (III.29)$$

La partie orientation de cette équation est l'orientation de F_6 par rapport à F_3 .

Ce qui représente les cinq équations suivantes :

$$\begin{aligned} -c_4 s_5 &= (c_1 a_x + s_1 a_y) s_{23} + a_z c_{23} \\ -s_4 s_5 &= s_1 a_x - c_1 a_y \\ c_5 &= -a_z s_{23} + (c_1 a_x + s_1 a_y) c_{23} \\ -c_6 s_5 &= -n_z s_{23} + (c_1 n_x + s_1 n_y) c_{23} \\ s_6 s_5 &= -o_z s_{23} + (c_1 o_x + s_1 o_y) c_{23} \dots\dots\dots (III.30) \end{aligned}$$

Les deux solutions pour θ_4, θ_5 , et θ_6 sont alors :

$$\begin{aligned} \theta_{5,1} &= \text{atan2} (\sqrt{1 - (-a_z s_{23} + (c_1 a_x + s_1 a_y) c_{23})^2} , -a_z s_{23} + (c_1 a_x + s_1 a_y) c_{23}) \\ \theta_{5,2} &= \text{atan2} (-\sqrt{1 - (-a_z s_{23} + (c_1 a_x + s_1 a_y) c_{23})^2} , -a_z s_{23} + (c_1 a_x + s_1 a_y) c_{23}) \\ \theta_4 &= \text{atan2} (\frac{-s_1 a_x + c_1 a_y}{s_5} , \frac{-(c_1 a_x + s_1 a_y) s_{23} - a_z c_{23}}{s_5}) \\ \theta_6 &= \text{atan2} (\frac{-o_z s_{23} + (c_1 o_x + s_1 o_y) c_{23}}{s_5} , \frac{n_z s_{23} - (c_1 n_x + s_1 n_y) c_{23}}{s_5}) \end{aligned}$$

(III.31)

III.2.2 Exemple numérique

$x = -44.11$, $y = 383.46$, $z = 786.00$, $w = 77.71^\circ$, $p = -0.38^\circ$, $r = 170.88^\circ$

(F_6 par rapport à F_0)

Tableau III.3 Résultats de la cinématique inverse

	1	2	3	4	5	6	7	8
θ_1	100.00°	100.00°	100.00°	100.00°	-80.00°	-80.00°	-80.00°	-80.00°
θ_2	27.12°	27.12°	40.00°	40.00°	-40.00°	-40.00°	-27.12°	-27.12°
θ_3	-64.90°	-64.90°	-89.00°	-89.00°	-64.90°	-64.90°	-89.00°	-89.00°
θ_4	-38.99°	141.01°	-30.00°	150.00°	158.99°	-21.01°	156.37°	-23.63°
θ_5	30.72°	-30.72°	40.00°	-40.00°	63.70°	-63.70°	53.32°	-53.32°
θ_6	120.98°	-59.02°	110.00°	-70.00°	95.80°	-84.20°	100.78°	-79.22°

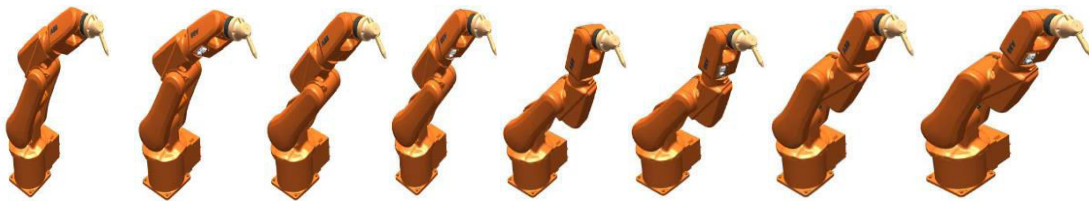


Figure III.10. Les huit configurations du tableau III.3.

Chapitre IV :

**Sélection de l'indice
d'observabilité pour
l'étalonnage du robot**

I. Critères et procédure de sélection.

L'étalonnage est basé sur la détermination de l'écart entre les valeurs de poses géométriques estimées par le modèle nominal et les valeurs des poses géométriques réelles. La minimisation de cet écart permet de corriger les valeurs nominales des paramètres géométriques afin d'améliorer la précision statique du robot.

À l'heure actuelle, il existe diverses techniques d'étalonnage qui sont capables d'étalonner le modèle géométrique du manipulateur en utilisant différentes méthodes de modélisation, de mesure et d'identification. Compte tenu du manque d'instrument de mesure de précision, une approche d'étalonnage par simulation a été adoptée dans ce travail. Dans cette approche, nous avons suivi des étapes similaires à un étalonnage réel, c'est-à-dire une modélisation cinématique, une identification des paramètres à partir de poses sélectionnées en utilisant différents indices d'observabilité et le processus termine par une évaluation de l'étalonnage.

Chaque lien i est associé à un repère de coordonnées $O_{x_i y_i z_i}$. La matrice A_i^{i-1} est une transformation homogène représentant la position et l'orientation du référentiel i par rapport au référentiel $i-1$. La notation Denavit-Hartenberg (D-H) utilise un minimum nombre de paramètres pour décrire complètement la matrice A_i^{i-1} ces paramètres sont : angle de joint θ_i , distance de décalage d_i , longueur du lien a_i , et l'angle de torsion α_i .

$$A_i^{i-1} = A_i^{i-1}(P_i) \dots\dots\dots (IV.1)$$

$P_i = [\theta_i \ d_i \ a_i \ \alpha_i]^T$ où P_i est le vecteur de paramètre pour l'articulation i .

L'équation cinématique du robot manipulateur est obtenue par les transformations homogènes consécutives de la dernière référentiel/ à la base. Donc

$$T_n^0 = T_n^0(k) = \prod_{i=1}^n (A_i^{i-1}) \dots\dots\dots (IV.2)$$

$k = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_n]^T$ est le vecteur de paramètres du manipulateur.

La transformation exacte de lien \bar{A}_i^{i-1} est

$$\bar{A}_i^{i-1} = A_i^{i-1} + dA_i \dots\dots\dots (IV.3)$$

$$dA_i = dA_i(\delta P_i)$$

δP_i : est le vecteur d'erreur de Paramètre de lien

La transformation exacte du manipulateur T_N^0

$$T_n^0 = \prod_{i=1}^n (A_i^{i-1} + dA_i) \dots\dots\dots (IV.4)$$

$$T_n^0 = T_n^0 + dT$$

$$dT = dT(q, \delta k)$$

q : le vecteur des variables Conjointes (θ_i or d_i)

$\delta k = [\delta P_1 \ \delta P_2 \ \dots \ \delta P_n]^T$: est le vecteur d'erreur de Paramètre du manipulateur

En développant l'équation (IV.4) et en ignorant les produits du second ordre, nous pouvons obtenir la matrice jacobéenne

$$\delta T_j = [J_j] \delta k \dots\dots\dots (IV.5)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Où δT est le vecteur différentiel de translation et de rotation correspondant à la matrice ΔT , et m est le nombre d'observations.

Le système linéaire d'équations (5) peut maintenant être résolu, en utilisant l'approche des moindres carrés, comme

$$\delta k = [(J^T J)^{-1} J^T] \delta T \dots\dots\dots (IV.6)$$

Où $J = [J_1 \ J_2 \ \dots \ J_m]^T$ et $\delta T = [\delta T_1 \ \delta T_2 \ \dots \ \delta T_m]^T$

Puisque la matrice jacobéenne contient une approximation linéaire, l'équation (6) doit être appliquée de manière itérative jusqu'à la convergence.

Soit les matrices U définies comme suit :

$$U_i = \prod_{j=1}^n (A_j^{j-1}), \quad U_{n+1} = I \dots\dots\dots (IV.7)$$

La matrice d'opérateur différentiel a la forme :

$$\Delta T = \begin{bmatrix} 0 & -r_z & r_y & d_x \\ r_z & 0 & -r_x & d_y \\ -r_y & r_x & 0 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.8)$$

Où d_x, d_y, d_z sont les petits déplacements de T_n^0 , et r_x, r_y, r_z sont les petites rotations autour des axes du cadre n. Le vecteur différentiel de translation et de rotation δT correspondant à la matrice ΔT est donc

$$\delta T = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \\ r_x \\ r_y \\ r_z \end{bmatrix} = [r] \dots\dots\dots (IV.9)$$

La matrice de transformation de lien (eq 1) est donnée par :

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\cos\theta_i \sin\alpha_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & r_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.10)$$

En commençant par l'équation 10 et en supposant que toutes les variations de la cinématique nominale peuvent être prises en compte par les variations de θ_i, d_i, a_i et α_i , nous avons le changement dans une seule matrice de transformation A_i à être

$$dA_i = \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} \delta\theta_i + \frac{\partial A_i}{\partial d_i} \delta d_i + \frac{\partial A_i}{\partial a_i} \delta a_i + \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i} \delta \alpha_i \dots\dots\dots (IV.11)$$

Et donc :

$$\frac{\partial A_i}{\partial \theta_i} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_i & -\cos\theta_i \cos\alpha_i & \cos\theta_i \sin\alpha_i & -a_i \sin\theta_i \\ \cos\theta_i & -\sin\theta_i \cos\alpha_i & \sin\theta_i \sin\alpha_i & a_i \cos\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (IV.12)$$

$$dA_i = A_i^{i-1} \Delta A_i$$

$$\Delta A_i = Q_{\theta_i} \delta\theta_i + Q_{d_i} \delta d_i + Q_{a_i} \delta a_i + Q_{\alpha_i} \delta \alpha_i \dots\dots\dots (IV.13)$$

$$Q_{\theta_i} = ([A_i^{i-1}]^{-1} \frac{\partial A_i}{\partial \theta_i}) \quad Q_{a_i} = ([A_i^{i-1}]^{-1} \frac{\partial A_i}{\partial a_i})$$

$$Q_{d_i} = ([A_i^{i-1}]^{-1} \frac{\partial A_i}{\partial d_i}) \quad Q_{\alpha_i} = ([A_i^{i-1}]^{-1} \frac{\partial A_i}{\partial \alpha_i}) \dots \dots \dots (IV.14)$$

$$Q_{\theta_i} = \begin{bmatrix} 0 & -c\alpha_i & s\alpha_i & 0 \\ c\alpha_i & 0 & 0 & a_i c\alpha_i \\ -s\alpha_i & 0 & 0 & -a_i s\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV.15)$$

$$Q_{d_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & c\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV.16)$$

$$Q_{a_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV.17)$$

$$Q_{\alpha_i} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (IV.18)$$

$$\begin{aligned} J_{\theta_i} &= [U_{i+1}]^{-1} Q_{\theta_i} [U_{i+1}] & J_{a_i} &= [U_{i+1}]^{-1} Q_{a_i} [U_{i+1}] \\ J_{d_i} &= [U_{i+1}]^{-1} Q_{d_i} [U_{i+1}] & J_{\alpha_i} &= [U_{i+1}]^{-1} Q_{\alpha_i} [U_{i+1}] \dots \dots \dots (IV.19) \end{aligned}$$

La sous-matrice pour le lien i est la suivante

$$J_i = [J_{\theta_i} J_{d_i} J_{a_i} J_{\alpha_i}] \dots \dots \dots (IV.20)$$

La matrice jacobine pour une observation particulière j est

$$J_j = [J_1 J_2 J_3 \dots J_n] \dots \dots \dots (IV.21)$$

Après avoir simplifié les colonnes matricielles jacobines (J_i)

$$U_{i+1} = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad Q \equiv \begin{bmatrix} d \\ r \end{bmatrix}$$

$$J_j = \begin{bmatrix} \vec{d} \\ \vec{r} \end{bmatrix} \equiv [U_{i+1}]^{-1} Q [U_{i+1}] \dots \dots \dots (IV.22)$$

$$\vec{d}_x = r \cdot (p \times n) + d \cdot n \qquad \vec{d}_y = r \cdot (p \times o) + d \cdot o$$

$$\bar{d}_z = r.(p \times a) + d \cdot a \dots\dots\dots (IV.23)$$

$$\bar{r}_x = r \cdot n \quad \bar{r}_y = r \cdot o$$

$$\bar{r}_z = r \cdot a \dots\dots\dots (IV.24)$$

$$\delta T_j = [J_j] \delta k \quad j=1,2,\dots,m$$

Les paramètres δk peuvent être obtenus en résolvant le système linéaire.

$$\delta k = [(J^T J)^{-1} J^T] \delta T \dots\dots\dots (IV.25)$$

Puisque le calcul de la matrice jacobienne suppose des approximations linéaires, les erreurs de paramètre sont rajoutées au vecteur de paramètre de la manière suivante :

$$k_{nouvel} = k_{ancien} + \delta k \dots\dots\dots (IV.26)$$

Une méthode itérative est utilisée pour converger vers les valeurs optimales des paramètres. Le processus est répété jusqu'à atteindre un seuil RMS entre deux itérations successives.

La matrice **J** représente le lien entre les erreurs δT des poses d'étalonnage et les erreurs des paramètres δk .

Le jacobien est légèrement différent à chaque itération car il dépend des paramètres d'erreur trouvés à chaque étape. Pour cela, nous devons assurer que toutes les colonnes de J sont linéairement indépendantes. Sinon, nous devons éliminer les paramètres d'erreur inutiles (paramètres redondants). L'analyse SVD montre que parmi les 24 paramètres, seulement 19 sont retenus, les 5 autres $\delta r_2, \delta r_5, \delta l_5, \delta \theta_6$ et $\delta \alpha_6$ sont inutile (redondants) est alors éliminés du modèle (Tableau IV.1).

Dans ce cas, le vecteur δk du manipulateur ABB IRB 120 est réduit aux 19 paramètres. La matrice jacobienne J pour chaque observation a trois lignes et 19 colonnes. Le vecteur δT à chaque observation comporte trois éléments. Plusieurs observations sont empilées les unes sur les autres, de sorte que la matrice J comporte au moins autant de lignes que de colonnes. Ainsi, il nous faut au moins huit observations pour le manipulateur ABB IRB 120. En pratique, le nombre de poses doit être choisi minutieusement, pour réduire l'impact des bruits de mesure et offrir une meilleure identification des paramètres. Puisque le nombre de poses requis est proportionnel au nombre de paramètres à identifier, il s'agit de

déterminer le nombre optimal. Pour se faire, il faut trouver la valeur à partir de laquelle l'indice d'observabilité tend vers la stabilité. Pour visualiser ce phénomène, des graphiques d'indices d'observabilité sont utilisés (Figure IV.1).

Tableau IV.1. Les 19 paramètres retenus

Classement des paramètres	Paramètres d'erreur
1.	$\delta\theta_1$
2.	δr_1
3.	δl_1
4.	$\delta \alpha_1$
5.	$\delta\theta_2$
6.	δl_2
7.	$\delta \alpha_2$
8.	$\delta\theta_3$
9.	δr_3
10.	δl_3
11.	$\delta \alpha_3$
12.	$\delta\theta_4$
13.	δr_4
14.	δl_4
15.	$\delta \alpha_4$
16.	$\delta\theta_5$
17.	$\delta \alpha_5$
18.	δr_6
19.	δl_6

Ces courbes présentent l'indice d'observabilité en fonction du nombre de poses d'étalonnage.

Le nombre optimal de poses est celui à partir duquel l'amélioration de l'indice d'observabilité devient négligeable. Figure IV.1 montre que l'indice d'observabilité O1 se stabilise après environ 20 poses. Une augmentation supplémentaire du nombre des poses (plus que 20 poses dans ce cas) ne fait qu'allonger la durée du processus de prise de mesures et de traitement des données, sans amélioration significative dans l'exactitude d'identification des paramètres (c.-à-d. sans amélioration considérable de la précision du robot).

La deuxième étape est de sélectionner les meilleures poses qui maximisent l'indice d'observabilité. Pour cela une routine d'optimisation basée sur la fonction `fminunc` de Matlab est utilisée. Cela veut dire que l'indice d'observabilité est maximisé par minimisation. La valeur maximale obtenue est 12.2487 (Fig. IV.2).

Dans cette étude le bruit de mesure était supposé être dans une plage de $\pm 8 \mu\text{m}$.

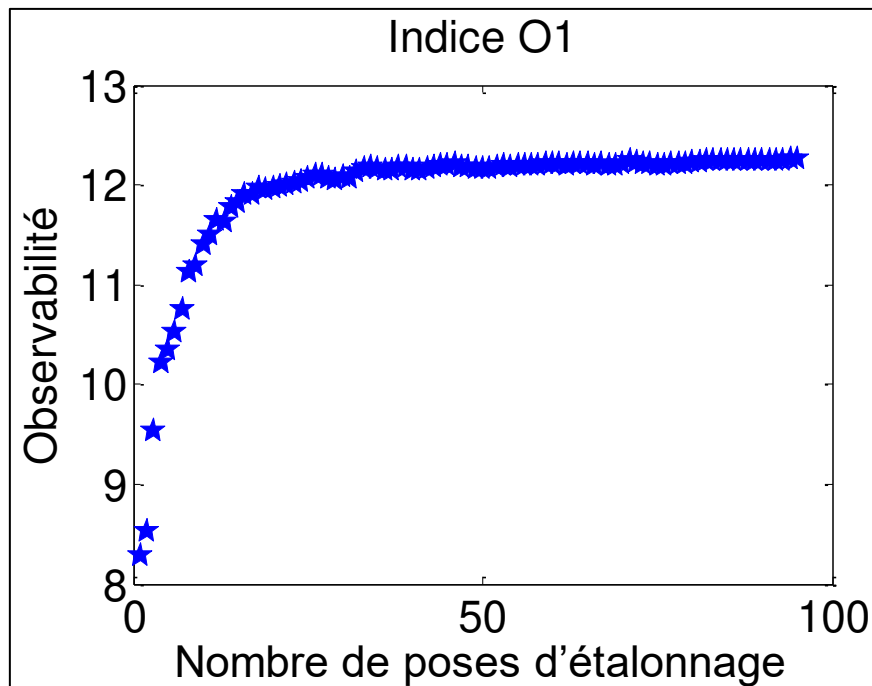


Figure IV.1. Indice d'observabilité O1 en fonction du nombre de poses d'étalonnage.

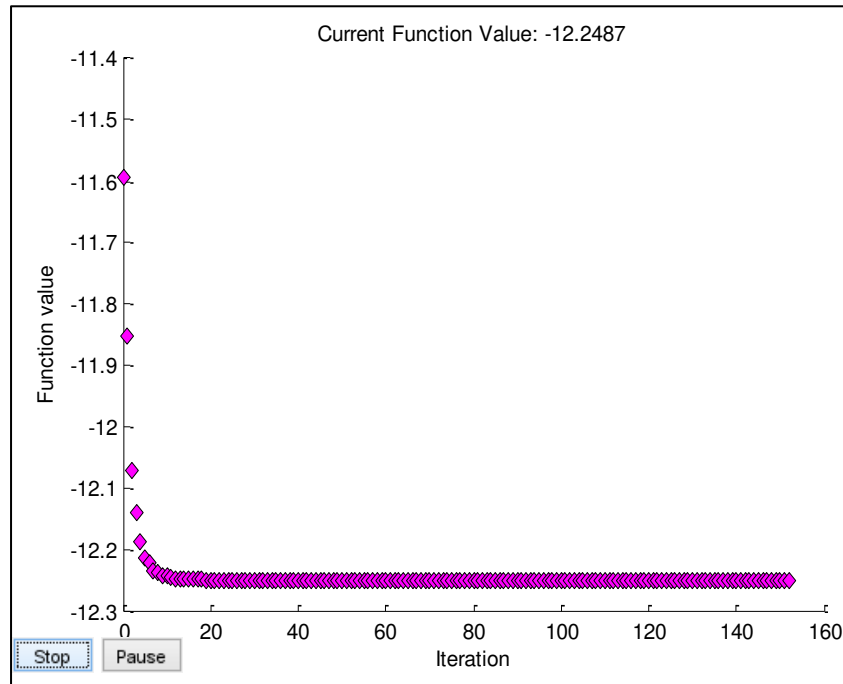


Figure IV.2. Convergence vers une solution pour l'indice O1.

Par la suite, les poses sélectionnées par chaque indice d'observabilité sont utilisées pour identifier les 19 paramètres du Tableau IV. 1 en utilisant les équations (25) et (26).

Pour évaluer la performance des indices d'observabilité sur la précision des paramètres, trois critères de performances sont utilisés. Ces critères sont : la moyenne quadratique (root mean square (RMS)), l'erreur absolue moyenne (MAE) et Écart type résiduel (RSD).

En faisant une comparaison relative entre les indices d'observabilité et le conditionnement, nos résultats présentés au Tableau IV.3 montrent que l'indice O₃ semble être le meilleur dans l'ensemble, quel que soit le critère employé.

Tableau IV.2. Paramètres vrais versus paramètres estimés pour chaque indice d'observabilité.

Symbole	Paramètre Vrais	Estimés (O1)	Estimés (O2)	Estimés (O3)	Estimés (O4)	Estimés (O5)	Cond
$\delta\theta_1$	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
δr_1	1.0050	1.0048	1.0055	1.0059	1.0048	1.0050	1.0062
δl_1	1.2300	1.2299	1.2293	1.2301	1.2293	1.2318	1.2312
$\delta \alpha_1$	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017
$\delta\theta_2$	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014	0.0014
δl_2	1.4400	1.4399	1.4388	1.4407	1.4398	1.4396	1.4403
$\delta \alpha_2$	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013	0.0013
$\delta\theta_3$	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022	0.0022
δr_3	0.2100	0.8097	0.8126	0.8089	0.8095	0.8151	0.8127
δl_3	0.1650	0.1668	0.1645	0.1639	0.1633	0.1603	0.1662
$\delta \alpha_3$	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
$\delta\theta_4$	0.0168	0.0167	0.0168	0.0167	0.0168	0.0168	0.0167
δr_4	0.5400	0.5397	0.5396	0.5397	0.5392	0.5415	0.5409
δl_4	1.1550	1.1547	1.1541	1.1553	1.1554	1.1559	1.1558
$\delta \alpha_4$	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
$\delta\theta_5$	0.0021	-0.0029	-0.0028	-0.0028	-0.0029	-0.0029	-0.0029
$\delta \alpha_5$	0.0007	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136	0.0136
δr_6	0.5700	0.5695	0.5695	0.5694	0.5691	0.5695	0.5698
δl_6	0.4950	0.4955	0.4954	0.4957	0.4955	0.4953	0.4955

Tableau IV.3. Comparaison de la performance de chaque indice.

	O ₁	O ₂	O ₃	O ₄	O ₅	Conditionnement
RMS	0.1376	0.1383	0.1374	0.1376	0.1389	0.1383
MAE	0.0327	0.0329	0.0327	0.0328	0.0333	0.0330
RSD	0.1375	0.1382	0.1373	0.1375	0.1388	0.1381

CONCLUSION GENERALE

Dans ce travail, nous avons présenté les travaux de recherche réalisés dans le contexte de l'amélioration de la précision de robot sériel et l'étalonnage géométrique à partir de mesures externes simulés. La technique d'identification linéaire des paramètres de robot a été appliquée à des simulations d'étalonnage pour un manipulateur ABB IRB 120.

Les simulations ont été utilisées pour étudier l'effet des facteurs ayant un impact sur l'identification des paramètres. Pour cela, nous avons comparé la performance de cinq indices d'observabilité appliqués pour l'étalonnage d'un robot ABB IRB 120 avec six degrés de liberté. Le robot a été modélisé avec 24 paramètres géométriques. Le processus d'identification des paramètres est basé sur la résolution d'un système linéaire au sens des moindres carrés. Les valeurs réelles des poses d'étalonnage ont été simulées en ajoutant un bruit de mesure varie dans une plage de $\pm 8 \mu\text{m}$. Un ensemble optimal de configurations (meilleures poses d'étalonnage) est celui qui maximise l'indice d'observabilité et réduit l'impact du bruit de mesure sur l'efficacité d'identification du paramètre. Afin de déterminer l'indice d'observabilité le plus approprié, trois critères de performance ont été utilisés la moyenne quadratique, l'erreur absolue moyenne et l'écart type résiduel.

Enfin, à la base de ces résultats, nous avons conclu que l'indice d'observabilité O3 est le meilleur pour le cas étudié (robot ABB IRB 120).

Références

- [1] Fillion, A. (2015). Étalonnage de robots industriels à l'aide d'un système portable de photogrammétrie (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [2] Hereter Gregori, J. (2009). Étalonnage de robots industriels.
- [3] www.wikipedia.org/wiki/Robotique_industrielle.
- [4] Toufik BENTALEB, Contribution à l'étalonnage géométrique des robots industriels, ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE, 2006
- [5] Gutierrez Tapia : Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des Opérations d'usinage Jose, UNIVERSITE BLAISE PASCAL - CLERMONT II, 2016
- [6] <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-2400>
- [7] <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-360-flexpicker>
- [8] <https://new.abb.com/products/robotics/fr/robots-industriels/irb-140>
- [9] M. Abderrahim et al. « Accuracy and calibration issues of industrial manipulators », Industrial Robotics: Programming, Simulation and Application, ISBN 3-86611-286-6, pp. 702, ARS/pIV, Allemagne 2006.
- [10] Joubair, A. (2012). Contribution à l'amélioration de la précision absolue des robots parallèles (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [11] Joubair, A., Tahan, A. S., & Bonev, I. A. (2016, October). Performances of observability indices for industrial robot calibration. In 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (pp. 2477-2484). IEEE.
- [12] Joubair, A., & Bonev, I. A. (2013). Comparison of the efficiency of five observability indices for robot calibration. Mechanism and Machine Theory, 70, 254-265.
- [13] Sun, Y., & Hollerbach, J. M. (2008, May). Observability index selection for robot calibration. In 2008 IEEE international conference on robotics and automation (pp. 831-836). IEEE.

- [14] Tapia, J. G. (2016). Modélisation et identification géométrique de robots utilisés pour des opérations d'usinage (Doctoral dissertation).
- [15] Barhaghtalab, M. H., Meigoli, V., Haghghi, M. R. G., Nayeri, S. A., & Ebrahimi, A. (2018). Dynamic analysis, simulation, and control of a 6-DOF IRB-120 robot manipulator using sliding mode control and boundary layer method. *Journal of Central South University*, 25(9), 2219-2244.
- [16] Yurttagül, B. (2010). Kinematic calibration of industrial robots using full pose measurements and optimal pose selection (Master's thesis).
- [17] Misra, A., & Singh, G. (2019). Kinematic and Dynamic Analysis of an Industrial Six-Axis Robotic Manipulator (No. 1748). EasyChair.
- [18] KHALIL, W., & DOMBRE, E. Bases de la modélisation des robots.
- [19] DJOUGGANE, F. (2012). ETUDE ET CONCEPTION D'UN ROBOT MANIPULATEUR POUR L'ENMTP (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [20] Wu, Y., Klimchik, A., Caro, S., Furet, B., & Pashkevich, A. (2015). Geometric calibration of industrial robots using enhanced partial pose measurements and design of experiments. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 35, 151-168.
- [21] Pathre, U. S., & Driels, M. R. (1990). Simulation experiments in parameter identification for robot calibration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5(1), 13-33.
- [22] Mooring, B. W., Roth, Z. S., & Driels, M. R. (1991). Fundamentals of manipulator calibration (p. 329). New York: Wiley.

Résumé

Le but de ce travail est de comparer les performances de cinq indices d'observabilité utilisés pour l'étalonnage des robots. À des fins d'illustration, l'étude est réalisée dans le cas d'un robot ABB IRB 120 à six degrés de liberté, qui est modélisé avec 24 paramètres géométriques. La comparaison est réalisée en se basant sur trois critères de performance (la moyenne quadratique, l'erreur absolue moyenne et l'écart type résiduel) afin de déterminer l'indice d'observabilité le plus approprié, ce qui permet de sélectionner le meilleur ensemble de poses d'étalonnage qui conduit à réduire l'impact du bruit de mesure et donc une meilleure identification des paramètres. En conséquence, une meilleure amélioration de la précision absolue du robot est obtenue.

Compte tenu du manque d'instrument de mesure de précision, une approche d'étalonnage par simulation a été adoptée dans ce travail. Le bruit de mesure était supposé être dans une plage de $\pm 8 \mu\text{m}$.

Les résultats montrent que l'indice d'observabilité O3, est trouvé comme le meilleur choix pour le cas étudié.

Abstract

The aim of this work is to compare the performances of five observability indexes used for robots calibration. For illustration purposes, the study is carried out in the case of an ABB IRB 120 robot with six degrees of freedom, which is modeled with 24 geometric parameters. The comparison is made based on three performance criteria (the root mean square (RMS), the mean absolute error (MAE) and the residual standard deviation (RSD)) in order to determine the most appropriate observability index, which makes it possible to select the best set calibration poses which reduces the impact of measurement noise and therefore better identification of parameters. As a result, a better improvement in the absolute accuracy of the robot is achieved.

Due to the lack of precision measuring instruments, a simulation calibration approach was adopted in this work. The measurement noise was assumed to be within a range of $\pm 8 \mu\text{m}$.

The results show that the O3 observability index is found to be the best choice for the case studied.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو مقارنة أداء خمسة مؤشرات ملاحظة تستخدم لمعايرة الروبوتات. لأغراض التوضيح ، تم إجراء الدراسة في حالة روبوت ABB IRB 120 بست درجات من الحرية ، والذي تم تصميمه باستخدام 24 معلمة. تتم المقارنة على أساس ثلاثة معايير أداء (المتوسط التربيعي ومتوسط الخطأ المطلق والانحراف المعياري المتبقي) من أجل تحديد مؤشر الملاحظة الأنسب ، مما يجعل من الممكن اختيار أفضل مجموعة من حالات التعرض للمعايرة مما يؤدي إلى تقليل تأثير ضوضاء القياس وبالتالي تحديد المعلمات بشكل أفضل. نتيجة لذلك ، يتم الحصول على تحسين أفضل في الدقة المطلقة للروبوت. نظرًا لعدم وجود أداة قياس دقيقة ، تم اعتماد نهج المعايرة القائمة على المحاكاة في هذا العمل. تم افتراض أن ضوضاء القياس في نطاق ± 8 ميكرومتر. أظهرت النتائج أن مؤشر الملاحظة O3 هو الخيار الأفضل في هذه الحالة المدروسة.