

Contribution à l'évaluation de l'incertitude d'un procédé
d'assemblage robotisé assisté par la métrologie 3D utilisant le
système iGPS comme encodeurs externes

par

William BABIN

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 31 MARS 2026

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



William Babin, 2026



Cette licence Creative Commons signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette oeuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'oeuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Souheil-Antoine Tahan, directeur de mémoire
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Ahmed Joubair, codirecteur
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Maarouf Saad, président du jury
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Chatelaine, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 MARS 2026

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Un remerciement sincère à M. Souheil-Antoine Tahan pour son support, surtout pour la confiance qu'il avait en mes capacités à conduire ce projet de recherche. J'ai pu jouir d'une grande liberté dans la conduite de mes travaux.

Je tiens aussi à remercier M. Ahmed Joubair dont nos nombreuses discussions ont été bénéfiques à l'avancée de ce projet de recherche.

Le travail en laboratoire n'aurait pas été possible sans la précieuse aide de M. Joël Grignon. Son expertise et sa disponibilité ont été un atout précieux.

Il va sans dire que je remercie également mes collègues, mes amis et mes proches pour leur soutien.

Contribution à l'évaluation de l'incertitude d'un procédé d'assemblage robotisé assisté par la métrologie 3D utilisant le système iGPS comme encodeurs externes

William BABIN

RÉSUMÉ

L'assemblage assisté par la métrologie (AAM) est une approche prometteuse pour améliorer l'assemblage de pièces de grande taille dans les industries aérospatiale, navale et énergétique. Cependant, l'adoption industrielle de ces systèmes est limitée par la difficulté d'évaluer leur incertitude inhérente. Ce mémoire présente le développement et la validation d'une méthodologie expérimentale pour quantifier la répétabilité et l'exactitude d'un procédé d'AAM robotisé utilisant le système iGPS comme encodeurs externes. Un banc d'essai à échelle laboratoire a été conçu, intégrant un robot industriel ABB IRB120TM, un système iGPS avec six transmetteurs et un artefact usiné représentant une pièce à assembler. Des protocoles expérimentaux rigoureux ont été établis, incluant des cycles de stabilisation thermique pour le robot et pour les récepteurs iGPS. Un modèle statistique de répétabilité basé sur la distribution χ^2 à trois degrés de liberté a été développé pour combiner les déviations le long des axes cartésiens. La validation expérimentale sur deux jeux de données, inspirée des recommandations de la norme ISO 9283, indépendants a démontré une excellente répétabilité, avec des écarts-types variant de 4 à 12 μm selon l'axe et la configuration testée. La couverture empirique à 95 % pour les deux jeux de données (94,0 % et 96,7 %) confirme la validité du modèle proposé. L'évaluation de l'exactitude a révélé des déviations de quelques millimètres par rapport aux positions nominales. Une analyse détaillée des sources d'erreur, incluant des tests de permutation des récepteurs et une comparaison avec un laser tracker Leica AT960TM, a identifié que le système iGPS contribue à environ 0,2 mm d'erreur, tandis que la majorité provient de la flexion du robot et des imperfections du modèle cinématique nominal. Ces résultats sont cohérents avec les données publiées pour le robot IRB120TM avec une charge utile comparable.

Mots-clés: assemblage assisté par la métrologie, robot industriel, iGPS, répétabilité, exactitude, incertitude de mesure, métrologie à grande échelle

Contribution to Uncertainty Assessment of a 3D Metrology-Assisted Robotic Assembly Process Using the iGPS System as External Encoders

William BABIN

ABSTRACT

Measurement-Assisted Assembly (MAA) is a promising approach for improving the assembly of large-scale components in aerospace, shipbuilding, and energy industries. However, industrial adoption of these systems is limited by the difficulty in assessing their inherent uncertainty. This thesis presents the development and validation of an experimental methodology to quantify the repeatability and accuracy of a robotic MAA process using the iGPS system as an external encoder. A laboratory-scale testbed was designed, integrating an ABB IRB120™ industrial robot, an iGPS system with six transmitters, and a machined artifact representing a workpiece to assemble. Rigorous experimental protocols were established, including thermal stabilization cycles for the robot and iGPS receivers. A statistical repeatability model based on the χ^2 distribution with three degrees of freedom was developed to combine deviations along Cartesian axes. Experimental validation on two independent datasets inspired by ISO 9283 standard recommendations demonstrated excellent repeatability, with standard deviations ranging from 4 to 12 μm depending on the axis and tested configuration. The empirical 95 % coverage for both datasets (94.0 % and 96.7 %) confirms the validity of the proposed model. Accuracy assessment revealed deviations of several millimeters from nominal positions. A detailed analysis of error sources, including receiver permutation tests and comparison with a Leica AT960™ laser tracker, identified that the iGPS system contributes approximately 0.2 mm of error, while the majority originates from robot deflection and imperfections in the nominal kinematic model. These results are consistent with published data for the IRB120™ robot with comparable payload.

Keywords: measurement-assisted assembly, industrial Robot, iGPS, repeatability, accuracy, measurement uncertainty, large-scale metrology

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 CONTEXTE INDUSTRIEL ET OBJECTIFS DE RECHERCHE	5
1.1 L'assemblage industriel	5
1.1.1 L'assemblage avec gabarits	5
1.1.2 Particularités des pièces de grande taille	6
1.1.3 L'AAM, une solution démontrée	8
1.2 La problématique de l'incertitude	9
1.3 Contexte spécifique au projet	10
1.4 L'objectif du projet de recherche	10
1.5 Limitations et hypothèses de travail	11
1.6 Synthèse du Chapitre 1	11
CHAPITRE 2 REVUE DE LA LITTÉRATURE	13
2.1 L'assemblage assisté par la métrologie	13
2.1.1 Les processus prédictifs d'assemblage	14
2.1.2 Les processus de suivi de positionnement	15
2.1.3 L'outillage actif et le contrôle en boucle fermée	15
2.1.4 Quelques exemples d'applications	16
2.2 La métrologie à grande échelle	17
2.2.1 Les difficultés de la MGE	17
2.2.2 Les outils de mesures	19
2.2.2.1 Machine de mesure tridimensionnelle (MMT)	20
2.2.2.2 Bras palpeur	20
2.2.2.3 Traqueur laser	20
2.2.2.4 Scanner laser	21
2.2.2.5 Photogrammétrie	21
2.2.2.6 Le système iGPS	22
2.2.2.7 La précision de l'iGPS	23
2.2.2.8 Comparaison des technologies pour l'utilisation en AAM	24
2.3 Le principe de l'incertitude	26
2.3.1 Modélisation du mesurage et évaluation de l'incertitude	26
2.3.2 Terminologie	28
2.3.2.1 Répétabilité	28
2.3.2.2 Reproductibilité	28
2.3.2.3 Exactitude	29
2.3.2.4 Erreur de mesure	29
2.3.2.5 Erreur systématique	30
2.3.2.6 Erreur aléatoire	30
2.3.2.7 Traçabilité métrologique	30

2.3.3	Autres méthodes de propagation	30
2.3.3.1	Méthode de Monte Carlo	31
2.3.3.2	Méthode de sensibilité numérique directe	31
2.3.3.3	Méthode statistique fréquentiste	32
2.3.3.4	Méthode Bayésienne	33
2.4	Les robots industriels	35
2.4.1	La cinématique directe	36
2.4.2	La cinématique inverse	36
2.4.3	L'étalonnage des robots industriels	38
2.4.4	La norme ISO 9283	39
2.4.4.1	Répétabilité de pose	40
2.4.4.2	Exactitude de pose	41
2.4.4.3	Cycle de chauffage	42
2.5	Concepts mathématiques pertinents	43
2.5.1	Matrice de transformation homogène	43
2.5.2	Angles d'Euler	46
2.5.3	Quaternions	47
2.5.4	L'algorithme de Kabsch	48
2.6	Synthèse du Chapitre 2	50
CHAPITRE 3	DÉMARCHE DE TRAVAIL ET IMPORTANCE DES CONTRIBUTIONS	51
3.1	Méthodologie générale	51
3.2	Pertinence des contributions	52
3.2.1	Article de journal	53
3.2.2	Synthèse du chapitre 3	53
CHAPITRE 4	EXPERIMENTAL REPEATABILITY MODELING AND ACCURACY ASSESSMENT OF A ROBOTIC MAA SYSTEM	55
4.1	Introduction	55
4.1.1	Context and Motivation	55
4.1.2	Measurement-Assisted Assembly (MAA) as a Solution	56
4.1.3	Objective	56
4.1.4	Assumptions	57
4.2	Background	57
4.2.1	Large-Scale Metrology (LSM) and iGPS	57
4.2.2	iGPS Metrological Performance	58
4.2.3	iGPS in MAA Systems	58
4.2.4	Uncertainty Estimation in MAA Systems	59
4.3	Methods	59
4.3.1	System Description	59
4.3.1.1	Artifact Design	62
4.3.2	iGPS-Robot Coordinate Frame Registration	63
4.3.3	Data Gathering Process	64

4.3.4	Robot Thermal Stability	65
4.3.5	iGPS System Warm-Up	67
4.3.6	Repeatability Measurements and Modeling	68
4.3.7	Accuracy Evaluation	70
4.4	Results	72
4.4.1	Repeatability and Model Validation	72
4.4.2	Accuracy : Understanding the Systematic Bias	76
4.4.3	Accuracy : Comparing with a Laser Tracker	79
4.5	Discussion	80
4.5.1	Repeatability	80
4.5.2	Accuracy and Error Sources	81
4.5.3	Implications for Industrial Implementation	82
4.6	Conclusion	82
CHAPITRE 5 DISCUSSION DES RÉSULTATS		85
5.1	Analyse critique du modèle de répétabilité proposé	85
5.1.1	Validité de l'approche par distribution χ^2	85
5.1.2	Variabilité spatiale des paramètres du modèle	86
5.1.3	Vers un modèle unifié et généralisable	86
5.2	Évaluation de l'exactitude et sources d'erreur	87
5.2.1	Décomposition des sources d'erreur	87
5.2.2	Limitations de la comparaison avec le traqueur laser	89
5.2.3	Axes d'amélioration du procédé	89
5.3	Implications pour l'utilisation industrielle de l'AAM robotisé	90
5.3.1	Répétabilité versus exactitude : deux régimes d'utilisation distincts	90
5.3.2	Applications de l'AAM robotisé : avec ou sans étalonnage	90
5.4	Portée et limitations de l'étude	91
5.4.1	Contributions méthodologiques	91
5.4.2	Limitations expérimentales	92
5.4.3	Synthèse du chapitre 5	93
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		95
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		97

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Comparaison de l'assemblage pour les assemblages de grandes tailles, les produits artisanaux et les biens produits en série 7
Tableau 2.1	Comparaison des technologies de métrologie pour l'assemblage assisté par mesure (MAA) 25
Tableau 4.1	Comparison of repeatability metrics and model results across datasets 1 and 2 73

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Deux exemples d'application de l'AAM Tirée de Drouot, Zhao, Irving, Sanderson & Ratchev (2018)	9
Figure 2.1	Organigramme d'un procédé d'assemblage assistée par la métrologie Tirée de Mei & Maropoulos (2014)	14
Figure 2.2	Diagramme des causes de l'incertitude des procédés de mesures de MGE Tirée de Schmitt <i>et al.</i> (2016a)	18
Figure 2.3	Taxonomie des technologies de mesures utilisée en MGE Tirée de Schmitt <i>et al.</i> (2016a)	19
Figure 2.4	Principe de fonctionnement de l'iGPS Tirée de Mastrogiacomio, Franceschini & Maropoulos (2011)	24
Figure 2.5	Un réseau d'émetteur iGPS Tirée de Galetto, Mastrogiacomio & Pralio (2010)	25
Figure 2.6	Répétabilité et reproductibilité	29
Figure 2.7	Les repères et les paramètres DH du robot IRB120™ Tirée de Truc & Lam (2020)	37
Figure 2.8	Définition des paramètres DH Tirée de Žlajpah & Petrič (2023)	37
Figure 2.9	Position d'essais de répétabilité ISO9283 :1998 Tirée de Babin, Joubair & Tahan (2025)	40
Figure 2.10	Un exemple de changement de référentiel en chaîne utilisant les matrices de transformation Tirée de Craig (2005)	45
Figure 4.1	Experimental setup description	60
Figure 4.2	Experimental layout	60
Figure 4.3	The kinematic chain	61
Figure 4.4	The designed artifact	62
Figure 4.5	Determination of artifact pose and transformation to the robot flange. ...	63
Figure 4.6	Test cube configurations for the two measurement campaigns	65

Figure 4.7	Robot temperature monitoring : sensor placement and thermal response during warm-up	67
Figure 4.8	Effect of iGPS i5IS receiver warm-up on measurement stability	68
Figure 4.9	Determining the transformation matrix between the Laser and the iGPS using the Kabsch algorithm	72
Figure 4.10	Cumulative distribution functions (CDFs) for dataset 1	74
Figure 4.11	Cumulative distribution functions (CDFs) for dataset 2	75
Figure 4.12	Comparison of chi-squared cumulative distribution functions (CDFs) for both datasets	75
Figure 4.13	Deviation from nominal along the X, Y, and Z axes, as well as the total deviation	77
Figure 4.14	Euclidean distances between the 3 measurement points on the artifact measured with the iGPS system, laser tracker and a CMM	77
Figure 4.15	Experimental setup and effect of eliminating gravitational play intermittently.	78
Figure 4.16	Euclidean distances while swapping i5IS positions every 10 measurements	79
Figure 4.17	Deviation from nominal along the X, Y, and Z axes, as well as the total deviation, measured with iGPS and a laser tracker	80

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AAM	Assemblage assistée par la métrologie
BIPM	Bureau International des Poids et Mesures
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CMM	<i>Coordinate Measurement Machine</i>
CTG	Cotation et tolérancement géométrique
DH	Denavit-Hartenberg
DOF	<i>Degrees of Freedom</i>
DDL	Degrés de liberté
GD&T	<i>Geometrical Dimensioning and Tolerancing</i>
GUM	<i>Guide to the expression of uncertainty in measurement</i>
iGPS	<i>indoor Global Positioning System</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIPPS	Laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes
LSM	<i>Large Scale Metrology</i>
MAA	<i>Measurement Assisted Assembly</i>
MGE	Métrologie à grande échelle
MMT	Machine de mesures tridimensionnelle
R&R	Répétabilité et reproductibilité
RA	Réalité augmentée
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i>
SCP	Système cyber-physique
SI	Système international d'unités
SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

μm	micromètres
μ	Moyenne
σ	Écart-type
u	Incertitude-type
u_c	Incertitude-type combinée
K	Facteur de couverture
χ^2	Distribution chi-carrée
d^2	Distance de Mahalanobis au carré
Hz	Hertz

INTRODUCTION

L'assemblage assisté par la métrologie (traduction libre de *Measurement-Assisted Assembly*, terme fréquemment utilisé dans la littérature) n'est pas un concept nouveau. Le principe de l'AAM consiste à utiliser des technologies de métrologie 3D afin de guider l'assemblage en facilitant le positionnement des pièces. Ce paradigme a le potentiel de remplacer les gabarits et les dispositifs de fixation traditionnels, tout en offrant de nombreux avantages, tels qu'une augmentation du degré d'automatisation des chaînes d'assemblage et une réduction des coûts d'outillage et de main-d'œuvre.

Ce concept d'assemblage sans gabarits, utilisant des instruments de mesure en boucle fermée pour guider le positionnement, peut être appliqué de diverses manières. Dans certains cas, il s'agit de gabarits actifs dont la forme est ajustée en fonction des mesures, alors que dans d'autres, ce sont des robots industriels standards qui manipulent les pièces à l'aide d'encodeurs externes. Plus récemment, certains projets ont recours à des technologies de réalité augmentée (RA), couplées à des instruments de mesure 3D, afin d'améliorer les capacités des opérateurs.

La formulation et le développement du concept d'AAM sont nés d'une initiative conjointe de recherche et d'un besoin industriel, principalement dans le secteur aérospatial. En fait, cette industrie requiert l'assemblage de pièces de très grande taille avec un volume de production relativement faible, rendant l'amortissement des coûts élevés d'outillage prohibitif. Ces gabarits et dispositifs de fixation offrent généralement peu de flexibilité en cas de modification de la conception. Si un changement de conception survient après la fabrication des outillages, il devient souvent impossible, ou du moins très difficile, de l'implémenter sans engendrer d'importantes pertes financières. Les technologies d'AAM pourraient permettre l'utilisation des mêmes équipements pour plusieurs assemblages différents.

L'assemblage à l'aide d'outillages traditionnels présente aussi d'autres enjeux. Les tâches sont coûteuses en temps et en main-d'œuvre. En fait, la majorité des coûts de production d'un aéronef

sont directement liés aux activités de fabrication incluant l'outillage et l'assemblage. Les pièces doivent souvent être montées et démontées plusieurs fois avec le processus traditionnel (par exemple, pour le perçage, l'ajustement des surfaces ou l'ajout de cales). Le concept d'AAM pourrait contribuer à réduire ces allers-retours, ou du moins à en faciliter la gestion.

À ce jour, la faisabilité d'utiliser des procédés issus de la famille de l'assemblage assisté par la métrologie (AAM) est plutôt bien démontrée. De nombreux cas d'usage, bancs d'essai et applications industrielles ont été mis en œuvre avec succès. Il subsiste toutefois une problématique importante qui freine l'adoption plus large de cette technologie. En effet, l'outillage traditionnel permet un certain contrôle qualité du positionnement relatif des pièces : si le gabarit d'assemblage est inspecté et calibré, il garantit que les incertitudes respectent les tolérances d'ingénierie. Ce n'est pas le cas des procédés d'AAM, qui sont complexes et impliquent de nombreux équipements soumis à des facteurs parfois difficiles à maîtriser.

En réalité, ces systèmes sont parfois trop complexes pour que leur incertitude puisse être évaluée théoriquement par des méthodes classiques de propagation d'incertitude. Or, cette connaissance est essentielle pour éviter la détection tardive d'erreurs dans le processus de fabrication. Il est donc nécessaire de développer des méthodes expérimentales permettant de mesurer cette incertitude dans un cas d'usage précis.

La question fondamentale à la base de ce projet peut être formulée ainsi : *Quelle est l'incertitude inhérente sur la position et l'orientation d'un composant positionné avec un système d'AAM ?*

Comme il existe de nombreuses méthodes et variantes d'implémentation du concept d'AAM, il est nécessaire de limiter l'étude à un certain choix technologique. Plus précisément, dans le cadre de ce projet de recherche, les pièces sont manipulées à l'aide d'un robot industriel sériel standard, et le système iGPS (*Indoor Global Positioning System*) est utilisé comme encodeur externe.

Le Chapitre 1 de ce mémoire présente le contexte industriel et définit plus explicitement les objectifs de cette initiative de recherche, y compris les limites et les hypothèses retenues. Le Chapitre 2 offre une revue de littérature ainsi que des fondements théoriques essentiels au projet. L'étude de l'état de l'art permet de déterminer la direction à prendre pour contribuer au domaine. Le Chapitre 3 expose la démarche globale du projet et précise la contribution de l'article de journal soumis pour publication, qui découle de cette recherche. Le Chapitre 4 est une reproduction de l'article soumis au journal *Measurement* de l'éditeur *Elsevier*. Enfin, le Chapitre 5 discute des résultats obtenus. Le mémoire se conclut par un dernier chapitre présentant les conclusions ainsi que des recommandations pour la poursuite éventuelle de ce travail.

CHAPITRE 1

CONTEXTE INDUSTRIEL ET OBJECTIFS DE RECHERCHE

Ce premier chapitre expose le contexte industriel pour mettre en lumière la problématique et définir les objectifs de recherche. Le contexte spécifique est également précisé, c'est-à-dire les conditions particulières dans lesquelles s'inscrit ce projet, notamment les contraintes liées à l'environnement en laboratoire et aux technologies employées. Cette mise en contexte permet de mieux comprendre les enjeux rencontrés et justifie la pertinence de la méthodologie qui sera adoptée.

1.1 L'assemblage industriel

L'assemblage désigne l'ensemble des processus par lesquels des composants, ou d'autres sous-assemblages, sont joints de manière à constituer un produit (Nof, Wilhelm & Warnecke, 1997). On peut citer, par exemple, la fixation de composants électroniques sur une carte de circuit imprimé, l'assemblage de la transmission d'une voiture constituée d'un arbre, d'engrenages et de pièces diverses, ou encore la fixation d'une aile d'avion au fuselage. Dans le cas de l'assemblage industriel, des objectifs économiques de productivité (efficacité et réduction des coûts) et de qualité sont intrinsèquement liés au procédé utilisé. En ce sens, les différents procédés d'assemblage ont évolué au fil des révolutions industrielles et des développements technologiques. Malgré ces avancées, l'assemblage des biens représente encore une part importante du temps total de production et du coût de main-d'œuvre lié à la fabrication d'un produit (Nof *et al.*, 1997) (Lotter, 2013). Même avec la diffusion des procédés d'assemblage flexibles et les travaux de recherche récents, le facteur humain reste central dans de nombreux processus d'assemblage (Monetti, Giorgio & Maffei, 2022).

1.1.1 L'assemblage avec gabarits

Les gabarits et les fixtures sont des outils utilisés pour faciliter les tâches de la production manufacturière. Ils servent à fabriquer (ex. gabarit de perçage) et à assembler un grand nombre

de pièces respectant les tolérances de conception (ex. gabarit d'assemblage). Les avantages de ces outils sont multiples. Entre autres, ils permettent de réduire les coûts et le temps de production, d'augmenter la qualité (excellente répétabilité), de diminuer les coûts liés au contrôle de qualité et d'améliorer l'ergonomie des travailleurs (Chikwendu Okpala, 2015). Cette longue liste d'avantages explique leur utilisation répandue dans pratiquement toutes les chaînes de production. En d'autres termes, les gabarits et les fixtures éliminent la nécessité de réaliser un montage spécialisé pour chacune des pièces produites. Dans le contexte de l'industrie 4.0, l'intégration numérique de ces outils d'assemblage dans les procédés industriels intelligents — comme le suivi en temps réel et l'optimisation des processus d'assemblage à partir des données recueillies — permettra d'atteindre des niveaux plus élevés de flexibilité, de précision et de productivité (Okpala, Igbokwe & Nwankwo, 2024).

1.1.2 Particularités des pièces de grande taille

Les gabarits d'assemblage nécessitent tout de même un coût d'investissement élevé qui, dans certains contextes, peut être prohibitif (Okpala *et al.*, 2024) (Snelling, 2000). Dans les industries devant assembler des pièces de très grande taille avec des volumes de production relativement faibles, le coût d'amortissement et la flexibilité des chaînes de production représentent un enjeu majeur, car des changements au produit fabriqué entraînent des modifications aux outillages spécialisés nécessaires (Drouot *et al.*, 2018). Des exemples de ces industries sont, entre autres, l'industrie aérospatiale, l'industrie navale et le secteur de l'énergie (Schmitt *et al.*, 2016a). À titre d'exemple, il est estimé qu'environ 40% des coûts d'un avion sont attribuables uniquement à l'assemblage (Maropoulos, Muelaner, Summers & Martin, 2014).

Outre les coûts élevés de l'outillage et de l'assemblage dans ces industries, de nombreuses autres difficultés sont directement associées à l'assemblage de pièces de grande taille. D'abord, celui-ci nécessite de nombreux allers-retours afin de percer, surfacer et ajuster les pièces à joindre. Il s'agit d'une tâche coûteuse en main-d'œuvre en raison du faible degré d'automatisation du processus et de la non-interchangeabilité des pièces (Schmitt *et al.*, 2016a) (Muelaner, Kayani, Martin & Maropoulos, 2011). Les autres difficultés comprennent les exigences de

précision très élevées par rapport au volume des pièces, les effets d'expansion thermique et de déformation gravitationnelle non négligeables, ainsi que le stockage et la calibration des outillages d'assemblage (Maropoulos *et al.*, 2014).

Compte tenu de tous les problèmes soulevés, des améliorations sont nécessaires aux procédures, méthodes et outils utilisés pour l'assemblage dans les industries fabriquant des produits de grande taille en faible volume. L'amélioration de l'assemblage dans ces industries est le fruit de multiples efforts de recherche (Shi *et al.*, 2025) (Fiedler *et al.*, 2024).

Pour bien exposer les particularités des industries produisant des biens de grande taille, plusieurs aspects sont mis en comparaison avec d'autres industries dans le tableau 1.1. Ce tableau présente les particularités des industries traitant des pièces de grande taille à faible volume de production, en comparaison avec le marché des biens de consommation produits en grande série et les produits artisanaux.

Tableau 1.1 Comparaison de l'assemblage pour les assemblages de grandes tailles, les produits artisanaux et les biens produits en série

Aspect	Assemblages de grande taille	Produits artisanaux	Biens produits en série
Exemples de produits	Fuselage d'un avion, coque d'un navire	Sculptures, meubles artisanaux	Téléphones intelligents, électroménagers
Outils d'assemblage	Gabarits et fixtures	Outils à main	Chaînes de production automatisées
Flexibilité de l'assemblage	Faible (dépendance aux gabarits)	Élevée (ajustement manuel)	Faible (séquence fixe, automatisation)
Requis de précision	Élevés à très élevés	Faibles à moyens	Élevés (interchangeabilité des pièces)
Coût des erreurs	Très élevé	Moyen	Faible (remplacement des pièces)
Connaissance des capacités des processus	Partiellement connue	Inconnue	Bien connue

La combinaison de plusieurs facteurs rend donc l'assemblage particulièrement difficile. La technologie doit être améliorée afin de rendre le processus moins coûteux, plus flexible et plus efficace.

1.1.3 L'AAM, une solution démontrée

La philosophie de l'assemblage sans gabarit (*Jigless assembly*) consiste à minimiser ou à réduire (jusqu'à l'élimination) les outillages spécialisés à l'assemblage du produit fabriqué (Snelling, 2000). L'assemblage sans gabarit peut prendre plusieurs formes, mais l'objectif reste toujours le même : accroître la flexibilité des processus d'assemblage.

Dans le cas de l'assemblage de composants de grande taille, le concept d'AAM constitue une incarnation de cette philosophie, liant les outils de métrologie de moyenne/grande échelle (*Large Scale Metrology*) à des systèmes assistés avec des actuateurs ou des robots industriels, ainsi qu'à des algorithmes d'asservissement permettant des ajustements de la position et de l'orientation des pièces à assembler. La figure 1.1, tirée de Drouot *et al.* (2018), illustre deux exemples d'applications d'un tel système d'AAM. Dans l'exemple 1.1a, un système d'action manipule une pièce de fuselage afin de la positionner à l'endroit désiré, alors que dans l'exemple 1.1b, c'est plutôt un robot industriel qui manipule la pièce à assembler. Dans tous les cas, un ou plusieurs appareils de MGE servent d'encodeurs externes.

L'approche de l'AAM n'est pas nouvelle. En fait, elle découle directement des initiatives de l'industrie aérospatiale visant à améliorer les processus d'assemblage et à répondre aux enjeux exposés à la section 1.1.2 (Maropoulos *et al.*, 2014). Les initiatives de recherche récentes et les avancées des technologies de MGE semblent indiquer qu'il s'agit d'une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité de l'assemblage dans les industries où des pièces de grande taille doivent être assemblées. La mise en place de systèmes AAM sur les chaînes de production est un problème résolu. Plusieurs bancs d'essai en laboratoire et en usine ont validé la faisabilité d'utiliser ces systèmes pour l'assemblage (de Campos Porath, Simoni, de Araujo Nunes & Bertoldi, 2019) (Schmitt, Kimmelmann, Quinders, Storm & Oberhansberg, 2016b).

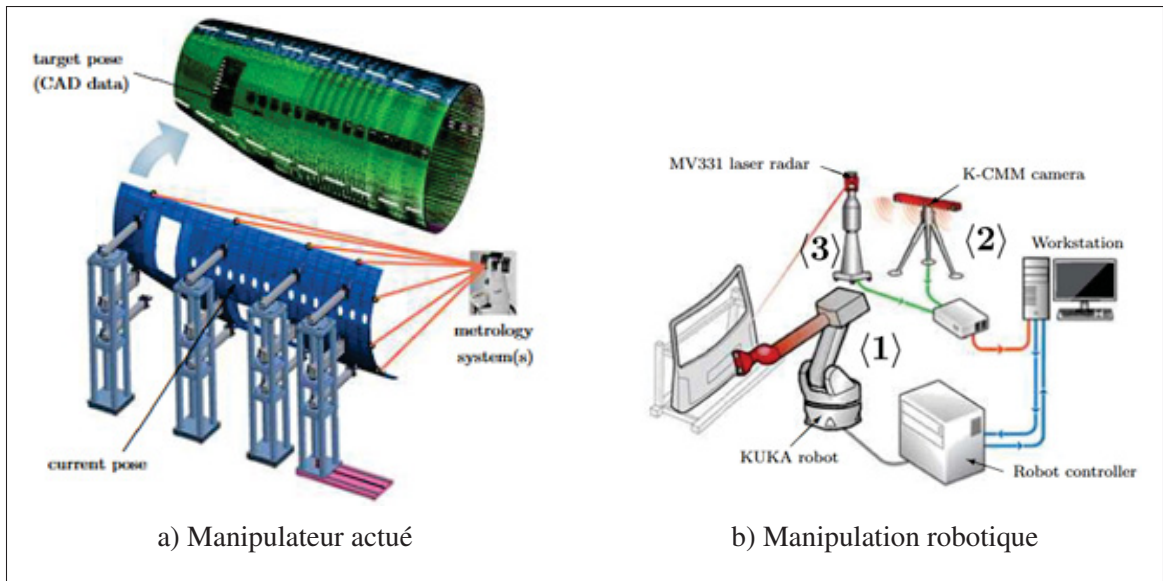


Figure 1.1 Deux exemples d'application de l'AAM
Tirée de Drouot *et al.* (2018)

1.2 La problématique de l'incertitude

Malgré tous ces avantages, un problème freine néanmoins l'adoption des systèmes d'AAM en industrie. En effet, comme il s'agit de systèmes complexes impliquant plusieurs composantes matérielles et logicielles, dans des environnements souvent non contrôlés (par exemple le plancher d'une usine), il est très difficile, voire impossible dans certains cas, de déterminer l'incertitude résultante sur le positionnement d'une pièce issue d'un procédé d'AAM par les méthodes théoriques de propagation des incertitudes ou par d'autres méthodes statistiques (Schmitt *et al.*, 2016a). Parallèlement, les industries décrites à la section 1.1.2 exigent souvent la connaissance de ces incertitudes afin d'éviter des erreurs coûteuses et de s'assurer que les procédés de fabrication et d'assemblage sont compatibles avec les requis de précision (c'est le principe de base de tout programme d'assurance qualité).

Pour ces raisons, l'utilisation des gabarits d'assemblage reste encore aujourd'hui la norme. Avec ces gabarits, l'incertitude de positionnement peut être évaluée par des études statistiques et des analyses de répétabilité et de reproductibilité (R&R) (Radhwan, Effendi, Farizuan Rosli,

Shayfull & Nadia, 2019). L'inspection et la calibration périodique de ces gabarits assurent que l'assemblage respectera les requis de précision.

En ce sens, un axe de recherche important est le développement de modèles permettant de quantifier l'incertitude résultante de ces systèmes complexes (métrologie 3D + Robot + Opérateur + effets environnementaux) (Schmitt *et al.*, 2016a). C'est donc dans cette optique d'avancer les modèles d'évaluation de l'incertitude de l'assemblage, appliqués spécifiquement à l'AAM, que s'inscrit ce projet de recherche. Pour ce faire, une solution consiste à tenter d'évaluer cette incertitude de manière expérimentale dans des conditions de laboratoire.

1.3 Contexte spécifique au projet

Ce projet de recherche est réalisé au sein du laboratoire d'ingénierie des produits, procédés et systèmes (LIPPS), et plus spécifiquement au laboratoire de métrologie, où divers équipements de mesure sont disponibles. Le laboratoire dispose également d'un robot industriel IRB120™ du fabricant ABB. L'avantage de réaliser les travaux expérimentaux de cette recherche au sein du laboratoire, au-delà de la disponibilité des instruments, réside dans le fait de pouvoir effectuer les expériences dans un environnement contrôlé.

1.4 L'objectif du projet de recherche

Compte tenu du contexte exposé précédemment, ce projet de recherche a deux objectifs spécifiques :

1. Concevoir un banc d'essai permettant de reproduire un procédé d'AAM en laboratoire, utilisant un système de mesure iGPS comme encodeur externe et un robot industriel standard pour la manipulation.
2. Développer une méthodologie permettant d'inférer de manière expérimentale la précision et la répétabilité du procédé d'AAM tout en respectant les impératifs de la traçabilité métrologique.

1.5 Limitations et hypothèses de travail

Quelques limitations et hypothèses sont nécessaires afin de réaliser ces travaux. Tout d'abord, les tests expérimentaux sont réalisés dans un environnement de laboratoire à petite échelle (le A1260 - Laboratoire de métrologie à l'ÉTS), et le volume de travail est intentionnellement limité à un espace restreint. Ensuite, l'artefact conçu pour simuler une pièce à assembler est considéré comme parfaitement rigide. Dans une situation réelle en usine, les effets de déformation dus à la gravité doivent être pris en compte dans le modèle, en fonction des caractéristiques de la pièce à positionner et des points d'attache entre la pièce et le robot. Enfin, à des fins de simplicité et de concision, aucune mesure de calibration cinématique du robot n'a été effectuée. Le modèle cinématique utilisé est celui fourni par le fabricant.

L'équipement de mesure retenu pour le procédé d'AAM est le système iGPS de Nikon. Il s'agit de l'instrument le plus approprié et le plus répandu pour ce type de procédures d'AAM. Ce choix sera détaillé dans la revue de littérature.

1.6 Synthèse du Chapitre 1

L'AAM est une méthode d'assemblage qui a le potentiel d'améliorer l'assemblage dans plusieurs industries où des pièces de grande taille doivent être assemblées. Cependant, la connaissance des incertitudes de ces procédés freine leur adoption. L'incertitude de ces systèmes complexes est difficile à déterminer de manière théorique. L'objectif de cette recherche est de contribuer au développement de méthodes permettant de mesurer l'incertitude de ces procédés de manière empirique. Pour ce faire, un banc de test à petite échelle a été développé.

CHAPITRE 2

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Le Chapitre 2 présente la littérature pertinente à ce projet de recherche ainsi que les concepts théoriques nécessaires à la méthodologie. Les sujets abordés sont l'assemblage assisté par la métrologie (AAM), la métrologie à grande échelle (MGE), les outils de mesure 3D, les principes relatifs aux incertitudes, les robots manipulateurs et leur étalonnage, et la norme ISO 9283. À la fin de ce chapitre, quelques concepts mathématiques clés pour la réalisation de ces travaux sont détaillés.

2.1 L'assemblage assisté par la métrologie

Le concept de l'assemblage assisté par la métrologie (AAM) a été défini pour la première fois par Maropoulos *et al.* (2014). Ce concept d'assemblage, développé à l'origine en collaboration avec Airbus, cherchait à définir la prochaine génération de procédés d'assemblage pour l'industrie aérospatiale. Le principe de l'AAM est d'utiliser des appareils de mesure et des capteurs afin de positionner et d'orienter une pièce au sein d'un système en boucle fermée (Maropoulos *et al.*, 2014) (Fiedler *et al.*, 2024) (Azamfirei, Granlund, Lagrosen & Palm, 2021) (Muelaner, Martin & Maropoulos, 2013).

Dans Maropoulos *et al.* (2014) et Muelaner *et al.* (2013), l'AAM est décomposé en quatre (4) familles de méthodes : les processus prédictifs d'assemblage, les processus de suivi de positionnement, l'outillage actif ainsi que le contrôle en boucle fermée. Une combinaison de ces principes est souvent nécessaire pour implémenter un procédé d'AAM avec succès.

Dans Mei & Maropoulos (2014), le principe de fonctionnement et les interactions entre les diverses composantes logicielles et matérielles de ces systèmes sont décrits. Indirectement, les quatre aspects de l'AAM interviennent tous à un moment ou à un autre de cette chaîne. La figure 2.1 présente un organigramme de ces interactions.

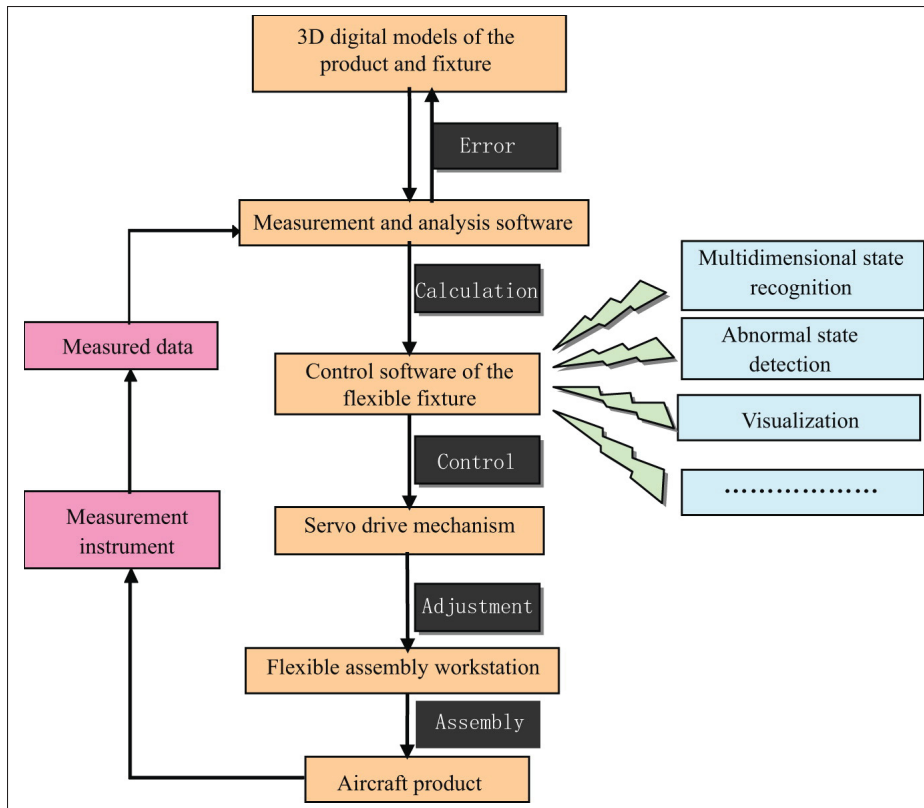


Figure 2.1 Organigramme d'un procédé d'assemblage assistée par la métrologie

Tirée de Mei & Maropoulos (2014)

2.1.1 Les processus prédictifs d'assemblage

Pour les pièces de grande taille, comme en aérospatiale, l'interchangeabilité entre les pièces n'est pas toujours atteinte. Il est donc nécessaire de compenser pour l'assemblage de ces pièces, notamment en raison de leur flexibilité et des variations environnementales telles que la température, ainsi que du manque d'outils de précision de grande taille.

Les pièces sont souvent positionnées et les surfaces d'interfaces préparées dans cet état pré-assemblé. Les trous d'assemblage sont percés à travers tout l'assemblage, les jeux entre les pièces sont évalués avec des étalons pour fabriquer des cales, et les surfaces à usiner ou à sabler sont identifiées. Ce processus itératif de travail de l'interface nécessite de démonter et remonter plusieurs fois les composants (Muelaner *et al.*, 2011).

L'AAM peut faciliter ce processus en permettant de mesurer les pièces à assembler afin de déterminer la forme des cales, la position des trous et les surfaces à usiner avant de procéder à l'assemblage. Le résultat est une interface sur-mesure, préparée en fonction des données métrologiques, qui peut être assemblée en une seule fois (*one-way*), se rapprochant ainsi de l'idéal de l'assemblage pièce-à-pièce (*Part-to-Part*) (Muelaner *et al.*, 2011).

2.1.2 Les processus de suivi de positionnement

Les processus de suivi de positionnement font référence à l'utilisation des outils de métrologie pour assurer le suivi, en temps réel ou non, de la position et de l'orientation d'une pièce d'intérêt dans l'environnement d'assemblage (Maropoulos *et al.*, 2014). Ce processus itératif de mesure de position et d'orientation sert ensuite à guider la manipulation de la pièce afin de converger vers une position respectant les requis d'assemblage.

La manipulation des pièces peut se faire de plusieurs manières. Cette stratégie de convergence est parfois couplée à des systèmes d'outillage actif et de contrôle en boucle fermée pour automatiser la manipulation. Les technologies de réalité augmentée (RA) représentent également une approche prometteuse pour visualiser les erreurs de position et d'orientation, et permettre aux opérateurs de manipuler les pièces de manière plus précise (Dalle Mura & Dini, 2021) (Bounaouara, 2023).

2.1.3 L'outillage actif et le contrôle en boucle fermée

L'outillage actif est une forme d'outillage pour l'assemblage qui utilise des composants actionnés (Maropoulos *et al.*, 2014). Ces systèmes peuvent prendre plusieurs formes, allant d'un simple actionneur linéaire à des robots industriels capables de suivre des trajectoires complexes. Les sources de données pour l'ajustement de la forme de l'outillage peuvent provenir de multiples sources, comme la mesure des dimensions de l'outillage lui-même, des données thermiques des composants à assembler, ou encore de la position et de l'orientation de caractéristiques clés des composants (Maropoulos *et al.*, 2014).

Le contrôle en boucle fermée fait référence aux méthodes de contrôle utilisées pour asservir en temps réel la forme désirée des outillages via la position des actionneurs. Ces méthodes d'asservissement permettent d'améliorer la précision de la position et de l'orientation des pièces ou de la forme obtenue. Dans ces systèmes d'asservissement en boucle fermée, les valeurs des encodeurs des actionneurs sont comparées aux valeurs désirées afin d'améliorer la précision. En règle générale, ce sont des encodeurs externes qui sont utilisés pour que le procédé soit considéré comme de l'AAM (Maropoulos *et al.*, 2014). Cette configuration est plus précise et permet de lier plusieurs outillages ou pièces à un même référentiel commun, réduisant ainsi les erreurs de mesure liées à la conversion d'un système de coordonnées à un autre (Ren, Lin, Zhu, Sun & Ye, 2015).

2.1.4 Quelques exemples d'applications

Plusieurs applications existent et ont été implémentées avec succès dans la littérature. Les systèmes d'AAM sont encore considérés comme à l'état de l'art pour l'assemblage de pièces de grande taille (Fiedler *et al.*, 2024). Voici quelques exemples d'applications.

D'abord, le système iGPS couplé à un robot industriel a été utilisé afin de mettre en place un procédé d'assemblage robotisé sur une chaîne de production en mouvement (Storm, Schönberg & Schmitt, 2017). Le démonstrateur valide la faisabilité et expose l'iGPS comme une technologie clé pour le suivi de positionnement en temps réel.

Ensuite, il a été démontré qu'une procédure d'AAM utilisant le système iGPS est bénéfique pour l'assemblage d'une coque de navire et permet d'accomplir des assemblages respectant les tolérances (de Campos Porath *et al.*, 2019).

Un autre exemple intéressant est l'utilisation de l'iGPS comme encodeurs externes afin d'améliorer le positionnement d'un robot. La performance évaluée du système est estimée en dessous de 0,3 mm pour des vitesses de mouvement de l'ordre de 50 à 100 mm/s (Norman, Schönberg, Gorlach & Schmitt, 2013).

Le système iGPS est l'instrument de mesure de choix pour la plupart des applications d'AAM. Cela s'explique notamment par la possibilité de faire un suivi de positionnement en temps quasi-réel et par la nature décentralisée de ces instruments.

Pour le système physique de manipulation, la plupart des applications d'AAM semblent favoriser l'utilisation de robots industriels standards sur le marché. Ces équipements offrent plus de flexibilité et facilitent la mise en place de procédés d'AAM sur les chaînes de production. C'est donc la direction technologique que ce projet de recherche adoptera pour évaluer l'incertitude liée à ces systèmes.

2.2 La métrologie à grande échelle

L'AAM dépend fortement de la qualité des mesures effectuées et des instruments de mesure utilisés. La métrologie à grande échelle (MGE), traduction libre de *Large Scale Metrology*, est donc un domaine de recherche connexe très important pour le développement des procédés d'AAM. La MGE fait référence aux processus, équipements et techniques de mesure utilisés dans les environnements de production afin de procéder à des inspections géométriques de pièces de grande taille (Schmitt *et al.*, 2016a). Les pièces étudiées en MGE peuvent varier de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres (Schmitt *et al.*, 2016a).

2.2.1 Les difficultés de la MGE

En raison de la grande taille des pièces à l'étude, la MGE fait face à plusieurs défis supplémentaires liés à l'échelle. Dans Schmitt *et al.* (2016a), les différents facteurs affectant l'incertitude des procédés de mesure à grande échelle sont regroupés dans un diagramme d'Ishikawa. Ce diagramme, présenté à la figure 2.2, identifie six principales catégories de causes :

- Les erreurs liées aux opérateurs humains qui conduisent le procédé.
- Les effets de l'environnement (température, vibrations, éclairage, etc.),
- Les erreurs liées à la stratégie de mesure adoptée,
- Les imperfections de l'instrument de mesure lui-même,

- La caractérisation du système de mesure (effets aléatoires, paramètres instrumentaux, etc.),
- Les propriétés de l'objet à mesurer (déformations, matériaux, géométrie, etc.).

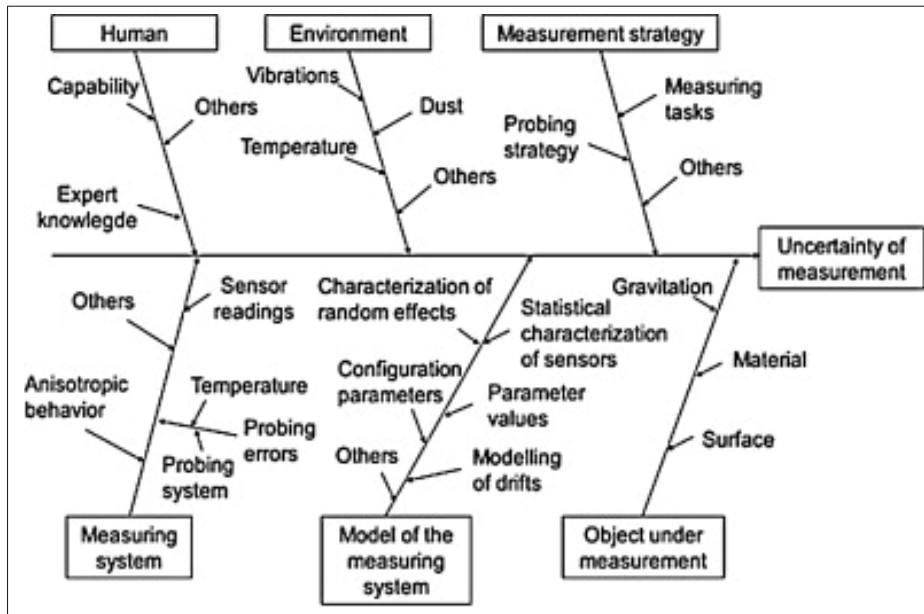


Figure 2.2 Diagramme des causes de l'incertitude des procédés de mesures de MGE

Tirée de Schmitt *et al.* (2016a)

En raison de toute cette complexité, les méthodes statistiques classiques d'assurance qualité sont également difficiles à adapter (Schmitt *et al.*, 2016a). L'évaluation des incertitudes et le développement de modèles holistiques prenant en compte les six catégories de causes constituent un axe de recherche important pour l'avenir de la MGE (Schmitt *et al.*, 2016a).

Afin de relier ces idées aux objectifs de cette recherche, il est nécessaire de considérer l'effet de chacune de ces catégories dans le développement d'une méthodologie d'évaluation expérimentale. Bien que l'impact de ces facteurs soit difficilement quantifiable, il reste essentiel de mettre en place des mesures visant à les atténuer.

2.2.2 Les outils de mesures

Les outils de mesures utilisés en MGE peuvent être classés en deux catégories : les systèmes de palpation (*probing*) à partir de chaînes cinématiques et les systèmes optiques (Schmitt *et al.*, 2016a). Une autre distinction importante à faire entre les différentes technologies de mesure concerne la différenciation entre les systèmes centralisés et les systèmes décentralisés. La figure 2.3 présente la taxonomie des différentes technologies utilisées dans l'industrie.

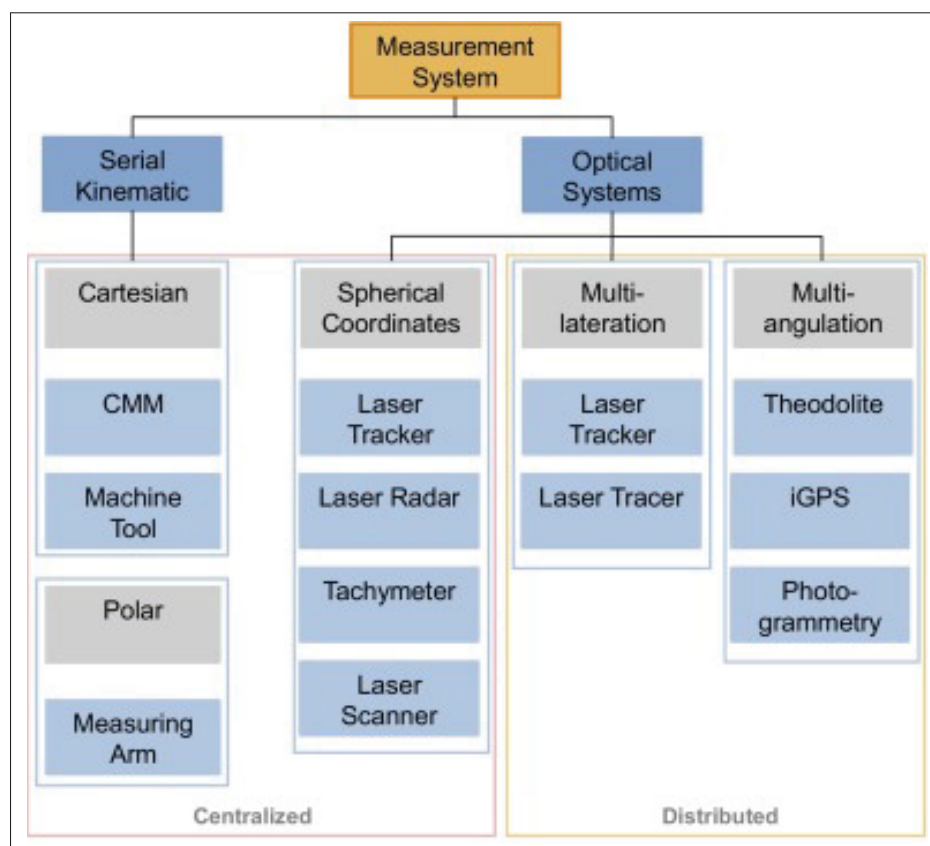


Figure 2.3 Taxonomie des technologies de mesures utilisée en MGE

Tirée de Schmitt *et al.* (2016a)

Parmi ces technologies, les plus couramment utilisées sont les machines de mesure tridimensionnelle (AMT/MMT), les bras palpeurs, les traceurs laser, les scanners laser et les systèmes de photogrammétrie. Les appareils iGPS gagnent en popularité en raison de leur capacité à effectuer

un suivi en temps quasi-réel et de leur intégration aisée avec les procédés industriels intégrés et les systèmes cyber-physiques (CPS).

2.2.2.1 Machine de mesure tridimensionnelle (MMT)

Les MMT sont des machines-outils (généralement à 3 à 5 axes) utilisées lorsque des mesures de grande précision sont requises. Une routine d'inspection peut être programmée ou exécutée manuellement par l'opérateur. La machine palpe la surface de la pièce et enregistre les coordonnées cartésiennes. La précision de ces machines peut atteindre l'ordre du micron (Peggs, Lewis & Oldfield, 1999). Toutefois, la taille des pièces pouvant être inspectées est limitée par les dimensions de la machine, ce qui rend les MMT peu adaptées à la MGE.

2.2.2.2 Bras palpeur

Les bras palpeurs offrent un volume mesurable de l'ordre de quelques mètres (Schmitt *et al.*, 2016a). Composés de plusieurs axes équipés d'encodeurs et d'un palpeur, ils permettent de recueillir des coordonnées polaires à la surface de la pièce. Ces instruments présentent l'avantage d'être facilement déplaçables vers la pièce à mesurer et simples d'utilisation. La précision de ces instruments est estimée entre 5 et 20 microns, selon qu'ils sont utilisés avec un palpeur ou un scanner laser (Cai, Luo & Liu, 2019) (Wu & Tai, 2024). Toutefois, la taille du bras limite la dimension des caractéristiques pouvant être inspectées.

2.2.2.3 Traqueur laser

Les traqueurs laser sont composés d'un interféromètre pour mesurer la distance et de deux encodeurs angulaires permettant de déterminer l'orientation de la source lumineuse. Ils disposent de la capacité de suivre automatiquement des cibles. Pour effectuer des mesures, des cibles doivent être installées sur la pièce à mesurer. L'utilisation de ces cibles rend cependant les mesures directes de géométries complexes plus difficiles, car il doit exister une ligne directe entre l'émetteur laser et la cible réfléchive sur la pièce. Il est donc souvent nécessaire de déplacer

l'appareil ou d'en utiliser plusieurs pour couvrir l'ensemble de la pièce. La portée de ces traqueurs est d'environ 80 m, tandis que la précision dépend de la distance et est évaluée à environ $10\mu m \pm 0,4\mu m/m$ (Peggs *et al.*, 2009).

2.2.2.4 Scanner laser

Les scanners laser utilisent différentes technologies, mais reposent tous sur le principe de la télémétrie. Ces instruments permettent de produire directement des données numériques décrivant la forme de la pièce sous forme de nuages de points. Ils offrent ainsi la possibilité de mesurer des caractéristiques difficiles à palper, comme des surfaces courbes complexes ou des zones difficiles d'accès avec un palpeur. Les scanners laser fonctionnent soit sur le principe du temps de vol (*Time of Flight*), soit sur le principe du décalage de phase (*Phase Shift*) (Schmitt *et al.*, 2016a) (Marrugo, Gao & Zhang, 2020). Les logiciels associés permettent de fusionner les données provenant de différents points de vue d'un même objet. Pour obtenir des résultats précis, la position et l'orientation du scanner doivent être suivies pendant la prise de mesures. Ces appareils sont souvent couplés à des méthodes de mesure de position et d'orientation, comme la photogrammétrie, une machine AMT/MMT ou un bras palpeur. La précision des scanners laser varie selon les modèles, mais elle est généralement estimée entre 15 et 30 μm (Emir & Ayyıldız, 2019; Wan *et al.*, 2023).

2.2.2.5 Photogrammétrie

La photogrammétrie consiste à utiliser une ou plusieurs caméras pour déterminer la position et l'orientation d'une pièce ou pour créer des modèles numériques. Dans la stéréo-photogrammétrie, la vision stéréoscopique est utilisée pour obtenir des informations de profondeur à partir d'images prises depuis deux perspectives différentes, la distance entre les deux caméras étant fixe et connue, ce qui permet un calcul précis des coordonnées tridimensionnelles. Une autre approche consiste à prendre plusieurs photographies de la pièce sous des perspectives légèrement différentes, avec un chevauchement entre les images. Un algorithme de vision identifie des caractéristiques de la pièce, telles que les coins, les arêtes ou les trous, afin d'assembler les différentes perspectives.

Cette méthode est moins précise que la stéréo-photogrammétrie, mais elle offre une plus grande flexibilité à l'opérateur et est particulièrement adaptée à la métrologie à grande échelle. L'ajout de cibles sur la surface de la pièce améliore la précision de l'appariement des points. La qualité des résultats dépend fortement du logiciel d'analyse et de la manière dont les données sont traitées (Mei & Maropoulos, 2014). La précision de ces méthodes est estimée à environ 1 : 10 000, ce qui correspond à 1 mm sur 10 m (Estler, Edmundson, Peggs & Parker, 2002).

2.2.2.6 Le système iGPS

Le système iGPS, développé par Nikon, repose sur le même principe que les théodolites, c'est-à-dire que les coordonnées sont calculées à partir de mesures angulaires provenant de plusieurs positions différentes. Cependant, il se distingue par son automatisation (Schmitt *et al.*, 2016a). Dans l'espace de travail, plusieurs émetteurs sont disposés, chacun ayant une fréquence de rotation unique comprise entre 40Hz et 50Hz (Mastrogiacomo *et al.*, 2011) (Galetto *et al.*, 2010). Ces émetteurs envoient des signaux pulsés à chaque rotation et émettent en permanence deux faisceaux laser plan. La figure 2.4, tirée de Mastrogiacomo *et al.* (2011), illustre un émetteur ainsi que la forme et l'orientation des cônes laser.

En raison de cette configuration, l'angle entre les plans est supérieur à 90° au-dessus du plan horizontal et inférieur à 90° en dessous. La même figure montre les signaux lumineux perçus par un capteur sans fil pendant un cycle. Lorsque le système iGPS est en fonctionnement, les capteurs situés dans l'espace de travail reçoivent les signaux de tous les émetteurs. L'analyse temporelle de ces signaux permet de déterminer les angles d'élévation et d'azimut entre chaque émetteur et le capteur aux points d'intérêt dans le volume de travail.

Pour trianguler la position d'un capteur, un minimum de deux émetteurs est nécessaire, mais la précision s'améliore notablement lorsque quatre émetteurs se trouvent à portée d'un capteur (Miah, Chand & Malhi, 2023) (Norman *et al.*, 2013). La figure 2.5 illustre un réseau iGPS composé de quatre émetteurs et d'un capteur en fonctionnement. Les données temporelles sont

transmises sans fil depuis les capteurs vers l'ordinateur, où elles sont traitées par le logiciel associé. Les caractéristiques importantes du système iGPS sont entre autre :

- Un émetteur a une portée estimée entre 2m et 55m (7D Kinematic Metrology, s.d.) (Miah *et al.*, 2023).
- Pas besoin de ligne directe avec un seul appareil de mesure. L'environnement peut être aménagé avec les émetteurs pour faciliter la prise de mesures sur des pièces de grandes tailles.
- Il est possible d'utiliser jusqu'à 25 capteurs iGPS en même temps (Miah *et al.*, 2023).
- La prise de mesures parallèle est rapide et fiable (Norman *et al.*, 2013) (Franceschini, Galetto, Maisano, Mastrogiacomo & Pralio, 2011).

2.2.2.7 La précision de l'iGPS

La précision du système iGPS, avec un intervalle de confiance de 95% ($\pm 2\sigma$), a été évaluée à 0,150 mm pour la mesure de la position par le fabricant (7D Kinematic Metrology, s.d.). Ce nombre augmente à 0,250mm si les capteurs sont en mouvement à des vitesses inférieures à 0,5 m/s (7D Kinematic Metrology, s.d.). Il est cependant important de noter que ces valeurs ont été mesurées en utilisant une configuration avec 8 émetteurs dans un espace de travail de 10m par 20m. D'autres expériences ont permis d'évaluer cette précision statique ($\pm 2\sigma$) entre 0,169mm et 0,315mm, dépendamment du volume de l'espace de travail (Norman *et al.*, 2013).

La chaîne d'incertitudes du système iGPS est cependant complexe. Plus d'études sont nécessaires afin d'approfondir la connaissance des incertitudes liées à ces instruments, surtout dans des conditions d'utilisation réelles (Norman *et al.*, 2013). La procédure d'étalonnage de la position des émetteurs est également une étape pouvant affecter la précision du système (Han, Dunker, Trostmann & Xu, 2024b).

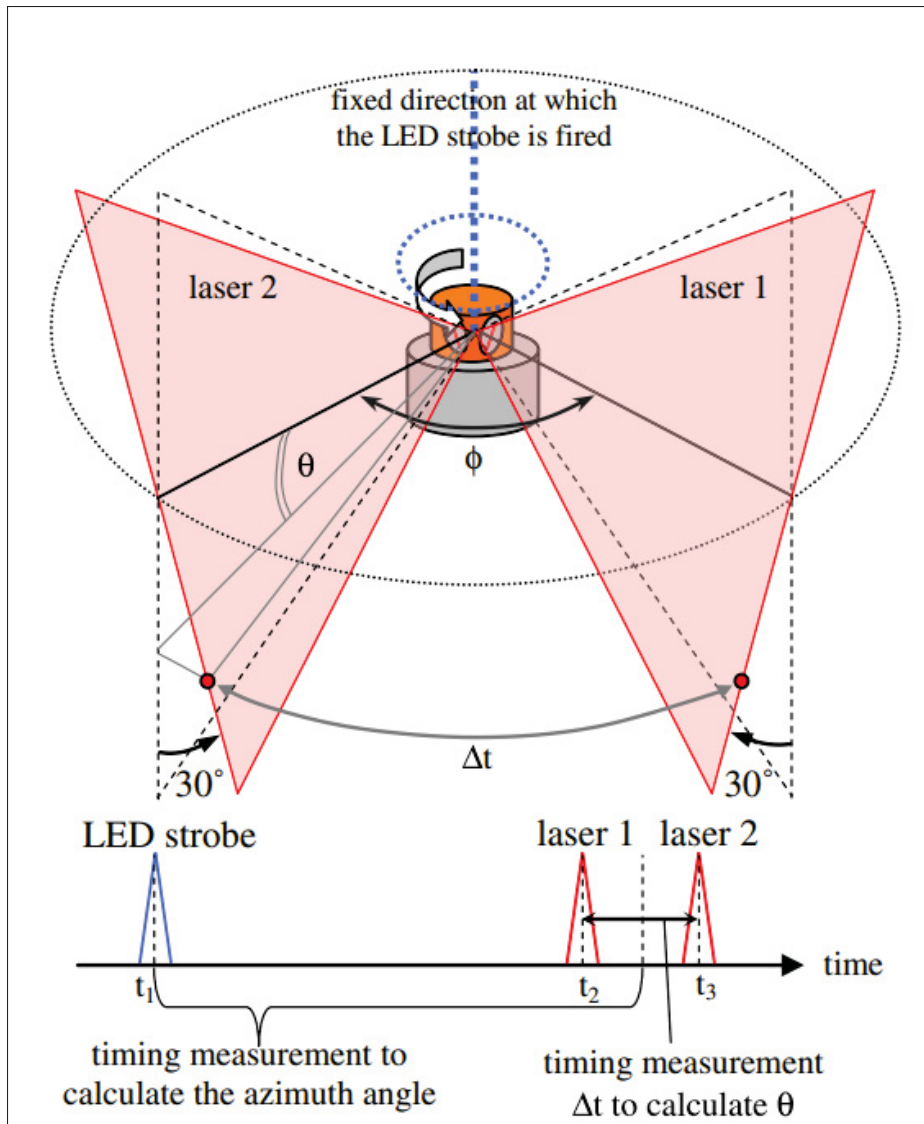


Figure 2.4 Principe de fonctionnement de l'iGPS
Tirée de Mastrogiacomo *et al.* (2011)

2.2.2.8 Comparaison des technologies pour l'utilisation en AAM

Parmi les technologies de métrologie présentées, le système iGPS est le plus adapté aux applications d'AAM. Le tableau 2.1 compare les caractéristiques de l'iGPS, des traqueurs laser et des systèmes de photogrammétrie. Les volumes de mesure approximatifs ainsi que la précision estimée pour ces volumes sont également indiqués.

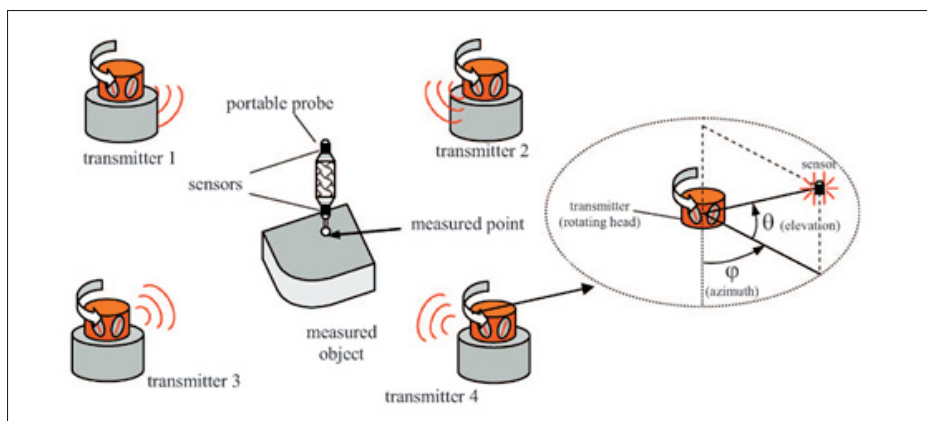


Figure 2.5 Un réseau d'émetteur iGPS
Tirée de Galetto *et al.* (2010)

Tableau 2.1 Comparaison des technologies de
métrologie pour l'assemblage assisté par mesure (MAA)

Technologie	Volume de mesure	Précision	Mobilité	Rétroaction en temps réel	Pertinence pour le MAA
iGPS	Très grand (réseau d'émetteurs extensible)	$\approx 0,5$ mm	Élevée (émetteurs/capteurs portables)	Oui	Excellente
Tracker laser	Moyen à grand (2–60 m typique)	$\approx 10\text{--}50$ μm	Moyenne (nécessite ligne de visée)	Limitée (mesures discrètes)	Bonne, mais plus lente pour rétroaction dynamique
Photogram-métrie	Grand (jusqu'à 100 m avec images en réseau)	$\approx 1\text{--}10$ mm	Élevée (caméra)	Non	Limitée pour l'usage en temps réel

En bref, le système iGPS comporte plusieurs avantages par rapport aux autres instruments de MGE. Ce système a le potentiel d'augmenter la capacité des procédés d'assemblage de pièces à large volume. L'iGPS est un outil important pour la recherche en AAM.

2.3 Le principe de l'incertitude

L'incertitude de mesure fait référence à la quantification de la qualité d'une mesure. L'incertitude représente la plage de valeurs qui pourrait raisonnablement être attribuée au mesurande (BIPM *et al.*, 2008). Cette définition est tirée du *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*. Il s'agit d'une référence internationale qui propose des méthodes pour définir et évaluer l'incertitude inhérente à chaque mesure (mesure directe ou une fonction de mesures). L'utilisation de ce guide permet la standardisation des termes et des méthodes d'évaluation à travers les laboratoires de recherche dans divers domaines scientifiques et de l'industrie. Les définitions (terminologie) des termes présentés dans les sections suivantes sont tous issus de ce document. Des méthodes alternatives de propagation de l'incertitude sont également discutées.

2.3.1 Modélisation du mesurage et évaluation de l'incertitude

Dans la plupart des situations où l'on cherche à mesurer une valeur, celle-ci ne s'obtient pas directement. Elle est déterminée en mesurant N autres grandeurs ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_N$) qui sont liées au mesurande Y par une fonction de mesure.

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

Les valeurs des grandeurs X_i peuvent à leur tour dépendre d'autres grandeurs physiques. Ce phénomène de chaîne d'incertitude est ce que l'on appelle la propagation des incertitudes. En fait, à partir de l'incertitude sur chacune des valeurs d'entrée X_i et de la fonction de mesure, on peut exprimer le doute sur le mesurande Y .

Selon le *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (GUM), il existe deux types d'évaluation de l'incertitude associés à chacune des grandeurs X_i du modèle de mesure. L'évaluation de l'incertitude de type A est issue d'observations répétées de la variable aléatoire et de la distribution statistique résultante dans des conditions définies de mesurage. L'évaluation

de l'incertitude de type B est issue de données disponibles non issues d'observations répétées, comme des données du fabricant, la littérature scientifique ou une expérience antérieure.

Le principe de base est de déterminer l'incertitude-type u de chacune des variables X_i par l'une de ces méthodes. Il est ensuite possible de déterminer l'incertitude-type combinée u_c affectant le mesurande Y par la loi de propagation de l'incertitude.

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \cdot u(x_i) \right)^2} \quad (2.2)$$

où :

- $u_c(y)$ est l'incertitude-type combinée sur la grandeur y ,
- $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ est le coefficient de sensibilité de y par rapport à la variable x_i ,
- $u(x_i)$ est l'incertitude-type de la grandeur d'entrée x_i ,

Parfois, cette fonction est complexe et peut exister seulement sous forme d'un algorithme (formulation explicite non disponible, mais c'est le résultat d'un algorithme d'optimisation), d'une fonction hautement non linéaire, ou d'une fonction non dérivable. Dans ces cas, il faut utiliser des méthodes expérimentales couplées à des simulations afin d'évaluer l'incertitude. D'autres méthodes de propagation d'incertitude sont présentées à la section 2.3.3.

La valeur de l'incertitude-type combinée u_c représente l'incertitude de mesure sur la variable d'intérêt. Cependant, dans la plupart des applications, il est préférable d'utiliser une zone de confiance élargie pour quantifier l'incertitude U selon un risque type I préétabli. Cette zone de confiance est obtenue simplement par un multiple K de l'incertitude-type combinée.

$$U = K u_c \quad (2.3)$$

Avec :

- U : incertitude élargie,
- K : facteur de couverture (généralement choisi en fonction du niveau de confiance souhaité),
- u_c : incertitude-type combinée, calculée à partir de l'incertitude des grandeurs d'entrée.

Dans le cas où le mesurande peut être approximé par une loi normale et pour un nombre de degrés de liberté élevé, un facteur de couverture $K \approx 2$ correspond à un niveau de confiance d'environ 95 % (BIPM *et al.*, 2008). Les correspondances $K = 1$, $K = 2$ et $K = 3$ avec des niveaux de confiance d'environ 68 %, 95 % et 99,7 % proviennent des propriétés de la loi normale.

En revanche, lorsque le mesurande ne peut pas être approximé par une loi normale, il est préférable d'utiliser des approches comme les simulations de Monte Carlo, les méthodes de propagation non linéaire ou encore les méthodes fondées sur les percentiles pour estimer l'intervalle de confiance élargi.

2.3.2 Terminologie

2.3.2.1 Répétabilité

La répétabilité est l'étroitesse entre les mesures successives d'un même mesurande (BIPM *et al.*, 2012). Ces mesures sont effectuées dans les mêmes conditions expérimentales. La figure 2.6a illustre la répétabilité de deux (2) séries de mesures. L'étroitesse de la fonction de densité de probabilité résultante représente la mesure de la répétabilité. Dans cet exemple, le mesurage 2 présente une meilleure répétabilité.

2.3.2.2 Reproductibilité

La reproductibilité correspond à l'étroitesse entre les mesures d'un même mesurande lorsque les conditions expérimentales varient (BIPM *et al.*, 2012). Un exemple typique est l'étude de la reproductibilité d'un gabarit d'assemblage, où les mêmes mesures sont effectuées par différents opérateurs. Ces variations de conditions se traduisent par des séries de mesures avec

des moyennes différentes. La reproductibilité représente alors l'écart entre les moyennes de plusieurs séries de mesures. La figure 2.6b illustre ce concept.

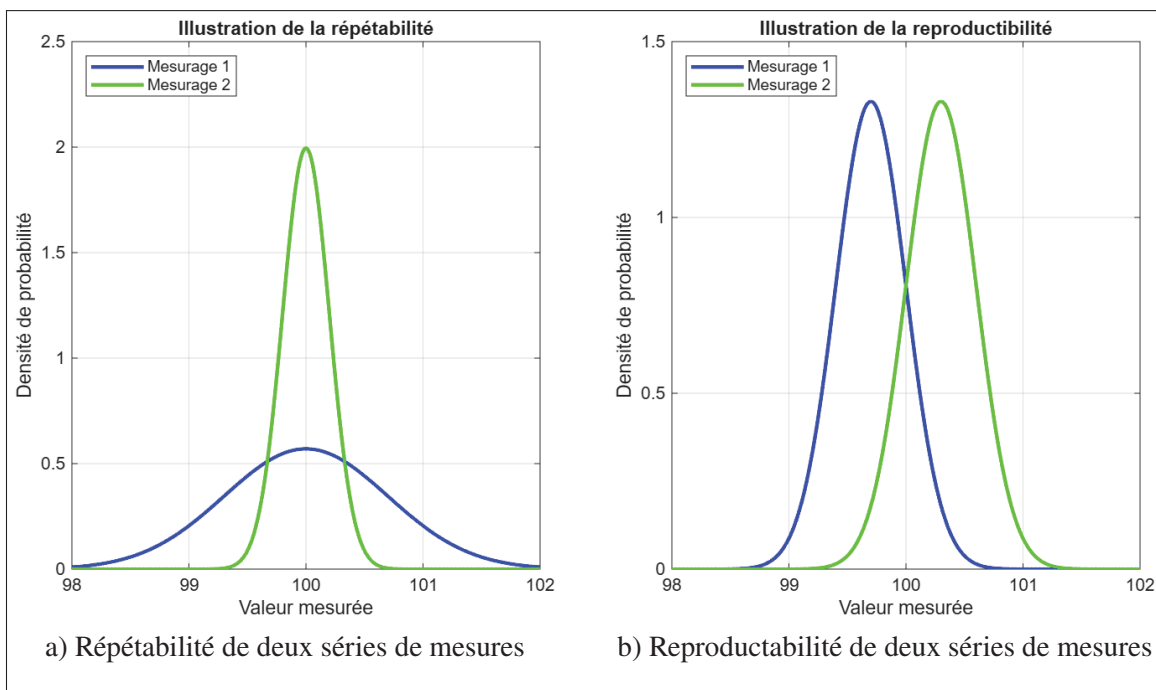


Figure 2.6 Répétabilité et reproductibilité

2.3.2.3 Exactitude

L'exactitude est définie comme l'écart entre une valeur mesurée et une valeur de référence (BIPM *et al.*, 2012). En pratique, il est parfois difficile de connaître la valeur de référence avec exactitude. Dans ce cas, une valeur nominale ou une mesure provenant d'un instrument de mesure ayant moins d'incertitude est utilisée comme valeur de référence.

2.3.2.4 Erreur de mesure

L'erreur de mesure est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur de référence (BIPM *et al.*, 2012). Elle contient deux parties : une composante systématique et une composante aléatoire.

2.3.2.5 Erreur systématique

L'erreur systématique est la composante de l'erreur qui varie de manière répétée, constante et prévisible sur une série de mesures (BIPM *et al.*, 2012). Elle se traduit par un décalage constant par rapport à la valeur de référence. Des exemples d'erreurs systématiques sont, entre autres, des erreurs de lecture d'instrument répétées, un biais causé par la méthode de mesure ou un appareil mal étalonné. Il s'agit d'une cause identifiable. L'augmentation du nombre de mesures répétées ne contribue pas à diminuer la contribution de l'erreur systématique.

2.3.2.6 Erreur aléatoire

L'erreur aléatoire est la composante de l'erreur qui varie de façon imprévisible et aléatoire lors d'une série de mesures (BIPM *et al.*, 2012). Cette erreur est due à des phénomènes non contrôlés comme le bruit de mesure, des vibrations ou des variations de température. Cette erreur affecte les mesures de manière symétrique, c'est-à-dire que parfois elle contribue à augmenter l'erreur et parfois à la diminuer. Augmenter le nombre de mesures a tendance à diminuer la contribution de l'erreur aléatoire.

2.3.2.7 Traçabilité métrologique

La traçabilité métrologique est un concept central en métrologie. Un résultat est traçable si une chaîne ininterrompue d'étalonnage et de documentation permet de le lier à un étalon primaire (généralement exprimable dans le système SI), chacun contribuant à l'incertitude de mesure (BIPM *et al.*, 2012). La traçabilité est importante car elle permet la fiabilité des mesures et la comparabilité internationale.

2.3.3 Autres méthodes de propagation

Le choix de la méthode de propagation de l'incertitude dépend de la complexité du modèle de mesure et de la distribution des variables d'entrée. La méthode du GUM classique présentée en 2.3.1 est souvent utilisée pour les cas simples, alors que d'autres méthodes sont à prioriser

lorsque la complexité du modèle l'exige (BIPM *et al.*, 2008). Cette section n'est pas une liste exhaustive des méthodes de propagation ; l'objectif est de fournir un aperçu de certaines méthodes de propagation.

2.3.3.1 Méthode de Monte Carlo

Le principe de la méthode de Monte Carlo est de prélever plusieurs échantillons (par simulation) à partir des distributions des variables d'entrée du modèle de mesure afin de produire une distribution des valeurs possibles du mesurande. L'incertitude peut ensuite être déterminée à partir d'une analyse statistique sur la distribution résultante (Crowder, Delker, Forrest & Martin, 2020).

L'avantage de cette méthode est qu'elle ne nécessite pas la normalité des variables d'entrée et que le modèle peut être non-linéaire ou algorithmique (Crowder *et al.*, 2020). Il s'agit de loin de la méthode la plus utilisée en matière de propagation de l'incertitude. La méthode de Monte Carlo peut cependant être très coûteuse en ressources informatiques (Bernardini, McLinden, Yang & Richter, 2024).

2.3.3.2 Méthode de sensibilité numérique directe

La méthode de sensibilité numérique consiste d'abord à estimer chacune des incertitudes des variables d'entrée du modèle de mesure par les méthodes d'estimation du GUM (évaluation de type A et évaluation de type B). Ensuite, une analyse de sensibilité est conduite afin de quantifier l'effet de la variation de l'incertitude de chacune des variables d'entrée sur la sortie (Bernardini *et al.*, 2024). La propagation est ensuite conduite en utilisant la valeur de ces sensibilités. Cette méthode permet de remplacer la dérivée partielle présente dans le modèle classique de propagation de l'incertitude (Bernardini *et al.*, 2024). L'équation de propagation modifiée est tirée de Bernardini *et al.* (2024).

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left[\frac{(y_i^+ - \bar{y}) + (\bar{y} - y_i^-)}{2} \right]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^p \left[\frac{y_i^+ - y_i^-}{2} \right]^2}, \quad (2.4)$$

où

- $\bar{y}$ est la sortie nominale du système ;
- p est le nombre de contributions à l'incertitude (ou de grandeurs d'entrée) ;
- (y_i^+, y_i^-) sont les valeurs perturbées de la sortie.

L'avantage de cette méthode est qu'elle réduit les ressources informatiques nécessaires pour la complétion du calcul. Cette méthode est souvent utilisée conjointement aux méthodes d'éléments finis d'ingénierie afin de quantifier l'incertitude dans les résultats de simulation.

2.3.3.3 Méthode statistique fréquentiste

Les méthodes statistiques fréquentistes sont utilisées lorsque la distribution du mesurande est connue (ex. normale, Chi-carrée, binomial, etc.). Le principe consiste à inférer les paramètres de cette distribution à partir d'un échantillon de mesures. Ensuite, avec ces informations, on peut mathématiquement définir l'intervalle de confiance du mesurande en fonction du niveau de confiance choisi.

L'avantage de cette méthode est qu'elle est rapide et simple lorsque la distribution est connue. Des tables statistiques et des tests d'hypothèse sont connus et disponibles dans tous les logiciels de statistique, et les procédures de quantification de l'incertitude sont bien définies (Caldwell, 2018). Elle présente cependant quelques limitations, comme sa grande complexité mathématique dans des cas complexes et non-linéaires. Dans certains cas, des simplifications sont nécessaires. Elle nécessite également d'assumer a priori la distribution du mesurande, ce qui n'est pas toujours réaliste. Finalement, les méthodes fréquentistes sont inflexibles : elles dépendent directement de l'échantillon de mesures dans des conditions précises. L'ajout de nouvelles informations dans des conditions différentes ne permet pas de mettre à jour l'estimation de l'incertitude, contrairement à la méthode bayésienne (Berry, 1993).

2.3.3.4 Méthode Bayésienne

Dans l'approche bayésienne pour déterminer l'incertitude, on parle plutôt d'un intervalle de crédibilité.

La méthode bayésienne utilise des distributions de probabilité préalables (a priori) ainsi que les distributions de probabilité issues de données observées afin de mettre à jour la croyance actuelle (posteriori). Le résultat est une distribution de probabilité qui reflète l'incertitude (Contreras, Brown & Ruest, 2017) (Tröger, Römer & Hartmann, 2024). Cette méthode est basée sur l'équation du théorème de Bayes. Dans le cas de distributions continues, l'équation devient plus complexe, mais le principe demeure inchangé.

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (2.5)$$

où :

- $P(A | B)$: Probabilité a posteriori, c'est-à-dire la probabilité que l'événement A soit vrai sachant que B est observé.
- $P(B | A)$: Vraisemblance, soit la probabilité d'observer B si A est vrai.
- $P(A)$: Probabilité a priori de l'événement A , avant toute observation.
- $P(B)$: Probabilité marginale de l'événement B , obtenue en sommant sur toutes les valeurs possibles de A .

Cette méthode est couramment utilisée lors de la fusion de données afin d'obtenir la meilleure estimation issue de plusieurs instruments différents, ou encore dans des processus où l'estimation doit être mise à jour en continu. C'est d'ailleurs le fondement mathématique derrière le filtre de Kalman. L'avantage de ce type de méthode réside dans l'utilisation de connaissances antérieures et la possibilité d'incorporer de nouvelles données pour ajuster l'estimation de l'incertitude (Beck, 2010).

Les résultats dépendent fortement des hypothèses initiales. Si cette connaissance initiale s'avère fausse, le raisonnement qui en découle sera également incorrect, ce qui représente un risque pour les processus critiques (Ferrero, Salicone & Jetti, 2019). Cette méthode est également plus difficile à expliquer et à justifier, la rendant plus difficile à appliquer dans des domaines très régulés comme l'aéronautique (Ferrero *et al.*, 2019).

2.4 Les robots industriels

Les robots industriels ont fait leur apparition à la fin des années 1960 conjointement avec les technologies de conception assistée par ordinateur (CAO) (Craig, 2005). L'adoption de ces technologies est en constante augmentation dans l'industrie (Craig, 2005). La différence entre ces solutions robotisées, qu'on désigne parfois comme des robots manipulateurs, et les solutions d'automatisation fixe réside dans la flexibilité et la grande variété de tâches qu'il est possible d'accomplir.

Les robots manipulateurs peuvent être divisés en deux catégories, soit les robots sériels et les robots parallèles. Les robots sériels sont les plus répandus dans le monde industriel ; ils permettent d'accomplir des mouvements complexes grâce à leur grand nombre de degrés de liberté. Ils sont composés d'une seule chaîne mécanique de joints et de corps, les rendant plus flexibles et offrant une plus grande zone de travail comparativement aux robots parallèles. Ces robots sont donc plus adaptés aux tâches requérant une grande manœuvrabilité.

En contrepartie, les robots parallèles sont constitués de plusieurs membrures manipulant une base commune. Les robots parallèles offrent généralement une meilleure précision en raison de leur plus grande rigidité. Ils peuvent également atteindre des vitesses plus élevées car le positionnement des actionneurs est fixe durant l'opération. Ils ont cependant des espaces de travail plus restreints et sont moins flexibles. Les contrôleurs des robots parallèles sont plus complexes car les équations impliquent plusieurs chaînes mécaniques, nécessitant des algorithmes de contrôle plus élaborés. Ces robots sont souvent utilisés pour les opérations de « Pick and Place » qui nécessitent des vitesses de déplacement élevées.

Pour les opérations d'assemblage assisté par la métrologie, ce sont généralement les robots manipulateurs sériels qui sont utilisés en raison de leur large espace de travail et de leur flexibilité de mouvement (Schmitt *et al.*, 2016a) (Schmitt *et al.*, 2016b) (Norman *et al.*, 2013) (Azamfirei *et al.*, 2021).

Cette section traite de la cinématique directe et inverse, de l'étalonnage des robots industriels ainsi que de la norme ISO 9283 qui standardise l'évaluation de la précision et de la répétabilité des robots industriels.

2.4.1 La cinématique directe

La cinématique directe permet de calculer la position et l'orientation du poignet du robot dans le référentiel de la base lorsque les valeurs articulaires de chacun des joints sont connues. Pour les robots parallèles, la cinématique directe n'est pas triviale. Il n'y a pas de manière systématique de la résoudre. Pour les robots sériels, cette opération peut être faite de manière systématique en définissant un repère pour chacune des membrures du robot. En respectant la notation DH (Denavit-Hartenberg) pour le choix de ces repères, il est possible de construire une table qui sert à bâtir la chaîne de matrices de transformation de la base vers le poignet du robot (Denavit & Hartenberg, 1955).

Les quatre paramètres de la notation DH sont définis pour chacun des joints du robot sériel. Ce sont ces quatre paramètres qui sont utilisés dans la formule de la matrice de transformation. La figure 2.7 présente le robot IRB120™ et les repères associés à chacun de ses joints ainsi que la table des paramètres DH (Truc & Lam, 2020). Dans cette figure, q_i désigne les valeurs articulaires de chacun des joints. Les quatre (4) paramètres DH sont illustrés à la figure 2.8 (Žlajpah & Petrič, 2023).

2.4.2 La cinématique inverse

La cinématique inverse consiste à résoudre le problème inverse. En connaissant les valeurs numériques de la matrice de transformation définissant le changement de coordonnées de la base du robot vers le poignet, il faut déterminer la valeur articulaire de chacun des joints ($q_1, q_2, \dots, q_n$) (Craig, 2005). La cinématique inverse permet donc de commander au robot d'atteindre une position et une orientation désirées. La résolution de la cinématique inverse n'est pas triviale. Il n'y a pas de méthodes systématiques pour résoudre le système d'équation non

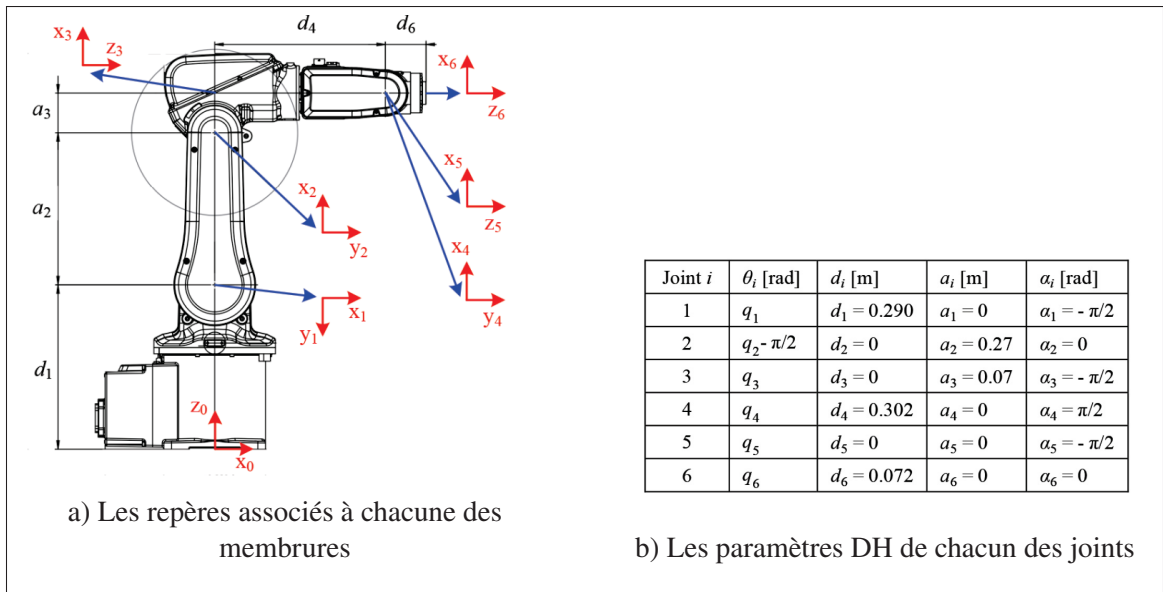


Figure 2.7 Les repères et les paramètres DH du robot IRB120™
Tirée de Truc & Lam (2020)

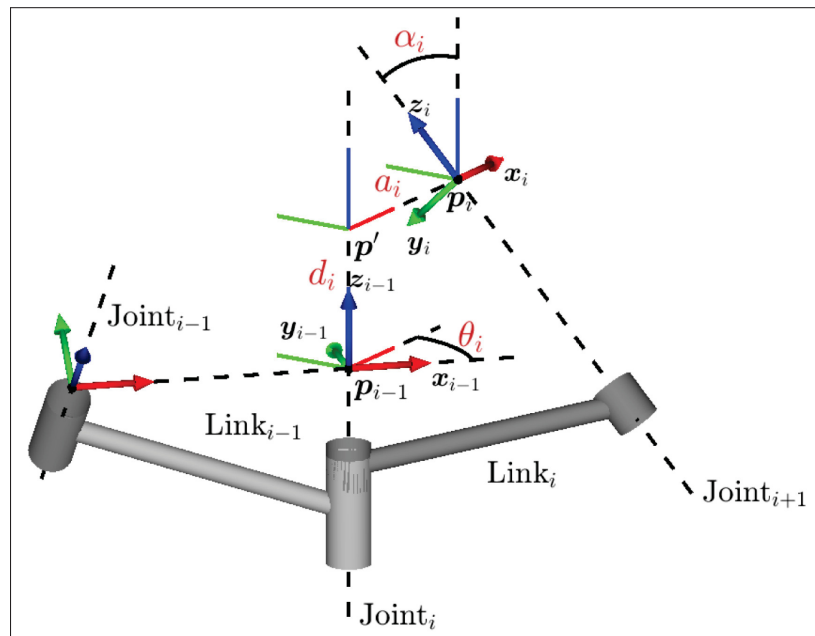


Figure 2.8 Définition des paramètres DH
Tirée de Žlajpah & Petrič (2023)

linéaires résultant. Selon la complexité du robot, il peut y avoir plusieurs solutions pour une même position et orientation désirées.

2.4.3 L'étalonnage des robots industriels

Il existe deux méthodes de programmation pour les robots industriels. Les robots peuvent être programmés en-ligne, c'est-à-dire à même les chaînes de production, ou encore hors-ligne grâce à des logiciels de simulation et de planification de trajectoire.

La méthode en-ligne est plus simple et nécessite peu d'outils. Cependant, elle occasionne des temps d'arrêt de la chaîne de production et est également inflexible. Les changements au programme du robot nécessitent plus de temps à mettre en place. Ce type de programmation utilise principalement des positions et orientations enseignées au robot, où l'opérateur guide le robot dans les positions désirées afin d'écrire le programme. Cette méthode fait usage des capacités de répétabilité du robot, qui sont généralement très bonnes (Gaudreault, Joubair & Bonev, 2018).

L'avantage de la programmation hors-ligne est que le programme du robot peut être développé en amont avec des logiciels de simulation, permettant de ne pas interrompre la chaîne de production. Cette méthode occasionne cependant des enjeux de précision lorsque le programme est mis en fonction dans un environnement réel, nécessitant des ajustements sur les poses commandées. Cette méthode fait plutôt usage de la précision des robots industriels, qui est inférieure à la répétabilité (Gaudreault *et al.*, 2018).

Cette imprécision est surtout due aux erreurs du modèle cinématique. En fait, les différents paramètres qui interviennent dans le modèle sont issus de dimensions nominales alors qu'en réalité, des tolérances de fabrication et des jeux d'assemblage affectent la précision. D'autres facteurs comme la dilatation thermique, la flexion des membrures et l'usure sont également en cause (Li, Li & Luo, 2021). Des sources d'erreurs supplémentaires, telles que les limitations des capteurs, les erreurs de contrôle et de temps de réponse, peuvent également contribuer à l'imprécision du système.

Afin d'améliorer la performance en précision des robots industriels, l'étalonnage est souvent nécessaire. Cette procédure permet d'optimiser le choix des paramètres du modèle cinématique afin de minimiser les erreurs de précision. Il existe de nombreuses méthodes, techniques et variantes. En fait, l'étalonnage des robots sériels est encore aujourd'hui un sujet de recherche actif (Hu, Xie, Yin & Yin, 2025) (Boschetti & Sinico, 2024).

De façon générale, les grandes lignes de l'étalonnage des robots sériels sont les suivantes :

1. Modéliser la cinématique par les paramètres DH ou autre méthode.
2. Collecter des données avec un appareil de mesure externe (ex. traceur laser, MMT) et noter les valeurs articulaires ($q_1, q_2, q_3, \dots, q_i$) pour plusieurs positions et orientations dans l'espace de travail. Cette collecte peut être effectuée de manière statique, où le robot est immobile lors de chaque mesure, ou dynamique, où les mesures sont prises en mouvement, selon l'application visée et les effets que l'on cherche à corriger.
3. Développer un modèle d'erreur mettant en relation l'erreur de positionnement avec les paramètres du modèle cinématique.
4. Procéder à l'identification des paramètres par des méthodes d'optimisation.
5. Mettre à jour les paramètres du modèle et tester l'amélioration de la précision pour des positions et orientations différentes.

2.4.4 La norme ISO 9283

La norme ISO 9283 :1998, intitulée « Robots manipulateurs industriels — Critères de performance et méthodes d'essai correspondantes », est une norme internationale qui vise à standardiser les critères de performance des robots afin de faciliter la compréhension entre fabricants et utilisateurs (International Organization for Standardization, 1998).

Plusieurs types d'essai sont abordés dans la norme, comme l'exactitude et la répétabilité de pose, l'exactitude et la répétabilité de distance, l'interchangeabilité entre robots ainsi que de nombreux autres tests de suivi de trajectoire, d'erreur de raccordement et de vitesses. Dans le

contexte de ce projet, les définitions ainsi que les méthodes d'évaluation de l'exactitude et de la répétabilité de pose sont les plus pertinentes. Dans les deux cas, un système de mesures externes est utilisé pour mesurer les poses atteintes par le robot.

2.4.4.1 Répétabilité de pose

La norme ISO 9283 :1998 définit plusieurs paramètres de test afin d'évaluer la répétabilité de pose, tels que les poses à utiliser, les trajectoires, le nombre de cycles de mesure, les conditions environnementales, la vitesse et les conditions de chargement à appliquer, ainsi que les trajectoires.

Dans le cas d'un robot sériel à 6 axes, les positions définissent un cube avec 5 positions à tester. La trajectoire d'essai est P1-P2-P3-P4-P5 pour 30 cycles. Le cube est centré dans l'espace de travail du robot. Il n'y a pas de recommandation précise concernant la taille du cube, mais il est recommandé qu'il soit aussi grand que possible. L'orientation du poignet doit rester constante pour le test, avec la surface du poignet normale à la direction $\hat{x}$ de la figure 2.9.

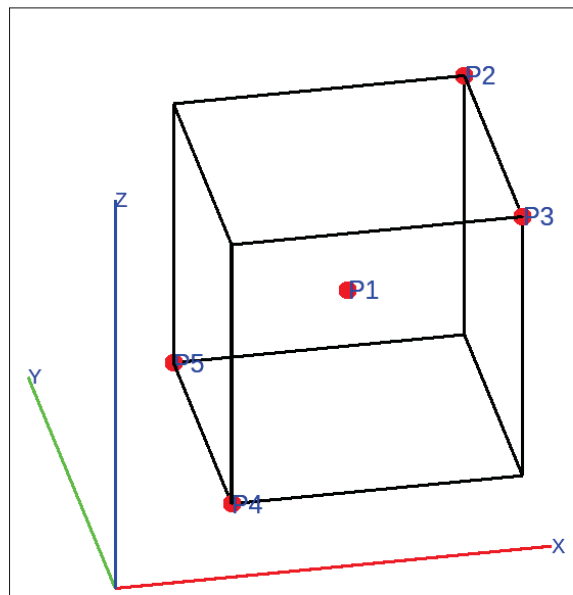


Figure 2.9 Position d'essais de
répétabilité ISO9283 :1998
Tirée de Babin *et al.* (2025)

Selon la norme, la répétabilité est définie comme le rayon de la sphère centrée au barycentre des mesures pour la même pose commandée. L'équation de la répétabilité de pose est présentée en 2.6, tandis que 2.7 et 2.8 présentent les termes sous-jacents. RP_l désigne le rayon de la sphère de répétabilité, tandis que σ_l désigne l'écart type de la déviation par rapport au barycentre.

$$RP_l = \bar{l} + 3\sigma_l \quad (2.6)$$

$$\bar{l} = \frac{1}{n} \sum_{j=i}^n l_j \quad (2.7)$$

$$l_j = \sqrt{(x_j - \bar{x})^2 + (y_j - \bar{y})^2 + (z_j - \bar{z})^2} \quad (2.8)$$

Concernant les déviations angulaires, la norme ISO 9283 définit la répétabilité comme $\pm 3\sigma$. Les angles α , β et γ sont respectivement les angles de roulis, tangage et lacet.

$$RP_\alpha = \pm 3\sigma_\alpha \quad (2.9)$$

$$RP_\beta = \pm 3\sigma_\beta \quad (2.10)$$

$$RP_\gamma = \pm 3\sigma_\gamma \quad (2.11)$$

2.4.4.2 Exactitude de pose

Pour le test d'exactitude de pose, les conditions d'essai sont les mêmes que pour le test de répétabilité. Les mesures sont comparées avec la valeur commandée afin de déterminer la déviation. L'évaluation de l'exactitude de pose AP est déterminée comme l'écart euclidien par rapport à la moyenne des mesures pour un même point d'évaluation. Cette équation est

présentée en 2.12. x_c, y_c, z_c sont les coordonnées commandées du point et $\bar{x}, \bar{y}$ et $\bar{z}$ la moyenne des coordonnées des mesures.

$$AP = \sqrt{(\bar{x} - x_c)^2 + (\bar{y} - y_c)^2 + (\bar{z} - z_c)^2} \quad (2.12)$$

Concernant l'évaluation angulaire, les angles de roulis, tangage et lacet moyens ($\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$) sont comparés aux angles commandés (a_c, b_c, c_c) comme le montrent les équations 2.13 à 2.15.

$$AP_\alpha = \bar{a} - a_c \quad (2.13)$$

$$AP_\beta = \bar{b} - b_c \quad (2.14)$$

$$AP_\gamma = \bar{c} - c_c \quad (2.15)$$

2.4.4.3 Cycle de chauffage

En plus des conditions environnementales, de charge nominale et de vitesse, la norme ISO9283 :1998 suggère un cycle de chauffage avant la prise de mesure. La dérive thermique est un facteur à considérer pour l'évaluation des performances des robots industriels. Cependant, aucun temps de chauffage n'est suggéré en raison de la dépendance au modèle de robot évalué.

Il a été démontré que la température des joints se stabilise après un certain temps lors d'un cycle de chauffage (Vocetka *et al.*, 2021). L'atteinte de la stabilisation thermique est donc un prérequis aux tests expérimentaux afin de mitiger les effets d'expansion thermique.

2.5 Concepts mathématiques pertinents

De nombreux concepts mathématiques sont importants pour la réalisation de ce travail de recherche. Cependant, à des fins de concision, seuls quelques concepts centraux à la méthodologie et au traitement des données sont abordés. En ce sens, ce sous-chapitre présente les matrices de transformations homogènes et les multiples façons de décrire un changement de référentiel, comme les angles d'Euler et les quaternions, ainsi que l'algorithme de Kabsch, qui est particulièrement utilisé en robotique et en métrologie afin de déterminer la transformation rigide entre deux séries de points identiques prises par des instruments différents.

2.5.1 Matrice de transformation homogène

Dans de nombreuses applications, il est souvent nécessaire de manipuler des coordonnées afin de les exprimer dans un référentiel différent. Ces changements de référentiel permettent l'interprétation des données par d'autres systèmes. Par exemple, pour qu'un robot manipulateur utilise des données provenant d'un traceur laser, un moyen mathématique doit être défini pour faire le lien entre le système de coordonnées spatiales du contrôleur du robot et celui de l'appareil de mesure externe. Cet outil mathématique est la matrice de transformation homogène. Ces matrices sont utilisées dans de nombreux domaines comme la robotique, la métrologie et les graphiques par ordinateur.

La matrice de transformation homogène $T_{4 \times 4}$ permet de transformer des vecteurs ou des coordonnées d'un système de coordonnées à un autre. Elle permet d'inclure à la fois une rotation et une translation de repère.

L'équation 2.16 décrit la matrice de transformation homogène qui permet de transformer des coordonnées exprimées dans un référentiel $\{B\}$ et de les exprimer dans le référentiel $\{A\}$.

$$T_B^A = \begin{bmatrix} R_B^A & P_{B_{org}}^A \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

où :

- R_B^A est la matrice de rotation décrivant l'orientation d'un référentiel $\{B\}$ par rapport à un référentiel $\{A\}$.
- $P_{B_{org}}^A$ est le vecteur décrivant l'origine du référentiel $\{B\}$ exprimé dans $\{A\}$.

Afin d'exprimer des coordonnées dans un autre référentiel, il suffit de multiplier le vecteur par la matrice de transformation, comme le montre l'équation 2.17. Le 1 supplémentaire est un facteur d'échelle qui permet la multiplication par une matrice 4×4 .

$$P^A = T_B^A P^B \quad (2.17)$$

La matrice de rotation R peut être construite à partir des vecteurs unitaires définissant un repère lorsqu'ils sont projetés dans un autre par des produits scalaires. L'équation 2.18 montre comment construire une matrice de rotation qui décrit l'orientation du repère $\{B\}$ par rapport au repère $\{A\}$ (Craig, 2005).

$$R_B^A = \begin{bmatrix} \hat{X}_B^A & \hat{Y}_B^A & \hat{Z}_B^A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{X}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{X}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{X}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Y}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Y}_A \\ \hat{X}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Y}_B \cdot \hat{Z}_A & \hat{Z}_B \cdot \hat{Z}_A \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

En pratique, il est souvent plus simple de construire les matrices de rotation par des rotations élémentaires autour d'un seul axe. Les trois équations suivantes montrent les rotations élémentaires autour de chacun des axes. Ces matrices de rotation peuvent être multipliées entre elles pour construire des rotations plus complexes. L'ordre des opérations est important lorsqu'on multiplie des matrices de rotation.

$$R_X(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ 0 & \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$R_Y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$R_Z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Deux propriétés importantes des matrices de transformation homogènes permettent de simplifier le traitement de plusieurs changements de référentiel consécutifs. Ces matrices peuvent être multipliées entre elles afin de réaliser des changements de repères consécutifs, et l'inverse d'une matrice de transformation décrit le changement de repère dans le sens opposé. La figure 2.10 illustre un exemple d'application pour un changement de repères consécutifs appliqué à un robot sériel.

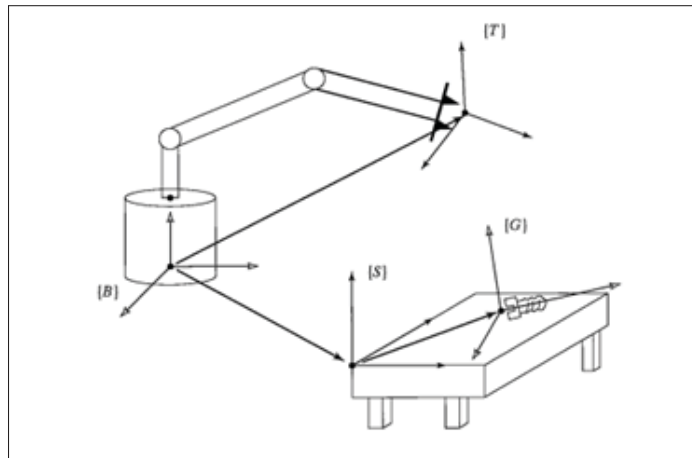


Figure 2.10 Un exemple de changement de référentiel en chaîne utilisant les matrices de transformation
Tirée de Craig (2005)

Dans cet exemple, la matrice de transformation homogène permettant d'exprimer des coordonnées dans le référentiel $\{T\}$ à partir de coordonnées liées au référentiel $\{G\}$ peut être construite ainsi :

$$T_G^T = \left(T_T^B\right)^{-1} T_S^B T_G^S \quad (2.22)$$

2.5.2 Angles d'Euler

Les angles d'Euler sont une autre manière de représenter l'orientation d'un repère par rapport à un autre. Avec les angles d'Euler, il est possible d'exprimer l'orientation d'un repère par rapport à un autre avec seulement 3 angles. Bien que cette manière de communiquer l'orientation soit plus intuitive, elle vient avec certaines nuances.

D'abord, lorsqu'on utilise de l'information provenant d'angles d'Euler, la convention utilisée est importante. En fait, dépendamment de la convention utilisée, les 3 angles d'Euler ne représentent pas les mêmes rotations. Il existe 12 conventions d'Euler (Z-Y-X, X-Y-Z, Z-X-Z, etc.) et la majorité des erreurs d'utilisation des angles d'Euler viennent d'une mauvaise interprétation entre différentes conventions utilisées.

Les angles peuvent également être interprétés de manière intrinsèque (rotation autour d'un repère mobile) ou de manière extrinsèque (rotation autour du repère fixe).

L'équation 2.23 permet de reconstituer une matrice de rotation à partir des angles d'Euler de convention Z-Y-X intrinsèque, alors que l'équation 2.24 permet de reconstituer la même matrice à partir des angles extrinsèques. Une séquence extrinsèque $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ est mathématiquement équivalente à une séquence intrinsèque $Z \rightarrow Y \rightarrow X$ avec les angles appliqués dans l'ordre inverse.

$$R_B^A = R_{x''}(\gamma) R_{y'}(\beta) R_z(\alpha) \quad (2.23)$$

$$R_B^A = R_x(\gamma) R_y(\beta) R_z(\alpha) \quad (2.24)$$

2.5.3 Quaternions

Les quaternions sont une extension des nombres complexes, utilisés principalement pour représenter les rotations en 3D de façon stable et efficace. Ils sont donc des outils mathématiques permettant de décrire l'orientation d'un repère par rapport à un autre. Un quaternion est en fait un vecteur de $\mathbb{R}^4$ ayant une composante scalaire et trois composantes imaginaires, comme le montre l'équation 2.25.

$$q = \underbrace{w}_{\text{scalaire}} + \underbrace{xi + yj + zk}_{\text{partie imaginaire}} \in \mathbb{R}^4 \quad (2.25)$$

En raison des composantes imaginaires des quaternions, ils sont non commutatifs et permettent de représenter des rotations consécutives complexes. L'équation 2.26 montre comment encoder une rotation autour d'un axe u . Les quaternions utilisés pour encoder la rotation sont unitaires.

$$q = \cos \frac{\theta}{2} + (u_x i + u_y j + u_z k) \sin \frac{\theta}{2} \quad (2.26)$$

Des explications mathématiques détaillées sur l'utilisation des quaternions sont présentées dans Goldman (2011).

La nature algébrique des quaternions rend l'expression et le calcul des orientations plus simple et plus performant lorsque de nombreuses opérations sont nécessaires. Leur utilisation est très répandue en robotique, en aéronautique et dans le domaine des graphismes par ordinateur (González-Díaz, Badenes & García-Salcedo, 2024). Le second avantage des quaternions est qu'ils permettent d'éviter le phénomène du blocage du cadran (*gimbal lock*) qui se produit lorsque deux axes deviennent confondus lors de l'utilisation des angles d'Euler, causant ainsi la perte d'un degré de liberté dans certaines orientations (Goldman, 2011). Les quaternions évitent ce problème en permettant une interpolation fluide et continue entre deux orientations (González-Díaz *et al.*, 2024) (Goldman, 2011).

2.5.4 L'algorithme de Kabsch

L'algorithme de Kabsch permet de déterminer la matrice de rotation rigide optimale qui minimise l'erreur quadratique moyenne (RMSD) entre deux séries de points similaires dans l'espace (Braun, Lima, Pereira & Costa, 2024). L'idée est de déterminer une matrice de rotation entre deux repères à partir de la mesure d'un même artéfact exprimé dans chacun des repères. Cet algorithme a de nombreuses applications en robotique, en vision par ordinateur et en métrologie. Il est souvent utilisé dans des procédures de localisation ou de fusion de données spatiales.

L'algorithme fonctionne en centrant les deux séries de points, puis en utilisant la matrice de covariance et la décomposition en valeurs singulières (*SVD*) afin de déterminer la matrice de rotation optimale. L'algorithme 2.1 présente les étapes en détail.

Algorithme 2.1 Algorithme de Kabsch pour la rotation optimale

1 **Algorithme** : Algorithme de Kabsch

Input : Deux ensembles de points appariés $P = \{\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_N\}$ et $Q = \{\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_N\}$

Output : Matrice de rotation $\mathbf{R}$ et vecteur de translation $\mathbf{t}$ minimisant la RMSD

2 Calculer les centroïdes :

$$\mathbf{c}_P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{p}_i, \quad \mathbf{c}_Q = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{q}_i$$

3 Centrer les points :

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{p}_i - \mathbf{c}_P, \quad \mathbf{q}'_i = \mathbf{q}_i - \mathbf{c}_Q$$

4 Calculer la matrice de covariance :

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^N \mathbf{p}'_i \mathbf{q}'_i{}^T$$

5 Calculer la décomposition en valeurs singulières (SVD) de $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^T$$

6 Calculer la matrice de rotation :

$$\mathbf{R} = \mathbf{V} \mathbf{U}^T$$

7 **if** $\det(\mathbf{R}) < 0$ **then**

8 Corriger la réflexion :

$$\mathbf{V}' = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

9 Recalculer la rotation :

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}' \mathbf{U}^T$$

10 **end if**

11 Calculer le vecteur de translation :

$$\mathbf{t} = \mathbf{c}_Q - \mathbf{R} \mathbf{c}_P$$

12 **return** $\mathbf{R}, \mathbf{t}$

2.6 Synthèse du Chapitre 2

Les éléments présentés dans cette revue de la littérature contribuent tous, de près ou de loin, à la base de connaissances nécessaire pour réaliser ce projet de recherche et le situer dans son contexte.

D'abord, l'AAM, qui regroupe plusieurs sous-procédés, est un moyen démontré d'améliorer le processus d'assemblage pour les pièces de grande taille. Les exemples d'application dans la littérature semblent favoriser les robots sériels et le système de mesure iGPS pour leur grande flexibilité.

Ensuite, en parcourant les différentes technologies de MGE, on constate que l'iGPS est en effet l'instrument le mieux adapté aux procédés d'AAM en raison de sa nature décentralisée, de sa grande portée et de la possibilité de prendre plusieurs mesures en parallèle. L'incertitude de cet appareil n'est cependant pas tout à fait bien comprise.

Cela s'explique, entre autres, par le grand nombre de facteurs impliqués dans la chaîne de mesure de l'appareil, rendant la méthode de propagation de l'incertitude difficile à appliquer. En ce sens, des méthodes expérimentales sont à privilégier, comme la méthode de Monte-Carlo ou encore des méthodes fréquentistes d'évaluation de l'incertitude.

Les robots sériels sont des parties essentielles de nombreux systèmes d'AAM et ils contribuent directement à l'incertitude du procédé. Les robots sériels offrent une très grande répétabilité, mais une exactitude de pose moins performante. L'étalonnage est un procédé qui optimise le choix des paramètres du modèle cinématique et contribue à minimiser l'erreur d'exactitude de pose. En ce sens, la norme ISO 9283 :1998 présente des méthodes standardisées pour évaluer la répétabilité et l'exactitude de pose d'un robot sériel.

Finalement, certains concepts mathématiques essentiels à ce projet de recherche sont présentés, notamment les matrices de transformation et les différents moyens mathématiques de décrire un changement de référentiel dans l'espace.

CHAPITRE 3

DÉMARCHE DE TRAVAIL ET IMPORTANCE DES CONTRIBUTIONS

Dans ce troisième chapitre, un aperçu général de la méthodologie ainsi que de l'orientation prise par ce travail de recherche est présenté. Les contributions au domaine y sont également expliquées. À noter que l'évaluation de l'incertitude du procédé d'AAM n'avait encore jamais fait l'objet de travaux de recherche auparavant.

3.1 Méthodologie générale

La méthodologie générale de ce projet de recherche a débuté par la conception d'un artéfact destiné à imiter une pièce à assembler dans le processus d'AAM. Celui-ci est constitué d'une interface en aluminium fixée directement au poignet du robot à l'aide de vis, ainsi que d'une goupille d'alignement. Le corps de l'artéfact est un cube formé à partir d'un morceau d'extrusion d'aluminium sur lequel sont fixés des nids d'outillage. Ces nids servent à accueillir les sondes i5IS du système iGPS. L'interfaçage se fait grâce à une goupille d'alignement et à des aimants.

Par la suite, afin de réaliser un montage expérimental permettant d'évaluer la répétabilité du procédé, il est nécessaire de fermer la chaîne cinématique. Une procédure de localisation de la base du robot est alors proposée. Elle repose sur la récolte de plusieurs poses de l'artéfact et utilise la cinématique directe du robot pour estimer la position et l'orientation du repère du robot par rapport à l'appareil de mesure iGPS.

Avant de procéder aux mesures, le temps de chauffage requis pour atteindre la stabilité thermique du robot a été évalué. Pour ce faire, des mesures de température ont été relevées à intervalles réguliers sur les membrures du robot. Ce temps de chauffage a été déterminé pour un cycle identique au cube ISO9283 (voir 2.9), servant à la collecte des mesures.

Les mesures ainsi obtenues ont d'abord permis d'évaluer la répétabilité du procédé d'AAM à l'aide de l'équation de la répétabilité (équation 2.6) issue de la norme ISO9283. Les résultats de cette première évaluation sont présentés dans Babin *et al.* (2025). Dans un second temps,

un modèle de mesure plus représentatif de la répétabilité est proposé. La méthode fréquentiste d'évaluation de l'incertitude permet ensuite de quantifier l'intervalle de confiance sur la déviation par rapport à la moyenne (répétabilité) pour une même position commandée. Ce modèle considère les déviations Δx , Δy et Δz comme des variables aléatoires. La somme des déviations normalisées au carré suit donc une loi χ_3^2 . À partir de cette distribution, construite grâce aux mesures collectées, un intervalle de confiance élargi de 95% est déterminé. La validité de ce modèle est ensuite testée sur une seconde série de mesures.

En ce qui concerne l'évaluation de la précision du procédé, les mesures de position et d'orientation fournies par le système iGPS sont comparées à celles obtenues avec un traceur laser Leica AT960™. La mise en évidence d'une erreur systématique lors de cette première évaluation a conduit à la réalisation de tests de stabilité des mesures du système iGPS, à une comparaison de celui-ci avec d'autres appareils de mesure, ainsi qu'à des efforts visant à atténuer la flexion des membrures du robot.

Les détails spécifiques de la méthodologie sont discutés plus en profondeur au chapitre 4.

3.2 Pertinence des contributions

Les contributions notables de ce projet de recherche sont :

1. Le développement d'un banc d'essai permettant d'étudier le processus d'AAM ;
2. La proposition d'un modèle fréquentiste d'incertitude de répétabilité du procédé d'AAM utilisant un robot et un système iGPS ;
3. Une première évaluation de l'exactitude du procédé d'AAM, accompagnée d'une contribution à la compréhension des facteurs influençant cette précision ;
4. La proposition d'un temps de chauffage des sondes i5IS avant la collecte des mesures afin d'assurer leur stabilité.

3.2.1 Article de journal

L'article présenté dans le chapitre 4 constitue un calque de l'article soumis au journal *Measurement*. Il comporte une courte revue de la littérature, une méthodologie détaillée, ainsi que la présentation des résultats relatifs à la stabilité, à la répétabilité et à l'exactitude du procédé d'AAM. L'exactitude est évaluée par comparaison avec un traceur laser Leica AT60™.

3.2.2 Synthèse du chapitre 3

Pour la première fois, un banc de tests reproductible permettant d'évaluer la répétabilité et l'exactitude d'un procédé d'AAM est présenté. Grâce au banc d'essai proposé, un modèle fréquentiste de l'incertitude sur la position et l'orientation est établi à partir des mesures recueillies. Une enquête sur les facteurs influençant l'exactitude de pose du système a également été menée, aboutissant à la proposition d'un temps de chauffage optimal pour les sondes i5IS du système iGPS.

CHAPITRE 4

EXPERIMENTAL REPEATABILITY MODELING AND ACCURACY ASSEMENT OF A ROBOTIC MEASUREMENT-ASSISTED JIGLESS ASSEMBLY SYSTEM USING IGPS

William Babin^a, Souheil-Antoine Tahan^b, Ahmed Joubair^a

^a Department of automated production engineering, École de technologie supérieure,

^b Department of mechanical engineering, École de technologie supérieure,

1100 Notre-Dame W, Montréal, H3C 1K3, Qc, Canada

Article soumis pour publication au journal *Measurement*, décembre 2025

4.1 Introduction

4.1.1 Context and Motivation

In high-volume manufacturing of small to medium-sized parts, interchangeability relies on process capability and uncertainty analysis, enabling independent fabrication and automated assembly (Muelaner *et al.*, 2011). Conversely, low-volume production of large-scale parts—typical in aerospace, shipbuilding, and energy—faces challenges related to environmental effects, thermal expansion, and gravity-induced deformation, often requiring iterative fitting and skilled manual adjustment (Schmitt *et al.*, 2016a; Maropoulos *et al.*, 2014). Large components demand specialized equipment and safety procedures, increasing assembly costs. Traditional jig-based methods are costly, inflexible, and poorly suited to design changes or digital integration (Okpala *et al.*, 2024; Shi *et al.*, 2025; Fiedler *et al.*, 2024). According to the four drivers of efficient production (Fiedler *et al.*, 2024), their main limitations are : (i) Dependence on manual operations that hinder Industry 4.0 adoption (Drouot *et al.*, 2018; Vaidya, Ambad & Bhosle, 2018; Maropoulos *et al.*, 2014); (ii) Rework and part-to-part fitting, preventing one-way assemblies (Maropoulos *et al.*, 2014); (iii) Late deviation detection at inspection, emphasizing the need for real-time monitoring (Drouot *et al.*, 2018; Maropoulos *et al.*, 2014); (iv) Product-specific

tooling, while modular or multipurpose systems lower costs, support design changes, and shorten lead times (Maropoulos *et al.*, 2014; Shi *et al.*, 2025; Bejlegaard, ElMaraghy, Brunoe, Andersen & Nielsen, 2018).

4.1.2 Measurement-Assisted Assembly (MAA) as a Solution

Measurement-Assisted Assembly (MAA) integrates metrology into closed-loop control to support high-precision assembly (Maropoulos *et al.*, 2014). Originally developed for aircraft assembly, MAA now applies to various large-scale, complex assemblies, enabling one-way operations and reducing manual fitting (Muelaner *et al.*, 2011; Drouot *et al.*, 2018). Implementations range from flexible jigs to industrial robots, valued for their adaptability (Fiedler *et al.*, 2024), and are increasingly combined with augmented reality (AR) to assist operators (Zhang *et al.*, 2025; Fang *et al.*, 2023). Most rely on large-scale metrology (LSM) tools such as laser trackers or iGPS systems (Maropoulos *et al.*, 2014). Despite their advantages, MAA systems face a key challenge : quantifying positional and orientational uncertainty of assembled parts. Unlike jig-based setups—where calibrated fixtures and R&R studies define positioning uncertainty—MAA involves complex, interdependent elements (robots, actuators, metrology, operators, and environment), complicating uncertainty evaluation. Classical propagation methods fail to capture nonlinearities and correlated errors, requiring alternative strategies. Prior studies explored experimental and probabilistic approaches, including measurement-assisted aircraft alignment (Zhehan, Fuzhou & Xiaoqing, 2013), Monte Carlo-based uncertainty frameworks for laser tracker systems (Gai *et al.*, 2020), and probabilistic modelling for magnet alignment (Doytchinov *et al.*, 2018). These works highlight the need for experimental and statistical methods to assess uncertainty in MAA systems.

4.1.3 Objective

This study addresses the central question : **What is the inherent uncertainty in the position and orientation of a component assembled using an iGPS-guided MAA system ?** To answer this, a laboratory-scale testbed is developed, comprising a 6-DOF industrial robot, an iGPS system

as an external encoder, and an artifact representing the assembly component. An experimental methodology is implemented to evaluate repeatability and accuracy, providing quantitative performance data. A robust model of repeatability uncertainty at the 95% confidence level is developed, and process accuracy is assessed through comparison with a Leica AT960 laser tracker, evaluating the iGPS system relative to established metrology tools.

4.1.4 Assumptions

Experiments were conducted in a controlled laboratory ($20 \pm 0.5^\circ\text{C}$) using an ABB IRB120TM robot and a Nikon-iGPS network with six transmitters within a $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ workspace. The study assumes a rigid test artifact, standard robot kinematics without advanced calibration, and static positioning only, neglecting deformation and dynamic effects. The paper is organized as follows : Section 4.2 reviews related work ; Section 4.3 details the experimental setup and data collection ; Section 4.4 presents results, the repeatability model, and MAA accuracy ; Sections 4.5 and 4.6 discuss findings and future directions.

4.2 Background

4.2.1 Large-Scale Metrology (LSM) and iGPS

LSM tools provide critical feedback for MAA systems, including CMMs, laser trackers, photogrammetry, laser scanners, and indoor GPS (iGPS). iGPS is often preferred for MAA due to its decentralized architecture, scalability, real-time feedback, and seamless robot integration. It operates on theodolite-based multilateration, using multiple transmitters emitting rotating laser planes with unique frequency signatures (40–50 Hz) (Mastrogiacomo *et al.*, 2011). Receivers with photoelectric sensors detect these planes and compute azimuth and elevation angles relative to several transmitters, enabling 3D position calculation (Franceschini *et al.*, 2011; Miah *et al.*, 2023). Additional transmitters extend coverage (up to 55 m radius), and accuracy improves with line-of-sight to four or more transmitters. A single iGPS network can track up to 25 receivers simultaneously (7D Kinematic Metrology, s.d.; Miah *et al.*, 2023). For further technical

details, see (Muelaner *et al.*, 2009; Wang, Mastrogiacomo, Franceschini & Maropoulos, 2011; Mastrogiacomo *et al.*, 2011).

4.2.2 iGPS Metrological Performance

iGPS specifications report static 3D accuracy of 0.15 mm, velocity-dependent accuracy of 0.25 mm (≤ 0.5 m/s), and angular accuracy of 0.90 mrad within a 10×20 m workspace using eight transmitters (95% confidence) (7D Kinematic Metrology, s.d.). Independent studies confirm 0.1–0.3 mm static accuracy (Zhou, An, Li & Zhu, 2013; Du, Chen & Tang, 2012; Landeta, Sutério & Trabasso, 2012) and <0.5 mm dynamic accuracy for speeds up to 1 m/s (Depenthal, 2010). Advanced corrections can reach 0.1 mm at low speeds (Han, Dunker, Trostmann & Xu, 2024a). Performance depends on calibration, workspace layout, temperature, vibrations, and surface reflectivity (Norman *et al.*, 2013), underscoring the need for experimental validation in industrial MAA contexts.

4.2.3 iGPS in MAA Systems

iGPS has been successfully applied in MAA across multiple industries. In automotive assembly, robots with iGPS receivers have positioned truck cabins with 0.3 mm accuracy (Schmitt *et al.*, 2016b; Storm *et al.*, 2017; Norman *et al.*, 2013), while shipbuilding studies show hull assembly within geometric tolerances (de Campos Porath *et al.*, 2019). Experimental validation reports manual positioning repeatability of 0.01–0.16 mm (Heiden & Porath, 2016), and real-time dynamic error compensation further improves large-scale assembly accuracy (Shi, Sun, Du & Liu, 2023). These results indicate that iGPS-based MAA is potentially viable for high-precision assembly (Fiedler *et al.*, 2024), though performance depends on application, environment, and system configuration, emphasizing the need for systematic uncertainty characterization.

4.2.4 Uncertainty Estimation in MAA Systems

A major challenge in MAA systems is quantifying part-pose uncertainty. Complex interactions among measurement equipment, algorithms, operators, and environmental conditions make analytical propagation impractical (Kaufmann, Effenberger & Huber, 2021). Relying on equipment specifications (e.g., Maximum Permissible Error) often underestimates actual uncertainties, which can be up to 15× higher in large-scale assemblies (Doytchinov *et al.*, 2018). Nonlinearities, correlated errors, and thermal effects necessitate probabilistic modeling and experimental validation. Hybrid approaches combining analytical models with empirical testing are required for reliable uncertainty estimation. Existing studies focus on individual components, highlighting the need for comprehensive frameworks to quantify repeatability and accuracy under realistic conditions. Previous work (Babin *et al.*, 2025) evaluated MAA repeatability using five planar test positions and modeled overall deviation as isotropic, assuming a spherical normal distribution, without considering individual Cartesian contributions. This study improves upon that by modeling deviations along each axis (X , Y , Z) as independent normal variables, with total positional deviation squared represented by a χ^2_3 distribution. Accuracy is assessed by comparing MAA-assembled positions with a high-precision laser tracker (Leica AT960). This approach provides a statistically rigorous, comprehensive method for characterizing MAA system repeatability and accuracy using iGPS as an external encoder.

4.3 Methods

4.3.1 System Description

The experimental setup reproduces a laboratory-scale MAA system. It comprises an IRB120™ six-degree-of-freedom industrial robot for part manipulation, an iGPS measurement system serving as an external encoder, and a machined artifact representing the workpiece. A granite table defines the reference coordinate system through probing with the i6 measurement probe, which is integrated into the iGPS system. To ensure stability and minimize vibrations, the robot

is mounted on a steel plate. The components of the experimental setup are shown in Figure 4.1 while they layout use in the metrology lab are shown in Figure 4.2

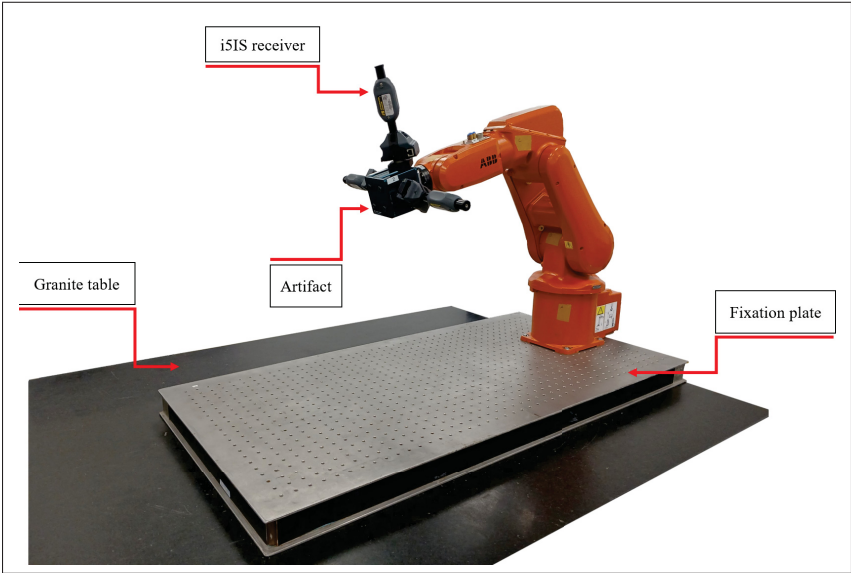


Figure 4.1 Experimental setup description

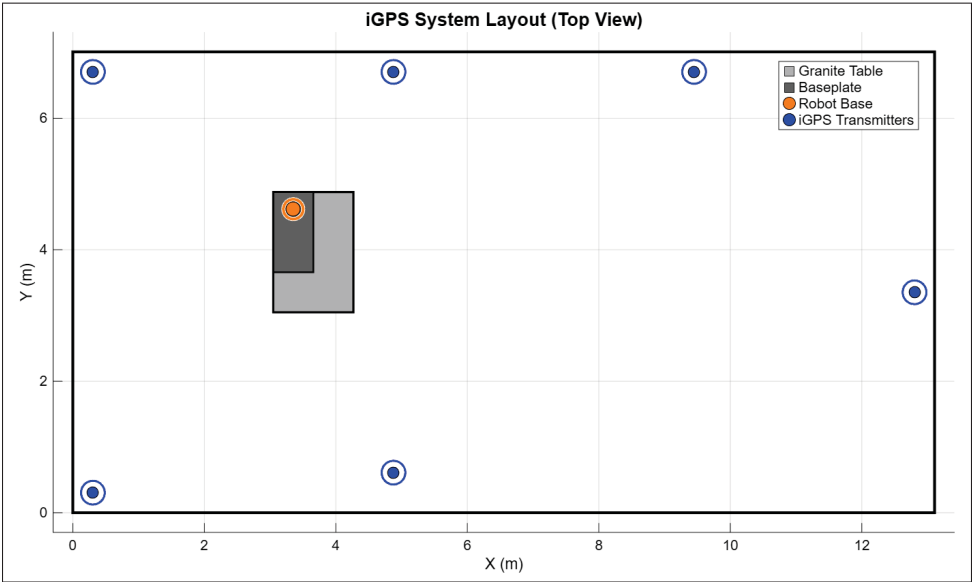


Figure 4.2 Experimental layout

To reproduce the MAA system, a relationship must be established between the commanded robot pose, expressed in the robot's $\{\text{Base}\}$ coordinate frame, and the $\{\text{iGPS}\}$ reference frame. This requires forming a closed kinematic chain. Figure 4.3 illustrates the reference frames and the corresponding transformations. The $\{\text{Artifact}\}$ frame represents the measured artifact and is defined relative to the $\{\text{iGPS}\}$ frame, which is established by probing the granite corner. The $\{\text{Flange}\}$ frame corresponds to the robot flange pose relative to the $\{\text{Base}\}$ frame.

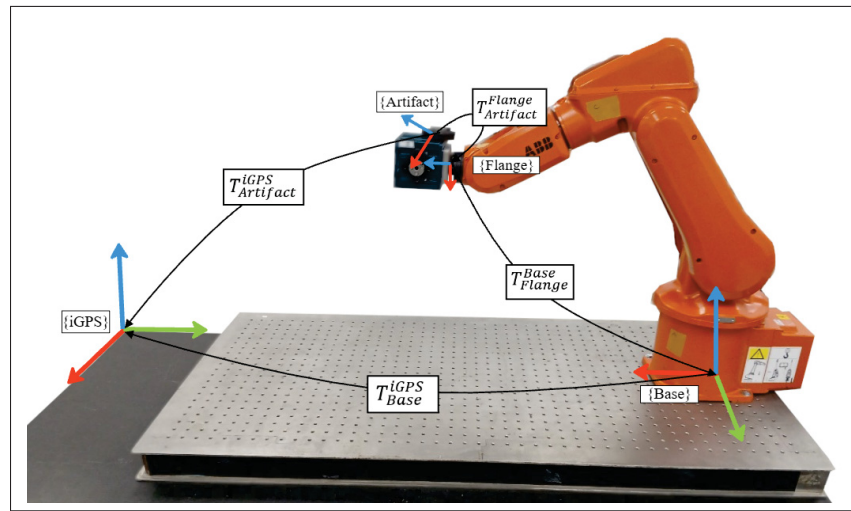


Figure 4.3 The kinematic chain

By determining each 4×4 homogeneous transformation matrix in the closed kinematic chain, the desired artifact pose in the global $\{\text{iGPS}\}$ reference frame can be converted into an equivalent goal pose expressed in the robot's $\{\text{Base}\}$ frame and subsequently sent to the robot controller. The proposed method defines a mathematical procedure that uses three measured points on the artifact to determine the transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{iGPS}}$. A CMM inspection of the artifact establishes the static transformation between the artifact and the robot flange, $\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{Flange}}$. The matrix $\mathbf{T}_{\text{Flange}}^{\text{Base}}$ corresponds to the commanded flange pose expressed in the robot's base frame. Finally, by collecting data from known $\{\text{Artifact}\}$ poses—obtained from commanded $\{\text{Flange}\}$ poses—and comparing them with measurements expressed in the $\{\text{iGPS}\}$ frame, the transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{Base}}^{\text{iGPS}}$ can be identified.

4.3.1.1 Artifact Design

The artifact consists of an aluminum extrusion cube with three tooling nests that accommodate i5IS receivers equipped with 1/4" diameter pins. Each tooling nest includes recessed magnets to minimize probe movement and to enable operation with the receivers oriented downward. A machined interface allows attachment to the IRB120™ flange. The tooling nests are offset toward the flange to position the center of mass closer to the support, thereby reducing flexion. In addition, they are positioned such that their relative Euclidean distances differ, thereby facilitating data processing. The developed artifact is shown in Figure 4.4.

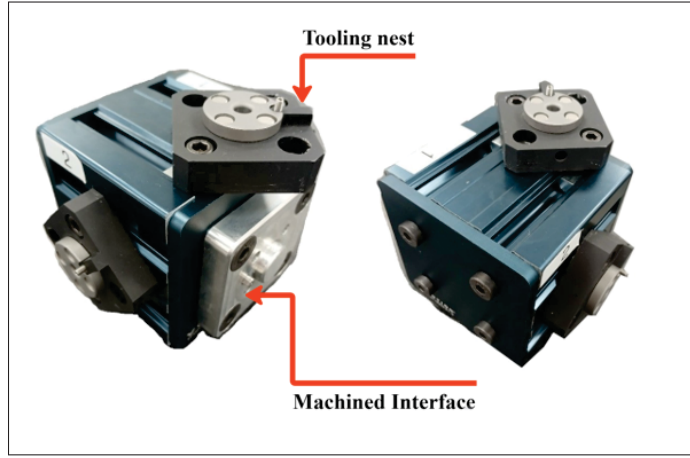


Figure 4.4 The designed artifact

Using three probe points on the artifact, the local coordinate frame $\{\text{Artifact}\}$ is defined with respect to the global measurement frame $\{\text{iGPS}\}$. Let $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3 \in \mathbb{R}^3$ be three non-collinear points measured on the artifact. The origin of the frame is located at $\mathbf{P}_1$. The $\hat{\mathbf{x}}$ axis is defined as the normalized vector from $\mathbf{P}_1$ to $\mathbf{P}_2$, while the $\hat{\mathbf{z}}$ axis is obtained as the normalized vector orthogonal to the plane defined by $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$, and $\mathbf{P}_3$. The $\hat{\mathbf{y}}$ axis completes the right-handed system according to $\hat{\mathbf{y}} = \hat{\mathbf{z}} \times \hat{\mathbf{x}}$. The rotation matrix $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ describing the orientation of the $\{\text{Artifact}\}$ frame relative to $\{\text{iGPS}\}$ is therefore given by $\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}} & \hat{\mathbf{y}} & \hat{\mathbf{z}} \end{bmatrix}$. The full homogeneous transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{iGPS}} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ is given by :

$$\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{iGPS}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{0}^\top & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Figure 4.5a represents schematically the process to determine the artifact pose relative to the {iGPS} reference frame. To determine the transformation matrix between the {Artifact} and {Flange} frames, a CMM inspection of the designed artifact was conducted. A local frame was defined on the artifact following the same procedure described previously, while a second reference frame, aligned with the robot flange, was also probed. From these measurements, the transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{Flange}}$ can be extracted. PolyWorks Inspector™ was used to process the probing data and compute the transformation. Figure 4.5b shows the two probed reference frames on the artifact. In both figures, the X, Y, and Z axes are represented in red, green, and blue, respectively.

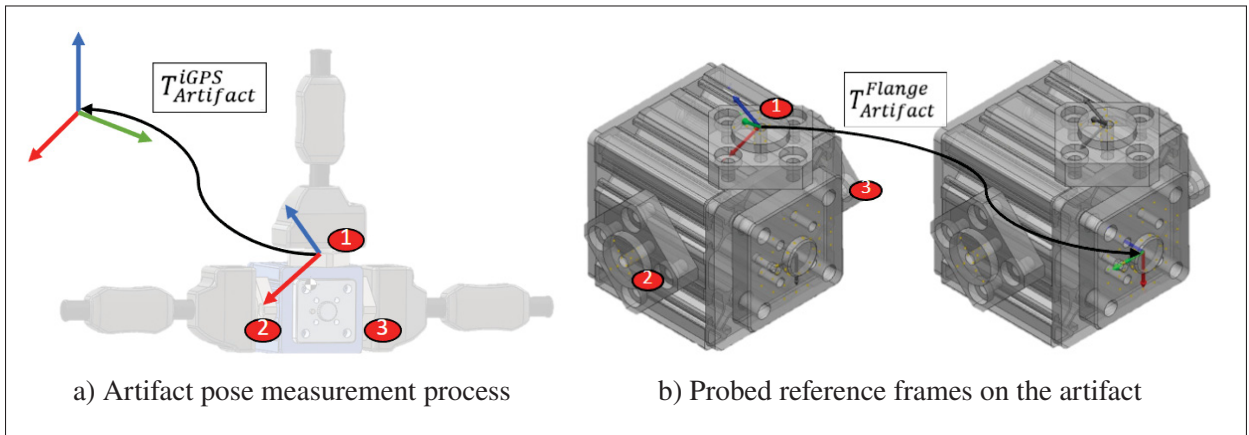


Figure 4.5 Determination of artifact pose and transformation to the robot flange.

4.3.2 iGPS-Robot Coordinate Frame Registration

The final step in establishing a functioning MAA testbed is determining the transformation matrix between the iGPS reference frame {iGPS} and the robot base frame {Base}. This coordinate frame registration defines the robot's position and orientation within the global measurement coordinate system. The transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{Base}}^{\text{iGPS}}$ was determined using the five positions

of the ISO 9283-inspired cube protocol (Figure 4.6a), with one measurement taken at each position. Since the transformation between coordinate frames is rigid and constant, each position theoretically yields the same transformation matrix. The transformation can be computed from the known kinematic chain and measured artifact positions using :

$$\mathbf{T}_{\text{Base}}^{\text{iGPS}} = \mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{iGPS}} \left(\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{Flange}} \right)^{-1} \left(\mathbf{T}_{\text{Flange}}^{\text{Base}} \right)^{-1} \quad (4.2)$$

where $\mathbf{T}_{\text{Flange}}^{\text{Base}}$ is obtained from robot forward kinematics, $\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{Flange}}$ represents the known artifact mounting transformation, and $\mathbf{T}_{\text{Artifact}}^{\text{iGPS}}$ is measured by the iGPS system. The final transformation matrix was computed using the median values of the translation components and Euler angles obtained from the five independent estimates to minimize the influence of measurement outliers. Preliminary analysis investigated whether performing multiple measurement cycles of the same five positions would reduce uncertainty in the transformation estimation ; however, no significant improvement was observed beyond the single-cycle protocol.

4.3.3 Data Gathering Process

Two measurement campaigns were conducted to evaluate the MAA system performance using test positions based on the ISO 9283 standard for assessing industrial robot performance. The first campaign focused on developing a repeatability model and assessing system accuracy relative to the nominal commanded artifact pose, as measured by the iGPS system. Five test positions describing a plane within a cube were used, with the robot flange maintained at constant orientation, normal to the robot base X-axis throughout all measurements. Following ISO 9283 recommendations, 30 measurement cycles ($n = 30$) were performed, yielding 150 data points total. A cube of 100 mm × 100 mm × 100 mm was positioned at the center of the robot workspace to ensure measurement symmetry. This relatively small cube size was selected to minimize robot compliance effects in extreme configurations and maintain unobstructed line-of-sight between iGPS transmitters and receivers. Trajectories were executed at low linear speed (10 mm/s) with complete stops at each position to ensure measurement stability. Figure 4.6a illustrates the five

commanded test points of the robot flange, expressed in the robot {Base} coordinate system. The second measurement campaign was conducted to validate the repeatability modeling method and compare MAA system positioning accuracy against reference measurements from a Leica AT960™ laser tracker. The test positions remained within the same cube boundaries; however, the artifact orientation was varied at each position to provide a more comprehensive assessment. Figure 4.6b shows the flange poses used for this validation campaign. The initially planned varied orientations were constrained by laboratory limitations, as some configurations would obstruct the line-of-sight between iGPS receivers and the minimum required four transmitters. A compromise orientation set was, therefore, implemented to maintain measurement capability.

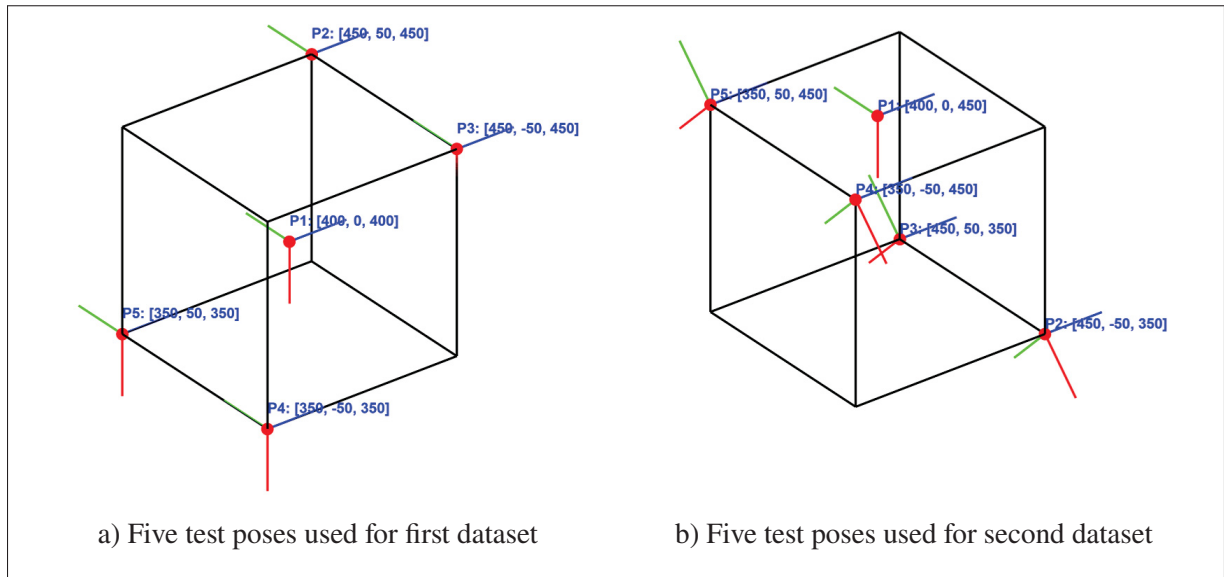


Figure 4.6 Test cube configurations for the two measurement campaigns

4.3.4 Robot Thermal Stability

Before gathering measurements, a thermal warm-up cycle was performed to mitigate thermal expansion effects that could influence robot positioning accuracy and repeatability. Thermal effects in robotic systems can cause dimensional changes in structural components, affecting repeatability and accuracy of positioning (Babin *et al.*, 2025). The warm-up procedure followed the approach described in (Babin *et al.*, 2025), using the same cube trajectory motion and speeds

described in Section 4.3.3. Temperature was monitored at four locations on the robot's surface at 5-minute intervals using a handheld infrared thermometer (REED ST-8835). Painter's tape was applied at measurement locations to ensure consistent surface emissivity for accurate temperature readings. The device was positioned approximately one meter from each measurement point during data collection. The monitored temperature locations are shown in Figure 4.7a, while the corresponding temperature evolution is presented in Figure 4.7b. Results indicate that the robot reached thermal equilibrium after approximately 160 minutes of continuous operation, starting from an ambient temperature state. Based on these results, all subsequent measurement campaigns included a minimum 160-minute warm-up period to ensure thermal stability before data collection. Respecting this warm-up period is essential to minimize thermal drift in the kinematic parameters prior to data collection. While a 160-minute warm-up period may present practical constraints in industrial settings, it ensures the thermal stability necessary for repeatable measurements in a research context.

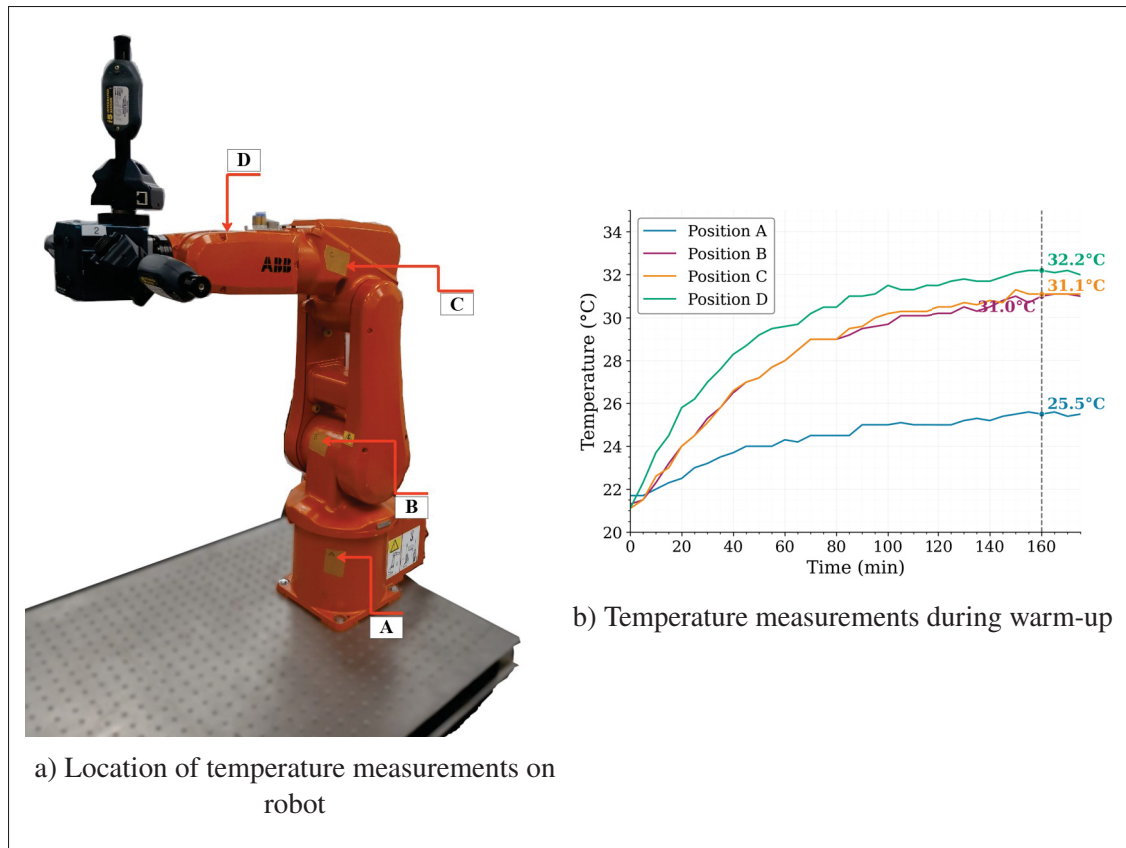


Figure 4.7 Robot temperature monitoring : sensor placement and thermal response during warm-up

4.3.5 iGPS System Warm-Up

The iGPS measurement system warm-up procedure incorporated the manufacturer recommended 1-hour warm-up time for transmitters into all test procedures. Initially, no warm-up period was defined for the iGPS receivers. However, measurement instabilities were observed at the beginning of data collection sessions, suggesting thermal effects in the receiver. To investigate this effect, an iGPS receiver was placed at a fixed location on the granite reference table, and its X, Y, and Z coordinates were recorded over time. Figure 4.8a shows the coordinate deviation from the mean starting from ambient temperature conditions, while Figure 4.8b presents the same measurements when a 30-minute receiver warm-up period was applied. In both cases, measurements were taken at approximately 45-second intervals. The results demonstrate

improved measurement stability with receiver warm-up, showing reduced coordinate drift and faster convergence to steady-state values. Based on these findings, a 30-minute warm-up period for iGPS receivers was incorporated into all subsequent test procedures, in addition to the standard transmitter warm-up time.

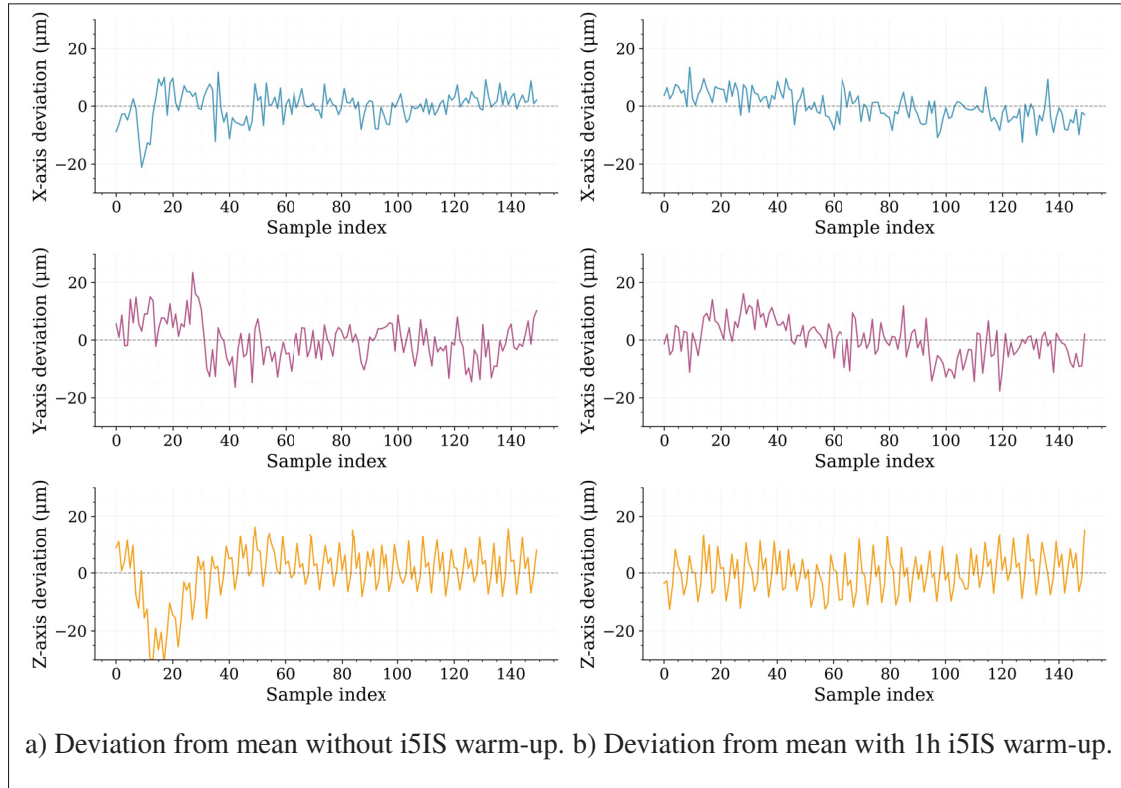


Figure 4.8 Effect of iGPS i5IS receiver warm-up on measurement stability

4.3.6 Repeatability Measurements and Modeling

The repeatability evaluation was carried out following an established warm-up procedure. First, a 160-minute warm-up cycle was performed to stabilize the robot temperature. In parallel, the iGPS transmitters underwent a 1-hour warm-up, and the iGPS receivers were activated 30 minutes prior to data collection. An initial measurement cycle was performed to establish the coordinate frame registration between the robot and iGPS systems, as described in Section ???. Following this initialization, positional coordinates from all iGPS receivers were recorded at each reference

point (P1 to P5 from Figure 4.6a) over 30 consecutive cycles, with each measurement averaged over 100 samples to reduce signal noise. The collected positional data were analyzed along the X , Y , and Z axes. For each axis, deviations from the mean position were computed, and the standard deviations σ_x , σ_y , and σ_z were estimated. Orientation errors were treated independently from both the positional errors and from each other, modeling the Euler angles as normally distributed variables. To combine the three positional axes into a single metric while accounting for different variances, the squared Mahalanobis distance was computed as :

$$d^2 = \left(\frac{x - \mu_x}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y - \mu_y}{\sigma_y} \right)^2 + \left(\frac{z - \mu_z}{\sigma_z} \right)^2 \quad (4.3)$$

where μ_x, μ_y, μ_z denote the mean positions along each axis. Under the assumption of independent normal deviations, d^2 follows a chi-squared distribution with three degrees of freedom (χ_3^2). This formulation allows the total positional deviation to be expressed in a dimensionless, statistically normalized form, enabling direct comparison to theoretical distributions. The 95% upper confidence bound for the total positional repeatability was then determined using the chi-squared distribution :

$$P \left(d^2 \leq \chi_{0.95,3}^2 \right) = 0.95 \quad (4.4)$$

where $\chi_{0.95,3}^2$ denotes the 95th percentile of the chi-squared distribution with three degrees of freedom. The validity of the chi-squared model was assessed by comparing the empirical cumulative distribution function (CDF) of the observed d^2 values against the theoretical χ_3^2 CDF. Good agreement between the empirical and theoretical distributions would confirm that the normality and independence assumptions are reasonable. The empirical coverage, defined as the fraction of measured Mahalanobis-normalized squared distances d^2 that fall below the 95th percentile threshold $\chi_{0.95,3}^2$, is reported in the results section. Finally, the repeatability model was validated using an independent set of test positions and orientations (Figure 4.6b).

4.3.7 Accuracy Evaluation

The process accuracy was evaluated following a procedure similar to the repeatability tests. Using the same data gathered previously for both datasets, the nominal commanded pose of the artifact was compared to the actual measured pose from the iGPS. The nominal commanded pose, representing the desired pose of the artifact, is expressed as $\mathbf{T}_{\text{artifact,nom}}^{\text{iGPS}}$. Its equation can be derived using the commanded flange poses in the robot controller :

$$\mathbf{T}_{\text{artifact,nom}}^{\text{iGPS}} = \mathbf{T}_{\text{base}}^{\text{iGPS}} \mathbf{T}_{\text{flange,cmd}}^{\text{base}} \mathbf{T}_{\text{artifact,nom}}^{\text{flange,cmd}} \quad (4.5)$$

The translation vector in $\mathbf{T}_{\text{artifact,nom}}^{\text{iGPS}}$ was compared to the measured transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{artifact,measured}}^{\text{iGPS}}$ in order to extract the deviations from nominal, namely ΔX , ΔY , and ΔZ . These deviations were evaluated for every point of the measurement cube, providing a detailed assessment of the process accuracy. In addition, the total deviation was computed as the Euclidean distance :

$$\Delta_{\text{total}} = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}. \quad (4.6)$$

Furthermore, in the case of the second data set (4.6b), additional measurements were recorded using a laser tracker with a reduced sample size of $n = 4$ cycles. This reduced sample size was necessitated by the time-intensive measurement procedure, as determining the artifact's position and orientation required probing the three tooling cup surfaces at each sample position to establish the artifact's reference frame relative to the tracker. Since the i5 receivers and the laser tracker reflectors differ in weight, a compensating mass composed of ball bearings was inserted inside the artifact cavity to equalize the overall weight and maintain a comparable center of gravity. This adjustment minimized differential flexion effects between the two measurement sets. To enable direct comparison between instruments, the transformation matrix between the {iGPS} reference frame (defined on the corner of the granite slab, see figure 4.1) and the AT960

reference frame {Laser} was determined. Five tooling cups identical to those on the artifact were fixed to the granite table to accommodate both i5IS receivers and the laser tracker reflector via 1/4" diameter tooling pins. Corresponding points were measured with both instruments (10 measurements per point), and the Kabsch algorithm was applied to compute the optimal rigid rotation matrix aligning the two reference frames. The transformation matrix was then constructed using the translation vector :

$$\mathbf{H} = \sum_{i=1}^N (\mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}})(\mathbf{q}_i - \bar{\mathbf{q}})^T \quad (4.7)$$

$$\mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T = \text{SVD}(\mathbf{H}) \quad (4.8)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{V}\mathbf{U}^T \quad (4.9)$$

$$\mathbf{t} = \bar{\mathbf{q}} - \mathbf{R}\bar{\mathbf{p}} \quad (4.10)$$

Here, $\mathbf{p}_i$ and $\mathbf{q}_i$ are the matched points measured by the iGPS and the laser tracker, respectively ; $\bar{\mathbf{p}}$ and $\bar{\mathbf{q}}$ are their centroids ; $\mathbf{R}$ is the optimal rotation matrix ; and $\mathbf{t}$ is the translation vector. The experimental setup incorporating the laser tracker and the probe points for the Kabsch algorithm is shown in figure 4.9. Once again, the results are expressed as deviations from nominal, with nominal poses defined in the same way as in equation 4.5. This methodology establishes a consistent and comparable framework for evaluating the positional accuracy of the MAA process. Additional tests designed to investigate systematic biases observed in the initial results are described in the Results section.

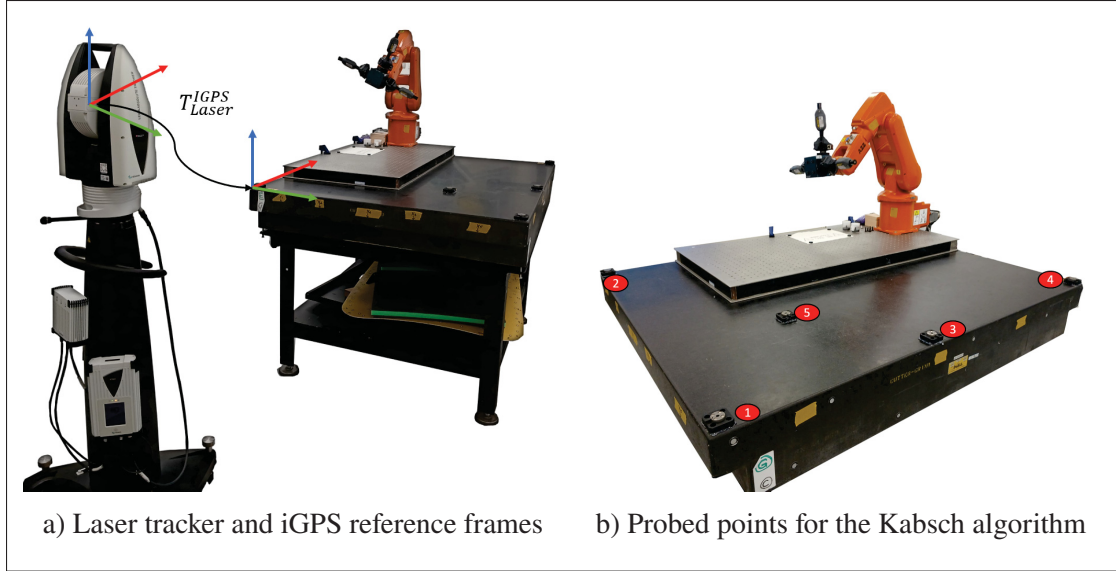


Figure 4.9 Determining the transformation matrix between the Laser and the iGPS using the Kabsch algorithm

4.4 Results

4.4.1 Repeatability and Model Validation

Repeatability was assessed using two independent datasets. For dataset 1 (Fig. 4.6a), five points were measured over $n = 30$ cycles, yielding 150 total measurements. Deviations along the X , Y , and Z axes were computed relative to the mean, and standard deviations σ_x , σ_y , and σ_z were used to model normal distributions for each axis. The resulting cumulative distribution functions (CDFs) are shown in Fig. 4.10. A χ_3^2 distribution was constructed from these deviations to represent the total squared positional deviation d^2 , and its CDF was compared with experimental data in Fig. 4.12a. Rotational deviations were analyzed using the Euler XYZ convention. The measured roll, pitch, and yaw deviations were modeled as independent normal distributions, with theoretical 95% ($\pm 2\sigma$) confidence bounds of $\pm 0.018^\circ$, $\pm 0.011^\circ$, and $\pm 0.022^\circ$, respectively. The empirical coverage, defined as the fraction of measured Mahalanobis-normalized squared distances d^2 that fall below the theoretical 95% χ_3^2 threshold, was 0.940 for dataset 1, confirming

good agreement between the model and experimental data. The repeatability model was validated with dataset 2 (Fig. 4.6b) following the same procedure. Normal distributions and CDFs of axis deviations (Fig. 4.11a) and the chi-squared d^2 CDF (Fig. 4.11b) were generated. Euler angle deviations yielded 95% ($\pm 2\sigma$) bounds of $\pm 0.029^\circ$ (roll), $\pm 0.021^\circ$ (pitch), and $\pm 0.019^\circ$ (yaw). The empirical coverage for dataset 2 was 0.967, again showing strong consistency with the theoretical model across different measurement conditions (Fig. 4.12). Table 4.1 summarizes the results across both datasets.

Tableau 4.1 Comparison of repeatability metrics and model results across datasets 1 and 2

Quantity	Dataset 1	Dataset 2
σ_x [μm]	4.47	8.84
σ_y [μm]	5.99	6.23
σ_z [μm]	4.05	11.83
σ_{roll} [$^\circ$]	0.01	0.01
σ_{pitch} [$^\circ$]	0.01	0.01
σ_{yaw} [$^\circ$]	0.01	0.01
Coverage (95% d^2)	0.940	0.967

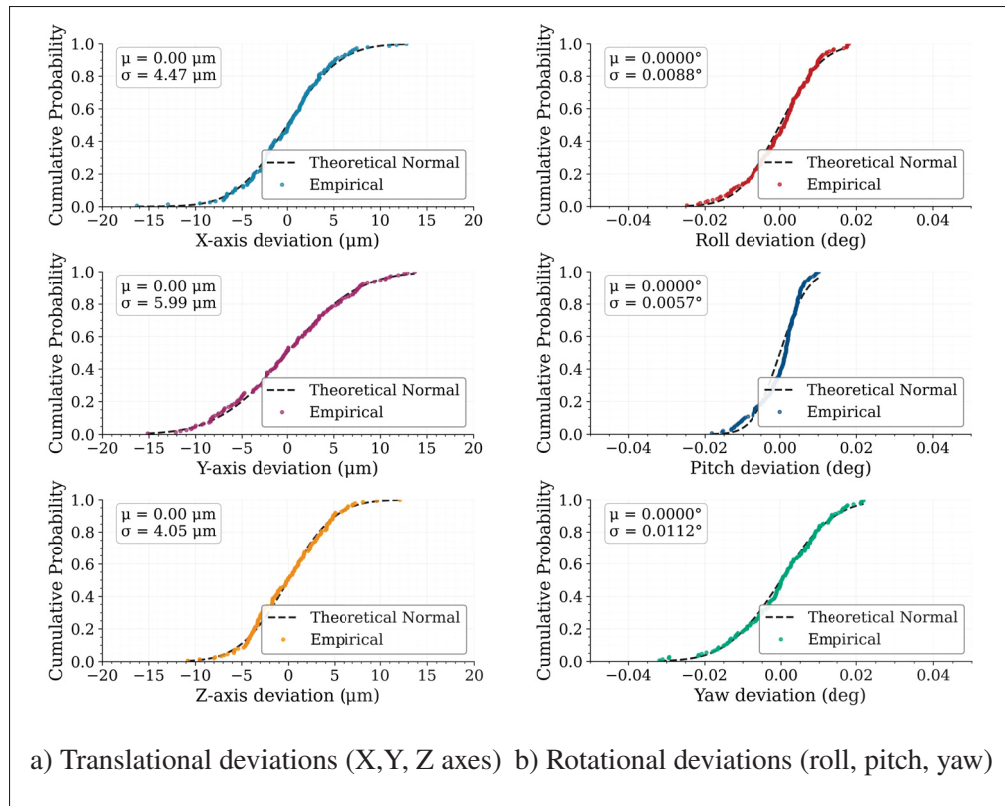


Figure 4.10 Cumulative distribution functions (CDFs) for dataset 1

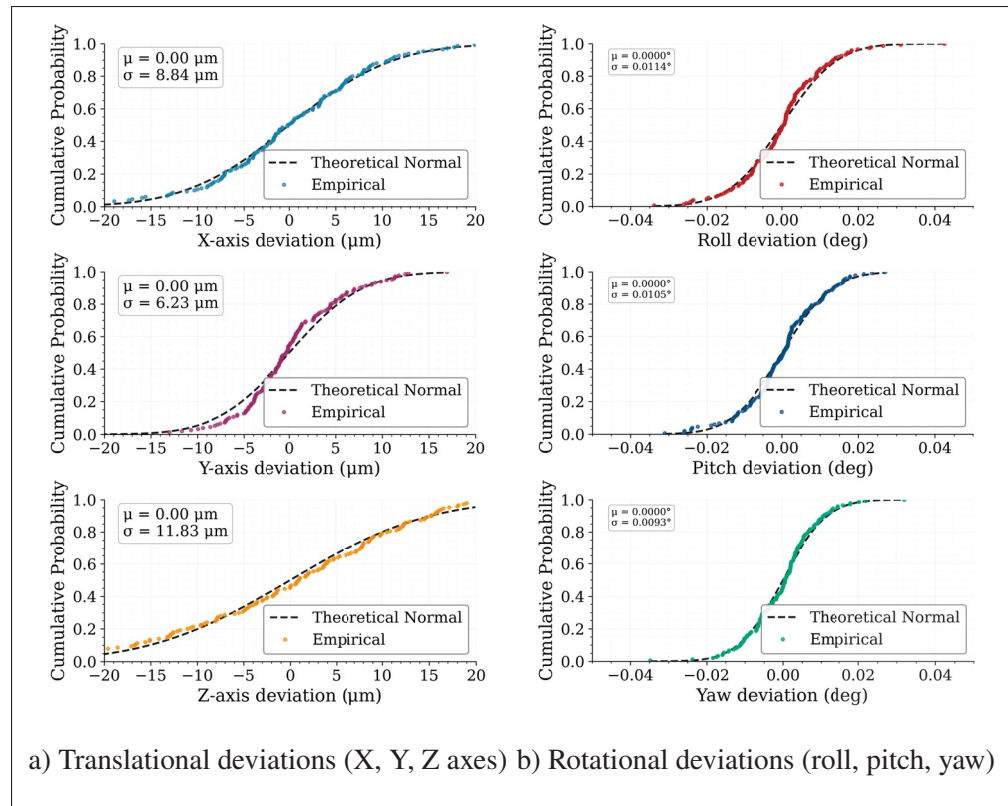


Figure 4.11 Cumulative distribution functions (CDFs) for dataset 2

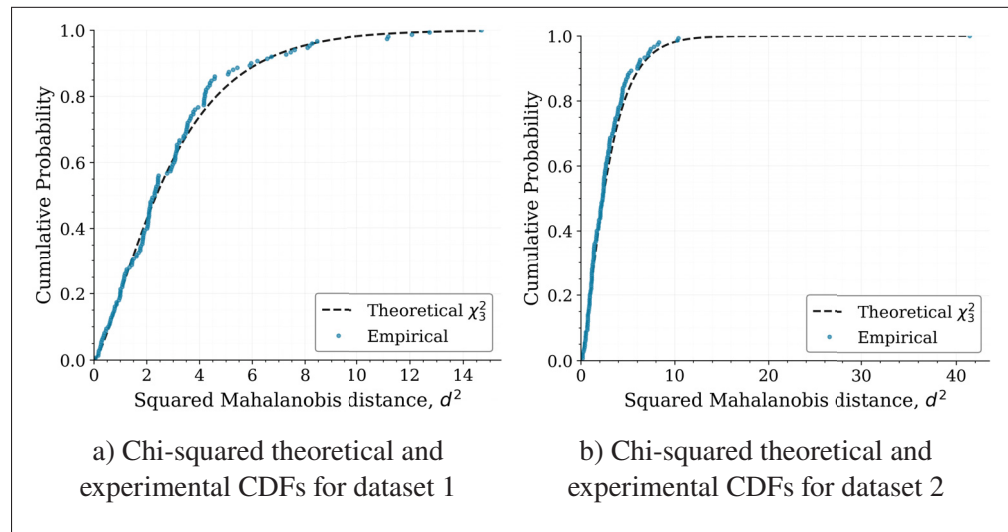


Figure 4.12 Comparison of chi-squared cumulative distribution functions (CDFs) for both datasets

4.4.2 Accuracy : Understanding the Systematic Bias

Figure 4.13 shows the deviations from nominal along the X, Y, and Z axes, as well as the total deviation, based on measurements from the sample points in Fig. 4.6a. Variations between points reveal a systematic bias. To investigate its origin, additional measurements were performed. Euclidean distances between the centers of the artifact's tooling nests were measured using the iGPS, a laser tracker (AT960), and a CMM as reference. The results, shown in Fig. 4.14, include 90 repetitions with the iGPS, 30 with the laser tracker, and 30 probing cycles with the CMM. L12, L13, and L23 denote distances between the three reference points on the artifact. To determine whether the bias originated from the iGPS or the robot, several tests were conducted. First, the artifact was fixed to the granite table, and a slight gravitational play observed in one iGPS receiver was manually corrected every ten measurements (Fig. 4.15a). The resulting distances (Fig. 4.15b) showed no significant effect. Similarly, neither changing the artifact's spatial position nor recalibrating the iGPS system affected the distances. However, when the i5IS receivers were permuted every ten measurements using the same setup, a measurable effect up to 0.2 mm was observed (Fig. 4.16). This indicates that the contact interface between the i5IS receivers and the tooling nests contributes to the systematic bias. Nonetheless, robot kinematic inaccuracies and structural flexion appear to account for the largest portion of the bias observed in Fig. 4.13.

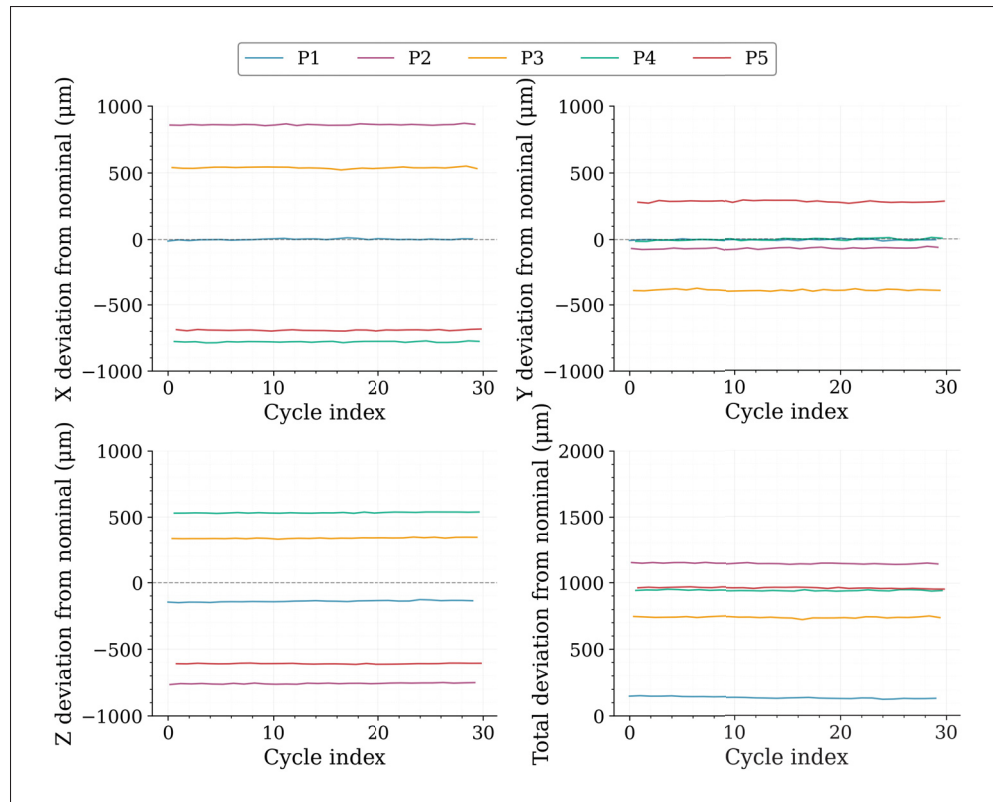


Figure 4.13 Deviation from nominal along the X, Y, and Z axes, as well as the total deviation

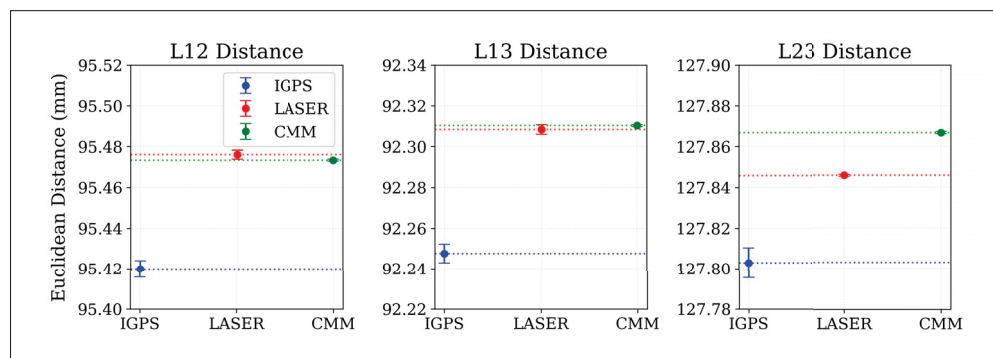


Figure 4.14 Euclidean distances between the 3 measurement points on the artifact measured with the iGPS system, laser tracker and a CMM

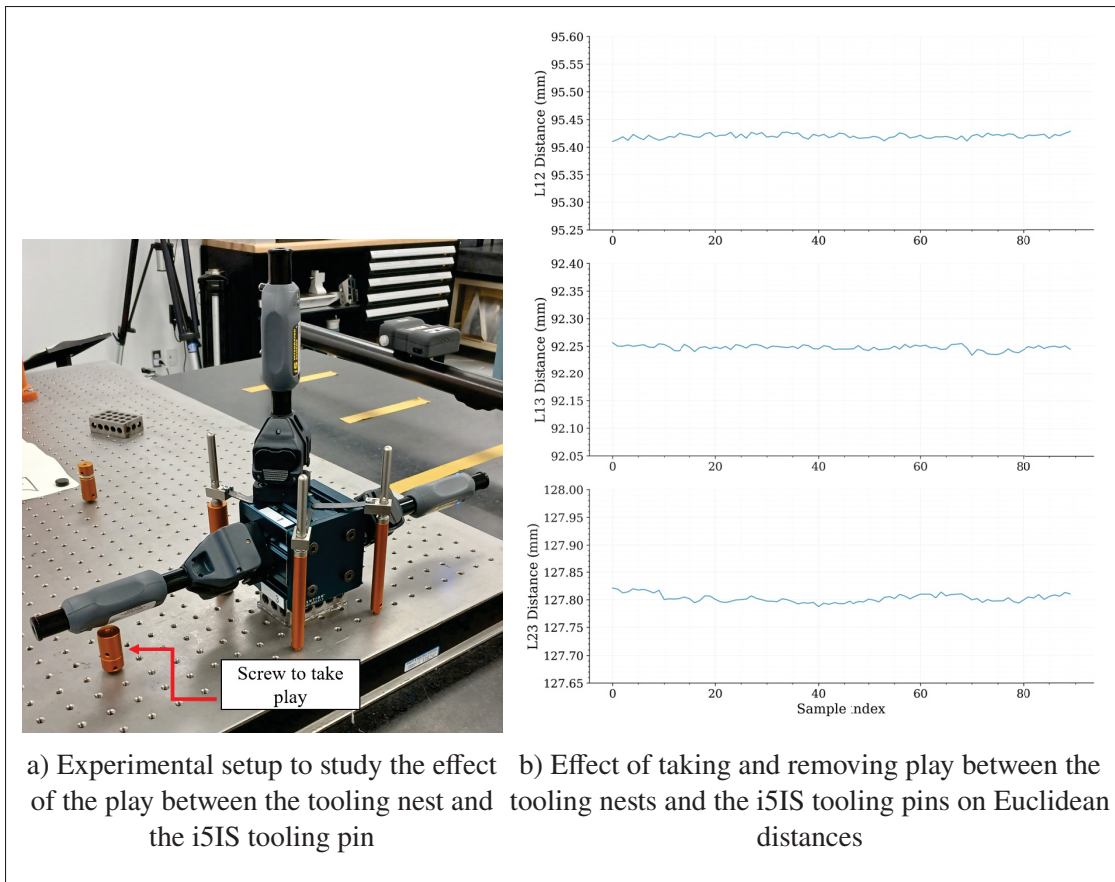


Figure 4.15 Experimental setup and effect of eliminating gravitational play intermittently.

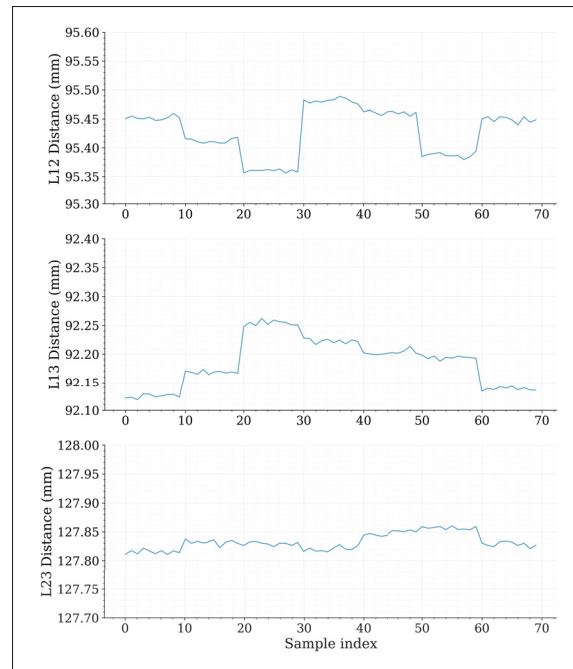


Figure 4.16 Euclidean distances while swapping i5IS positions every 10 measurements

4.4.3 Accuracy : Comparing with a Laser Tracker

The final test used the sample points in Fig. 4.6b, with results shown in Fig. 4.17. Thirty measurement cycles were performed with the iGPS and three with the laser tracker, the latter limited by the time required for manual operations. For the laser tracker, the tooling nest surface was first probed to define a reference plane before measuring the tooling pin hole using an SMR and pin adaptor. While slight differences were observed between the two systems, the overall deviations from nominal were comparable, indicating that the primary source of inaccuracy in the MAA process lies in the robot rather than the metrology system. The larger dispersion seen in the laser tracker data likely arises from operator influence and robot flexion during manual probing.

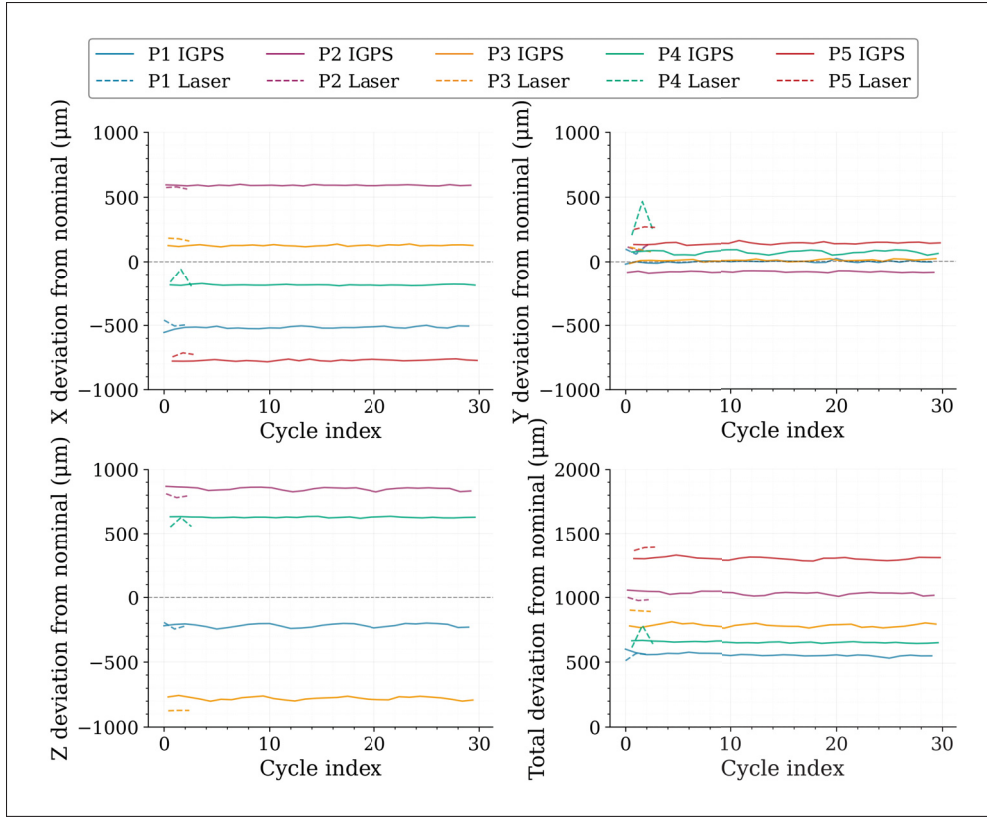


Figure 4.17 Deviation from nominal along the X, Y, and Z axes, as well as the total deviation, measured with iGPS and a laser tracker

4.5 Discussion

4.5.1 Repeatability

The proposed method provides a suitable framework for modeling the repeatability of the MAA process by using iGPS as an external encoder. Analysis of both datasets demonstrated that the approach can capture deviations along the X, Y, and Z axes and combine them into a global measure of repeatability. Modeling the squared deviations with a χ^2_3 distribution was found to be a reasonable strategy, with empirical coverage values of 0.94 and 0.967 confirming good agreement between the theoretical model and experimental observations. However, the repeatability models derived from different sample points were not reproducible across datasets. Each dataset yielded

its own model parameters (Table 4.1), indicating that the estimated distribution parameters are highly sensitive to the choice of underlying sample points. The method captures local repeatability characteristics but does not generalize directly to other regions of the workspace or to other target positions and orientations. A more robust approach would require modeling the repeatability parameters (σ_x , σ_y , σ_z) as functions of robot position and configuration; however, this would necessitate extensive data collection across the workspace. Additional limitations include the relatively small 100 mm test cube, which provides only partial coverage of the robot's workspace, and the assumption of a rigid artifact. Many industrial MAA applications involve large, flexible parts subject to thermal expansion and gravitational deformation, which would introduce additional variability not captured in this controlled laboratory study.

4.5.2 Accuracy and Error Sources

The experimental results demonstrated millimeter-scale deviations from the nominal positions, with systematic spatial deviations across the measurement points (Fig. 4.13, 4.17). Investigation of error sources through additional tests identified three main contributors: First, approximately 0.2 mm can be attributed to the iGPS measurement system, specifically the contact interface between the i5IS receivers and tooling nests, as demonstrated by receiver swap tests (Fig. 4.16). Second, the dominant contributor is the robot itself, with deviations of several millimeters arising from errors in the nominal kinematic model and structural flexion under payload. This interpretation is consistent with Slamani, Joubair & Bonev (2015), who reported positional deviations of approximately 2 mm for the IRB120 under comparable payload conditions (2.3 kg versus 2.7 kg in this study). Third, errors in the transformation matrix $\mathbf{T}_{\text{Base}}^{\text{iGPS}}$ contribute to systematic bias, which is affected by robot flexion during the localization procedure and iGPS measurement uncertainties. Comparison with laser tracker measurements (Fig. 4.17) produced similar deviations from nominal values, confirming that the primary source of inaccuracy lies in the robot rather than the metrology system. The greater dispersion observed in laser tracker data results from manual probing, which induces additional robot flexion during measurement.

4.5.3 Implications for Industrial Implementation

These findings reveal a fundamental characteristic of MAA systems using standard industrial robots : excellent repeatability (4–12 μm standard deviations, Table 4.1) coupled with limited accuracy (several millimeters) in the absence of kinematic calibration. This distinction has important practical implications. MAA processes using uncalibrated robots are well-suited for repositioning tasks, where the objective is to return a part to a previously measured position rather than to an absolute position defined by nominal coordinates. The demonstrated repeatability is sufficient for many semi-automated operations, including the repositioning of large parts after repair or machining, iterative assemblies requiring multiple positioning and adjustment cycles, and operations where relative precision between parts takes precedence over absolute position. Fully automated applications requiring precise absolute positioning necessitate kinematic calibration. When robots must position parts directly according to CAD coordinates—for example, grasping parts from storage racks for automated assembly—errors of several millimeters can compromise assembly and require line stoppage. For such high-accuracy MAA processes, robot kinematic calibration and error compensation strategies are indispensable. The experiments were conducted in a controlled laboratory environment (20 ± 0.5 °C) with a small test cube (100 mm) and a rigid artifact. Industrial conditions involving temperature variations, larger workspace areas, and flexible parts subject to thermal and gravitational deformation may introduce additional variability. Nonetheless, the results provide quantitative performance metrics for MAA systems and establish a clear framework for selecting appropriate implementation strategies based on application requirements.

4.6 Conclusion

This study presented a methodology for developing a repeatability model of a robotic MAA process using iGPS as external encoders. The proposed approach was shown to be valid within localized regions of the robot workspace, but the model parameters varied with test position. A more comprehensive dataset covering a larger portion of the workspace would be required to obtain a global repeatability model. Automating the data collection and processing would be a

practical step toward achieving this. Regarding process accuracy, the results suggest that most of the systematic error originates from robot kinematic calibration rather than the measurement system itself. Future work should therefore repeat the evaluation with proper robot calibration and error compensation while also exploring alternative artifact designs or probing tools to reduce manual measurement effects. Overall, MAA shows strong potential for applications where repeatability is critical, such as repositioning tasks in repair or assembly contexts. For high-accuracy applications, however, proper calibration and compensation methods are indispensable. Future research should extend the present methodology to application-level studies, enabling real-time process monitoring and quality assurance.

CHAPITRE 5

DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans ce cinquième chapitre, les résultats, la méthodologie et ses limitations ainsi que l'utilisation des procédés d'AAM robotisé en industrie sont discutés. Plus précisément, la validité de l'approche par distribution de χ^2 est analysée et des recommandations pour l'atteinte d'un modèle de répétabilité généralisable sont présentées. Ensuite, les sources d'erreur de l'exactitude du procédé étudié sont discutées et, finalement, la portée et les limitations de cette étude sont exposées.

5.1 Analyse critique du modèle de répétabilité proposé

5.1.1 Validité de l'approche par distribution χ^2

La méthode proposée dans l'article pour modéliser la répétabilité du procédé d'AAM semble fournir un cadre raisonnable pour l'évaluation de la performance du système étudié. L'approche consiste à traiter les déviations par rapport à la moyenne le long de chacun des axes X , Y et Z comme des variables aléatoires normales indépendantes, puis à combiner ces déviations dans une mesure globale sans dimension suivant une distribution χ^2 à trois degrés de liberté. Cette formulation permet d'exprimer un intervalle de confiance élargi à 95 % sur la déviation totale de position.

Pour les deux séries de données considérées dans l'étude, la zone de confiance théorique à 95 % de la distribution χ^2 correspond étroitement aux observations expérimentales. Plus précisément, la couverture empirique observée était de 94,0 % pour le premier jeu de données et de 96,7 % pour le second, ce qui valide l'adéquation du modèle statistique dans ces conditions expérimentales spécifiques. Les graphiques de probabilité cumulative présentés dans l'article démontrent visuellement la concordance entre la distribution théorique χ^2 et les données expérimentales, ce qui supporte les hypothèses sous-jacentes de normalité des déviations axiales et d'indépendance entre les axes.

5.1.2 Variabilité spatiale des paramètres du modèle

Une limitation importante du modèle de répétabilité proposé est mise en évidence lorsque les positions et les orientations des poses de test sont modifiées. En effet, lorsque l'on varie les positions des cinq poses servant à collecter les données pour construire le modèle, les écarts-types des déviations en X , Y , Z , ainsi que ceux des angles d'Euler (roulis, tangage et lacet), diffèrent d'un jeu de données à l'autre. Par exemple, σ_x varie de $4,47 \mu\text{m}$ (Premier jeu de données) à $8,84 \mu\text{m}$ (Deuxième jeu de données), tandis que σ_z passe de $4,05 \mu\text{m}$ à $11,83 \mu\text{m}$. Des variations similaires sont observées pour les déviations angulaires.

Cette variabilité des paramètres du modèle n'invalide pas la méthode en soi, mais elle met clairement en évidence que les estimations de répétabilité sont fortement dépendantes de la région de l'espace de travail dans laquelle les mesures sont effectuées. En d'autres termes, chaque jeu de données génère un modèle de répétabilité local, spécifique aux positions et orientations testées. Cette observation suggère que la répétabilité du procédé d'AAM n'est pas uniforme dans tout l'espace de travail du robot.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette variabilité spatiale. D'abord, la configuration articulaire du robot change selon la position commandée dans l'espace de travail, ce qui influence directement la rigidité structurelle de la chaîne cinématique. Certaines configurations, notamment celles proches des singularités ou avec les bras en extension maximale, présentent une rigidité réduite et sont donc plus sensibles aux effets de flexion et aux erreurs de positionnement. Ensuite, la géométrie du réseau iGPS joue également un rôle : la qualité des mesures dépend du nombre de transmetteurs en visibilité directe avec les récepteurs, ainsi que de la géométrie relative entre les émetteurs et les récepteurs. Certaines positions dans l'espace de travail bénéficient d'une meilleure couverture par le réseau iGPS, ce qui réduit l'incertitude de mesure.

5.1.3 Vers un modèle unifié et généralisable

L'objectif ultime serait de disposer d'un modèle de répétabilité unifié, valable sur l'ensemble de l'espace de travail du robot, plutôt que de construire un modèle spécifique à chaque région.

Cela nécessiterait une campagne de mesures beaucoup plus étendue, couvrant diverses zones et orientations du poignet, idéalement grâce à une collecte et un traitement de données automatisés. Une routine d'acquisition automatisée remplacerait les cycles manuels actuels (cube ISO 9283), permettant de multiplier les points de mesure et d'explorer l'espace de travail de manière exhaustive.

Une approche prometteuse consisterait à modéliser les paramètres de répétabilité (σ_x , σ_y , σ_z , σ_{roll} , σ_{pitch} , σ_{yaw}) en fonction de la position et de la configuration du robot, par régression ou réseau de neurones. Ce modèle adaptatif pourrait alors estimer l'incertitude pour toute pose, sans nouvelle campagne de mesure.

Le modèle actuel suppose des déviations indépendantes selon X , Y et Z , hypothèse appuyée par la concordance entre couverture empirique et théorique. Toutefois, les corrélations entre axes sont plausibles, dues à la propagation des erreurs le long de la chaîne cinématique et aux effets de flexion. L'analyse de la matrice de covariance des déviations permettrait de quantifier ces corrélations et, le cas échéant, de les intégrer dans le modèle.

Enfin, le modèle repose sur l'hypothèse d'une pièce parfaitement rigide, valide en laboratoire mais non en contexte industriel où les pièces sont souvent flexibles et sensibles à la gravité et aux variations thermiques. Pour un usage réaliste, il faudrait intégrer ces effets via des modèles éléments finis couplés aux mesures métrologiques.

5.2 Évaluation de l'exactitude et sources d'erreur

5.2.1 Décomposition des sources d'erreur

Les résultats présentés dans l'article ont montré de larges déviations par rapport aux valeurs nominales pour l'exactitude des positions, avec des variations importantes d'un point de mesure à l'autre. Grâce aux tests supplémentaires visant à identifier l'origine de ce biais, il a été possible de décomposer les contributions des différentes sources d'erreur.

Premièrement, environ 0,2 mm de l'erreur totale peut être attribuée au système de mesure iGPS lui-même. Cette contribution a été mise en évidence par les tests de permutation des récepteurs i5IS, qui ont montré un effet mesurable lorsque les sondes sont interchangées.

Deuxièmement, la contribution la plus importante à l'erreur d'exactitude provient du robot lui-même, avec des déviations de l'ordre de quelques millimètres. Cette erreur combine deux composantes principales : (i) les erreurs du modèle cinématique du robot, et (ii) la flexion structurelle des membrures du robot sous l'effet de la charge utile. Les paramètres de Denavit-Hartenberg utilisés dans cette étude sont les valeurs nominales fournies par le fabricant et ne tiennent pas compte des tolérances de fabrication, des jeux d'assemblage et de l'usure des composants.

(Slamani *et al.*, 2015) ont évalué l'inexactitude de pose de l'IRB120™ et ont mesuré des déviations pouvant atteindre environ 2 mm dans la pire configuration pour une charge utile de 2,3 kg. Dans la présente étude, la charge utile est d'environ 2,7 kg (artefact + récepteurs iGPS ou sphères du traqueur laser + masse de compensation). Les déviations observées dans nos résultats sont donc cohérentes avec les données de (Slamani *et al.*, 2015) et confirment que la flexion du robot, combinée aux erreurs du modèle cinématique nominal, constitue la source d'erreur dominante dans le procédé d'AAM étudié. Cette flexion varie en fonction de la configuration du robot et de l'orientation de la charge par rapport à la gravité, ce qui explique la variation de l'erreur d'exactitude d'un point de mesure à l'autre.

Troisièmement, l'erreur sur la matrice de transformation $\mathbf{T}_{iGPS}^{Base}$ contribue également au biais systématique. L'exactitude de cette transformation est directement affectée par la flexion du robot pendant la procédure de localisation, ainsi que par les incertitudes de mesure de l'iGPS. Une procédure de localisation plus robuste, utilisant un plus grand nombre de poses et des méthodes d'optimisation plus sophistiquées, pourrait réduire cette contribution.

5.2.2 Limitations de la comparaison avec le traqueur laser

La comparaison entre les mesures du système iGPS et celles du traqueur laser Leica AT960™ a révélé des déviations comparables entre les deux systèmes par rapport aux positions nominales commandées. Cette observation suggère que le système iGPS n'est pas la principale source d'inexactitude dans le procédé d'AAM. Cependant, la procédure de mesure avec le traqueur laser a nécessité plusieurs palpations manuelles de surfaces pour définir le référentiel de l'artefact à chaque position de test, ce qui introduit des sources d'incertitude supplémentaires.

L'interaction physique entre l'opérateur et le robot pendant la palpation manuelle induit des forces externes qui provoquent une flexion additionnelle des membrures du robot. La dispersion plus importante observée dans les résultats du traqueur laser par rapport à ceux de l'iGPS peut en partie s'expliquer par cet effet.

Pour améliorer la qualité de la comparaison, plusieurs modifications méthodologiques seraient souhaitables. Premièrement, l'utilisation d'un outillage spécialisé permettant de mesurer un vecteur défini par deux sphères réfléchissantes plutôt que de palper directement les surfaces réduirait l'interaction physique avec le robot. Deuxièmement, la conception d'un nouvel artefact permettant de fixer en permanence à la fois les sondes iGPS et les sphères du traqueur éliminerait la nécessité de repositionner les composants entre les mesures.

5.2.3 Axes d'amélioration du procédé

L'analyse des sources d'erreur suggère plusieurs axes d'amélioration. L'étalonnage cinématique du robot constitue la mesure corrective la plus prometteuse. Des études ont montré que l'étalonnage peut réduire les erreurs d'exactitude de pose d'un facteur 5 à 10 (Gaudreault *et al.*, 2018) (Li *et al.*, 2021). La compensation de la flexion du robot représente un second axe d'amélioration. Cela peut être réalisé soit en modélisant la flexion en fonction de la configuration et de la charge, soit en utilisant le système iGPS en boucle fermée pour compenser en temps réel les erreurs de positionnement.

5.3 Implications pour l'utilisation industrielle de l'AAM robotisé

5.3.1 Répétabilité versus exactitude : deux régimes d'utilisation distincts

Les résultats de cette étude mettent en évidence une caractéristique fondamentale des systèmes d'AAM robotisés utilisant des robots industriels standards : une excellente répétabilité couplée à une exactitude limitée en l'absence d'étalonnage cinématique.

La répétabilité démontrée dans cette étude est remarquable. Les écarts-types des déviations positionnelles varient de quelques micromètres à une vingtaine de micromètres selon l'axe et la configuration testée, avec une couverture empirique à 95 % correspondant étroitement au modèle χ^2 proposé. Cette performance est directement héritée des caractéristiques intrinsèques des robots industriels modernes, qui sont conçus pour retourner à la même position avec une très grande précision lorsqu'ils sont commandés de manière identique (Gaudreault *et al.*, 2018). Le système iGPS, agissant comme encodeur externe, permet de mesurer et de confirmer cette répétabilité dans un référentiel global indépendant du robot.

En revanche, l'exactitude de pose mesurée est de l'ordre de quelques millimètres, principalement attribuable à la flexion du robot et aux erreurs du modèle cinématique nominal. Cette distinction a des implications pratiques importantes : les procédés d'AAM utilisant des robots non étalonnés sont particulièrement bien adaptés aux tâches de repositionnement, où l'objectif est de ramener une pièce à une position précédemment atteinte ou mesurée, plutôt qu'à une position absolue définie par des coordonnées nominales.

5.3.2 Applications de l'AAM robotisé : avec ou sans étalonnage

Les résultats de cette étude permettent de distinguer deux grandes catégories d'applications pour l'AAM robotisé. Dans de nombreuses opérations industrielles semi-automatisées, l'excellente répétabilité du système suffit sans étalonnage cinématique. Cela inclut le repositionnement de pièces de grande taille après réparation ou usinage : le robot peut ramener la pièce à sa configuration initiale avec une incertitude de quelques dizaines de micromètres, même si la

position absolue comporte des erreurs de quelques millimètres. De même, les assemblages itératifs, où plusieurs cycles de positionnement, mesure et ajustement sont nécessaires, bénéficient de la répétabilité du robot pour converger vers une configuration optimale et la reproduire pour les unités suivantes. Enfin, les opérations où la précision relative entre pièces prime sur la position absolue exploitent également cette répétabilité pour maintenir l'alignement des interfaces de sous-composants.

En revanche, les applications totalement automatisées, où aucune intervention humaine n'est possible, nécessitent une exactitude de pose élevée et donc un étalonnage cinématique. Dans ce cas, le robot doit positionner les pièces directement selon des coordonnées nominales définies par des modèles CAO, par exemple pour saisir des pièces dans des racks de stockage et les assembler automatiquement dans une cellule de production. Une erreur de plusieurs millimètres sur le positionnement absolu peut compromettre l'assemblage et nécessiter l'arrêt de la chaîne, rendant l'étalonnage indispensable pour garantir que les positions commandées correspondent aux positions désirées dans le référentiel global. Ainsi, le recours à l'étalonnage dépend principalement du degré d'autonomie du processus et de la nécessité d'atteindre des positions absolues précises.

5.4 Portée et limitations de l'étude

5.4.1 Contributions méthodologiques

Cette étude apporte plusieurs contributions méthodologiques au domaine de l'assemblage assisté par la métrologie. Premièrement, elle présente le développement d'un banc d'essai systématique et reproductible permettant d'évaluer expérimentalement la répétabilité et l'exactitude d'un procédé d'AAM robotisé. Contrairement aux études antérieures qui se concentraient principalement sur la démonstration de faisabilité ou sur des applications spécifiques, cette recherche propose une méthodologie structurée pour la caractérisation quantitative des performances d'un système d'AAM.

Deuxièmement, le modèle statistique développé pour la répétabilité, basé sur la distribution χ^2 à trois degrés de liberté, constitue une approche originale pour combiner les déviations le long des trois axes cartésiens dans une mesure globale cohérente. Ce modèle permet de définir des intervalles de confiance élargis de manière rigoureuse, facilitant ainsi la comparaison avec les exigences de tolérance industrielles. La validation empirique du modèle sur deux jeux de données indépendants démontre sa robustesse dans les conditions testées.

Troisièmement, l'étude établit des protocoles expérimentaux validés pour la stabilisation thermique des composants du système d'AAM. La détermination d'un temps de chauffage de 160 minutes pour le robot IRB120™ et de 30 minutes pour les récepteurs i5IS du système iGPS constitue une contribution pratique importante. Ces temps de chauffage peuvent être réutilisés dans d'autres études similaires.

Quatrièmement, la méthodologie de comparaison multi-instruments développée, utilisant à la fois le système iGPS et le laser tracker Leica AT960™, permet d'évaluer l'exactitude du procédé d'AAM. Bien que des limitations aient été identifiées dans la mise en œuvre pratique de cette comparaison, l'approche générale et les enseignements tirés constituent une base pour de futures investigations.

5.4.2 Limitations expérimentales

Plusieurs limitations doivent être prises en compte lors de l'interprétation des résultats de cette étude :

- **Environnement contrôlé :** Les expériences ont été réalisées en laboratoire à température stable ($20 \pm 0,5^\circ\text{C}$), ce qui diffère des conditions industrielles. Sur un plancher d'usine, les variations de température, les vibrations des machines environnantes et la présence de poussière ou de contaminants peuvent affecter la performance du système iGPS. La généralisation des résultats à des environnements industriels non contrôlés doit donc être faite avec prudence.

- **Volume de travail restreint :** L'étude s'est limitée à un cube de $100 \times 100 \times 100$ mm centré dans l'espace de travail du robot. Cette dimension, choisie pour minimiser les effets de compliance et garantir une visibilité optimale avec le réseau iGPS, représente une fraction minimale de l'espace total du robot IRB120™. Les applications industrielles impliquent généralement des pièces plus grandes et nécessitent d'explorer une portion plus vaste de l'espace de travail, ce qui demanderait des campagnes de mesures supplémentaires.
- **Rigidité de l'artéfact :** L'objet utilisé a été conçu comme un corps rigide de petite taille. Cette hypothèse est valide expérimentalement mais ne reflète pas les pièces industrielles, souvent grandes, flexibles et sujettes à des déformations gravitationnelles et thermiques importantes. L'impact de ces déformations sur la répétabilité et l'exactitude de l'AAM n'a pas été étudié.
- **Absence d'étalonnage cinématique :** Aucun étalonnage du robot n'a été réalisé afin d'évaluer les performances d'un robot industriel standard avec son modèle nominal. Cette limitation implique que les résultats d'exactitude représentent une borne inférieure : l'amélioration possible grâce à un étalonnage n'a pas été quantifiée.
- **Configuration spécifique du réseau iGPS :** Six transmetteurs ont été positionnés autour de l'espace de travail, assurant une couverture adéquate pour ces expériences. Cependant, cette disposition spécifique peut influencer les performances : l'impact de la géométrie, du nombre et de la distance des transmetteurs par rapport aux récepteurs n'a pas été systématiquement exploré.

5.4.3 Synthèse du chapitre 5

Cette étude a démontré que l'AAM robotisé utilisant le système iGPS comme encodeur externe présente un fort potentiel pour les applications d'assemblage de pièces de grande taille, en particulier pour les tâches de repositionnement où la répétabilité est critique. La répétabilité mesurée, de l'ordre de quelques micromètres à quelques dizaines de micromètres selon la configuration, est largement suffisante pour de nombreuses opérations d'assemblage, de réparation et de maintenance dans l'industrie aérospatiale et d'autres secteurs similaires.

Cependant, l'exactitude de pose, limitée à quelques millimètres pour un robot non étalonné, restreint les applications aux procédés semi-automatisés où un opérateur peut intervenir pour l'ajustement initial des positions. Pour les procédés totalement automatisés nécessitant un positionnement absolu précis à partir de coordonnées CAO, l'étalonnage cinématique du robot et la compensation de la flexion deviennent indispensables.

La méthodologie développée dans cette étude fournit un cadre rigoureux pour l'évaluation expérimentale des performances des systèmes d'AAM. Les protocoles établis, le modèle statistique de répétabilité, et les enseignements tirés constituent une base solide pour de futures recherches et développements dans ce domaine.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'AAM constitue une approche prometteuse pour améliorer l'assemblage de pièces de grande taille dans les industries aérospatiale, navale et énergétique. Son adoption reste toutefois freinée par la difficulté d'évaluer l'incertitude inhérente, essentielle pour garantir la conformité aux exigences de qualité et de tolérance géométrique.

Cette étude avait pour objectif de développer une méthodologie expérimentale permettant de quantifier la répétabilité et l'exactitude d'un procédé d'AAM robotisé utilisant le système iGPS. Un banc d'essai à échelle laboratoire a été conçu, intégrant un robot industriel ABB IRB120™, un système de mesure à grande échelle iGPS et un artefact représentant la pièce à assembler. Les travaux ont permis de développer et valider un modèle statistique de répétabilité basé sur la distribution χ^2 , avec des écarts-types variant de quelques micromètres à une dizaine de micromètres selon l'axe et la configuration, et une couverture empirique de 94,0 % à 96,7 %. L'exactitude du procédé a montré des déviations de l'ordre de quelques millimètres, principalement imputables à la flexion structurelle du robot et aux imperfections du modèle cinématique nominal, tandis que le système iGPS contribue pour environ 0,2 mm. Des protocoles de stabilisation thermique ont été établis, avec 160 minutes de préchauffage pour le robot et 30 minutes pour les récepteurs iGPS.

Les résultats clarifient les domaines d'application de l'AAM robotisé : dans les procédés semi-automatisés, un opérateur peut exploiter la répétabilité élevée pour le repositionnement et l'ajustement des pièces, tandis que dans les procédés totalement automatisés, l'étalonnage cinématique du robot est nécessaire pour garantir l'exactitude des positions absolues.

Les perspectives de recherche sont multiples. À court terme, il serait pertinent de réaliser un étalonnage cinématique complet du robot et de répéter les mesures pour quantifier précisément le gain de performance, ainsi que de développer un nouvel artefact permettant d'accueillir simultanément les récepteurs iGPS et les sphères du laser tracker afin de réduire les incertitudes

liées au repositionnement. À moyen terme, l'automatisation de la collecte et du traitement des données permettrait d'étendre les campagnes de mesures à un plus grand volume de l'espace de travail et de construire un modèle unifié de répétabilité. Sur le plan théorique, l'intégration des corrélations entre les axes pourraient améliorer la précision du modèle. À plus long terme, l'intégration des effets de déformation des pièces par éléments finis, le développement de stratégies de contrôle en boucle fermée et l'établissement d'un lien formel entre les mesures et les exigences GD&T constitueraient des avancées majeures pour l'application industrielle de l'AAM.

En conclusion, cette étude démontre le fort potentiel de l'AAM robotisé pour l'assemblage, la réparation et la maintenance de pièces de grande taille. La méthodologie développée fournit un cadre rigoureux pour évaluer quantitativement la répétabilité et l'exactitude du système, contribuant ainsi à l'avancement des connaissances nécessaires à son adoption industrielle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 7D Kinematic Metrology. (s.d.). 6th Generation Technology Further Increases iGPS Usability & Performance. Repéré le 2024-12-03 à <https://7dkmetrology.com/7dk-1/transmitter>.
- Azamfirei, V., Granlund, A., Lagrosen, Y. & Palm, W. J. (2021). Towards fixtureless robotic in-line measurement assisted assembly, a case study. *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT)*, pp. 636–641. doi : 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488551.
- Babin, W., Joubair, A. & Tahan, S.-A. (2025). Experimental Repeatability Assessment of a Metrology Assisted Robotic Assembly System Using iGPS Tracking. *Proc. CSME/CFDSC/CSR*.
- Beck, J. L. (2010). Bayesian system identification based on probability logic. *Structural Control and Health Monitoring*, 17(7), 825–847. doi : 10.1002/stc.424.
- Bejlegaard, M., ElMaraghy, W., Brunoe, T., Andersen, A.-L. & Nielsen, K. (2018). Methodology for reconfigurable fixture architecture design. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 23, 172–186. doi : 10.1016/j.cirpj.2018.05.001.
- Bernardini, L., McLinden, M. O., Yang, X. & Richter, M. (2024). How Accurate are Your Experimental Data? A More Accessible GUM-Based Methodology for Uncertainty Evaluation. *International Journal of Thermophysics*, 45(11), 164. doi : 10.1007/s10765-024-03446-9.
- Berry, D. A. (1993). A case for Bayesianism in clinical trials. *Statistics in Medicine*, 12(15-16), 1377-93 ; discussion 1395-404. doi : 10.1002/SIM.4780121504.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP & OIML. (2008). *Évaluation des données de mesure — Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* (Rapport n°JCGM 100 :2008). Repéré à https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_F.pdf.
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP & OIML. (2012). *International Vocabulary of Metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM)* (Rapport n°JCGM 200 :2012). Repéré à https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf.
- Boschetti, G. & Sinico, T. (2024). A novel step-by-step procedure for the kinematic calibration of robots using a single draw-wire encoder. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 4129–4147. doi : 10.1007/s00170-024-13219-1.

- Bounaouara, W. (2023). *Combinaison de la métrologie 3D et de la réalité augmentée pour le contrôle de la qualité des assemblages dans la construction modulaire*. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure). Repéré à <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3377/>.
- Braun, J., Lima, J., Pereira, A. I. & Costa, P. (2024). Kabsch Marker Estimation Algorithm—A Multi-Robot Marker-Based Localization Algorithm Within the Industry 4.0 Context. *IEEE Access*, 12, 68711–68729. doi : 10.1109/ACCESS.2024.3400919.
- Cai, Z., Luo, Z. & Liu, H. (2019). Probe error analysis of articulated arm coordinate measuring machine. *Tenth International Symposium on Precision Engineering Measurements and Instrumentation*, 11053, 846–851. doi : 10.1117/12.2512101.
- Caldwell, A. (2018). Aspects of Frequentism. *Annalen der Physik*, 531, 1700457. doi : 10.1002/andp.201700457.
- Chikwendu Okpala, C. (2015). The Design and Need for Jigs and Fixtures in Manufacturing. *Science Research*, 3(4), 213. doi : 10.11648/j.sr.20150304.19.
- Contreras, L.-F., Brown, E. T. & Ruest, M. (2017). Bayesian data analysis to quantify the uncertainty of intact rock strength. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10, 11-31. doi : 10.1016/J.JRMGE.2017.07.008.
- Craig, J. J. (2005). *Introduction to robotics : mechanics and control* (éd. 3rd). Upper Saddle River, NJ : Pearson, Prentice Hall.
- Crowder, S., Delker, C., Forrest, E. & Martin, N. (2020). Monte Carlo Methods for the Propagation of Uncertainties. Dans Crowder, S., Delker, C., Forrest, E. & Martin, N. (Éds.), *Introduction to Statistics in Metrology* (pp. 153–180). Cham : Springer International Publishing. doi : 10.1007/978-3-030-53329-8_8.
- Dalle Mura, M. & Dini, G. (2021). Augmented Reality in Assembly Systems : State of the Art and Future Perspectives. *Smart Technologies for Precision Assembly*, pp. 3–22. doi : 10.1007/978-3-030-72632-4_1.
- de Campos Porath, M., Simoni, R., de Araujo Nunes, R. & Bertoldi, A. (2019). Feasibility of measurement-assisted assembly of ship hull blocks. *Marine Systems and Ocean Technology*, 14(1), 23–33. doi : 10.1007/s40868-018-00053-w. Publisher : Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
- Denavit, J. & Hartenberg, R. S. (1955). A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices. *Journal of Applied Mechanics*, 22(2), 215–221. doi : 10.1115/1.4011045.

- Depenthal, C. (2010). iGPS Used as Kinematic Measuring System. *FIG Congress 2010 : Facing the Challenges – Building the Capacity*, pp. 1–14.
- Doytchinov, I., Tonnellier, X., Shore, P., Nicquevert, B., Modena, M. & Durand, H. M. (2018). Application of probabilistic modelling for the uncertainty evaluation of alignment measurements of large accelerator magnets assemblies. *Measurement Science and Technology*, 29, 054001. doi : 10.1088/1361-6501/aaaca0.
- Drouot, A., Zhao, R., Irving, L., Sanderson, D. & Ratchev, S. (2018). Measurement Assisted Assembly for High Accuracy Aerospace Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 393–398. doi : 10.1016/j.ifacol.2018.08.326. 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018.
- Du, F., Chen, Z. & Tang, X. (2012). Precision Analysis of iGPS Measurement Field and Its Application. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 33(9), 1737–1745. Repéré à <https://hkxb.buaa.edu.cn/EN/Y2012/V33/I9/1737>.
- Emir, F. & Ayyıldız, S. (2019). Evaluation of the trueness and precision of eight extraoral laboratory scanners with a complete-arch model : a three-dimensional analysis. *Journal of Prosthodontic Research*, 63(4), 434–439. doi : 10.1016/j.jpor.2019.03.001.
- Estler, W., Edmundson, K., Peggs, G. & Parker, D. (2002). Large-Scale Metrology – An Update. *CIRP Annals*, 51(2), 587–609. doi : 10.1016/S0007-8506(07)61702-8.
- Fang, W., Chen, L., Zhang, T., Chen, C., Teng, Z. & Wang, L. (2023). Head-mounted display augmented reality in manufacturing : A systematic review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 83, 102567. doi : 10.1016/j.rcim.2023.102567.
- Ferrero, A., Salicone, S. & Jetti, H. V. (2019). Bayesian approach to uncertainty evaluation : is it always working ? *19th International Congress of Metrology (CIM2019)*, pp. 16002. doi : 10.1051/metrology/201916002.
- Fiedler, F., Ehrenstein, J., Höltingen, C., Blondrath, A., Schäper, L., Göppert, A. & Schmitt, R. (2024). Jigs and Fixtures in Production : A Systematic Literature Review. *Journal of Manufacturing Systems*, 72, 373–405. doi : 10.1016/j.jmsy.2023.10.006.
- Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., Mastrogiacomo, L. & Pralio, B. (2011). Indoor GPS (iGPS™). Dans Franceschini, F., Galetto, M., Maisano, D., Mastrogiacomo, L. & Pralio, B. (Éds.), *Distributed Large-Scale Dimensional Metrology : New Insights* (pp. 23–35). London : Springer. doi : 10.1007/978-0-85729-543-9_2.

- Gai, Y., Zhang, J., Guo, J., Shi, X., Wu, D. & Chen, K. (2020). Construction and uncertainty evaluation of large-scale measurement system of laser trackers in aircraft assembly. *Measurement*, 165, 108144. doi : 10.1016/j.measurement.2020.108144.
- Galetto, M., Mastrogiacomo, L. & Pralio, B. (2010). A Wireless Sensor Network-Based Approach to Large Scale Dimensional Metrology. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 23, 1082-1094. doi : 10.1080/0951192X.2010.518322.
- Gaudreault, M., Joubair, A. & Bonev, I. (2018). Self-Calibration of an Industrial Robot Using a Novel Affordable 3D Measuring Device. *Sensors*, 18, 3380. doi : 10.3390/s18103380.
- Goldman, R. (2011). Understanding quaternions. *Graphical Models*, 73, 21–49. doi : 10.1016/j.gmod.2010.10.004.
- González-Díaz, F. R., Badenes, V. M. & García-Salcedo, R. (2024). Educational Perspectives on Quaternions : Insights and Applications. doi : 10.48550/arXiv.2406.00747.
- Han, R., Dunker, T., Trostmann, E. & Xu, Z. (2024a). Research on high-precision tracking and localization of industrial robots based on iGPS. *Measurement Science and Technology*, 35, 065006. doi : 10.1088/1361-6501/ad2f08.
- Han, R., Dunker, T., Trostmann, E. & Xu, Z. (2024b). Calibration Methods for Large-Scale and High-Precision Globalization of Local Point Cloud Data Based on iGPS. *Sensors*, 24(18), 6114. doi : 10.3390/s24186114.
- Heiden, G. & Porath, M. D. C. (2016, Jul). Metrological Performance of Indoor-GPS in a Simulated Measurement Assisted Assembly Process. *Journal of Physics : Conference Series*, 733, 012036. doi : 10.1088/1742-6596/733/1/012036.
- Hu, R., Xie, L., Yin, G. & Yin, Q. (2025). Field Kinematic Calibration of Industrial Robot Using Relative Pose Errors of the Tool Under Motion Constraint. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 74, 1–12. doi : 10.1109/TIM.2025.3544363.
- International Organization for Standardization. (1998). *Industrial robots—Performance criteria and related test methods* (Rapport n°ISO 9283 :1998). Geneva, Switzerland.
- Kaufmann, M., Effenberger, I. & Huber, M. F. (2021). Measurement uncertainty assessment for virtual assembly. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, 10(1), 101–108. doi : 10.5194/jsss-10-101-2021.
- Landeta, B., Sutério, R. & Trabasso, L. G. (2012). Metrological Comparison Between Two Sensor Configurations of the iGPS Measurement System. *ABCM Symposium Series in Mechatronics, Sensors & Actuators*, 5, 1328–1335.

- Li, Z., Li, S. & Luo, X. (2021). An overview of calibration technology of industrial robots. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 8(1), 23–36. doi : 10.1109/JAS.2020.1003381.
- Lotter, B. (2013). *Manufacturing Assembly Handbook*. Butterworth-Heinemann.
- Maropoulos, P. G., Muelaner, J. E., Summers, M. D. & Martin, O. C. (2014). A new paradigm in large-scale assembly—research priorities in measurement assisted assembly. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(1), 621–633. doi : 10.1007/s00170-013-5283-4.
- Marrugo, A. G., Gao, F. & Zhang, S. (2020). State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology : a review [Invited]. *Journal of the Optical Society of America A*, 37(9), B60. doi : 10.1364/JOSAA.398644.
- Mastrogriaco, L., Franceschini, F. & Maropoulos, P. (2011). Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 56, 205–213. doi : 10.1007/s00170-011-3166-0.
- Mei, Z. & Maropoulos, P. G. (2014). Review of the application of flexible, measurement-assisted assembly technology in aircraft manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 228(10), 1185–1197. doi : 10.1177/0954405413517387.
- Miah, M. H., Chand, D. S. & Malhi, G. S. (2023). Indoor global positioning measurement system : Application in aircraft assembly technology. *AIP Conference Proceedings*, pp. 020015. doi : 10.1063/5.0119959.
- Monetti, F. M., Giorgio, A. D. & Maffei, A. (2022). Industrial transformation and assembly technology : context and research trends. *Procedia CIRP*, 107, 1427–1432. doi : 10.1016/j.procir.2022.05.169.
- Muelaner, J. E., Wang, Z., Jamshidi, J., Maropoulos, P. G., Mileham, A. R., Hughes, E. B. & Forbes, A. B. (2009). Study of the uncertainty of angle measurement for a rotary-laser automatic theodolite (R-LAT). 223(3), 217–229. doi : 10.1243/09544054JEM1272.
- Muelaner, J. E., Martin, O. C. & Maropoulos, P. G. (2013). Achieving Low Cost and High Quality Aero Structure Assembly through Integrated Digital Metrology Systems. *Procedia CIRP*, 7, 688–693. doi : 10.1016/j.procir.2013.06.054. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013.
- Muelaner, J., Kayani, A., Martin, O. & Maropoulos, P. (2011). Measurement assisted assembly and the roadmap to part- to-part assembly. *Proceedings of DET2011*.

- Nof, S. Y., Wilhelm, W. E. & Warnecke, H.-J. (1997). Introduction and fundamental concepts of assembly. Dans Nof, S. Y., Wilhelm, W. E. & Warnecke, H.-J. (Éds.), *Industrial Assembly* (pp. 1–44). Boston, MA : Springer US. doi : 10.1007/978-1-4615-6393-8_1.
- Norman, A. R., Schönberg, A., Gorlach, I. A. & Schmitt, R. (2013). Validation of iGPS as an external measurement system for cooperative robot positioning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 64(1-4), 427–446. doi : 10.1007/s00170-012-4004-8.
- Okpala, C. C., Igbokwe, N. C. & Nwankwo, C. O. (2024). The Evolution and Impact of Jigs and Fixtures in Modern Manufacturing. *International Journal of Engineering Inventions*, 13(7), 125–131. Repéré à <https://hal.science/hal-04674946>.
- Peggs, G. N., Lewis, A. J. & Oldfield, S. (1999). Design for a Compact High-Accuracy CMM. *CIRP Annals*, 48(1), 417–420. doi : 10.1016/S0007-8506(07)63216-8.
- Peggs, G., Maropoulos, P., Hughes, B., Forbes, A., Robson, S., Ziebart, M. & Muralikrishnan, B. (2009). Recent developments in large-scale dimensional metrology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 223, 571-595. doi : 10.1243/09544054JEM1284.
- Radhwan, H., Effendi, M. S. M., Farizuan Rosli, M., Shayfull, Z. & Nadia, K. N. (2019). Design and Analysis of Jigs and Fixtures for Manufacturing Process. *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, 551(1), 012028. doi : 10.1088/1757-899X/551/1/012028. Publisher : IOP Publishing.
- Ren, Y., Lin, J., Zhu, J., Sun, B. & Ye, S. (2015). Coordinate Transformation Uncertainty Analysis in Large-Scale Metrology. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 64(9), 2380–2388. doi : 10.1109/TIM.2015.2403151.
- Schmitt, R. H., Peterek, M., Morse, E., Knapp, W., Galetto, M., Härtig, F., Goch, G., Hughes, B., Forbes, A. & Estler, W. T. (2016a). Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends. *CIRP Annals*, 65(2), 643–665. doi : 10.1016/j.cirp.2016.05.002.
- Schmitt, R., Kimmelman, W., Quinders, S., Storm, C. & Oberhansberg, F. (2016b). Investigation of the Applicability of an iGPS Metrology System to Automate the Assembly in Motion of a Truck Cabin. *Applied Mechanics and Materials*, 840, 58–65. doi : 10.4028/www.scientific.net/AMM.840.58.
- Shi, F., Sun, N., Du, Z. & Liu, L. (2023, Sep). Real-Time Measurement and Compensation Based on iGPS for Industrial Robotic Pose Accuracy. *Journal of Physics : Conference Series*, 2591, 012058. doi : 10.1088/1742-6596/2591/1/012058.

- Shi, Z., Li, C., Hu, J., Su, X., Wang, H. & Tian, W. (2025). Modular Design and Layout Planning of Tooling Structures for Aircraft Assembly. *Machines*, 13(3), 185. doi : 10.3390/machines13030185. Publisher : Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Slamani, M., Joubair, A. & Bonev, I. A. (2015). A comparative evaluation of three industrial robots using three reference measuring techniques. *Industrial Robot : the international journal of robotics research and application*, 42(6), 572-585. doi : 10.1108/IR-05-2015-0088.
- Snelling, P. D. (2000). *Jig-less assembly for aerospace manufacture*. (M.Phil., Cranfield University (United Kingdom), England). Repéré à ISBN : 9780355894486.
- Storm, C., Schönberg, A. & Schmitt, R. H. (2017). Model Predictive Control Approach for assembling Large Components in Motion. *Production Engineering*, 11(2), 167–173. doi : 10.1007/s11740-017-0717-8.
- Truc, L. N. & Lam, N. T. (2020). Quasi-physical modeling of robot IRB 120 using Simscape Multibody for dynamic and control simulation. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 28(4), 1949–1964. doi : 10.3906/elk-1909-131.
- Tröger, J.-A., Römer, U. & Hartmann, S. (2024). Comparing frequentist and Bayesian uncertainty quantification in two-step constitutive model calibration. *PAMM*, 24, e202400031. doi : 10.1002/pamm.202400031.
- Vaidya, S., Ambad, P. & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238. doi : 10.1016/j.promfg.2018.02.034.
- Vocetka, M., Bobovský, Z., Babjak, J., Suder, J., Grushko, S., Mlotek, J., Krys, V. & Hagara, M. (2021). Influence of Drift on Robot Repeatability and Its Compensation. *Applied Sciences*, 11(22), 10813. doi : 10.3390/app112210813.
- Wan, M., Zheng, R., Wang, S., Huang, H., Zhao, H. & Yu, L. (2023). Efficient 3D scanning measurement system based on asymmetric trinocular vision and a multi-line laser. *Applied Optics*, 62(8), 2145–2153. doi : 10.1364/AO.481406. Publisher : Optica Publishing Group.
- Wang, Z., Mastrogiacomo, L., Franceschini, F. & Maropoulos, P. (2011). Experimental comparison of dynamic tracking performance of iGPS and laser tracker. 56(1), 205–213. doi : 10.1007/s00170-011-3166-0.

- Wu, Z. & Tai, D. (2024). Optimization methods for end-point accuracy of seven-axis articulated 3D scanning measurement arm. *Conference on Spectral Technology and Applications (CSTA 2024)*, 13283, 621–629. doi : 10.1117/12.3036614.
- Zhang, X., Meng, S., Wang, B., Zheng, L., Zhang, R. & Li, X. (2025). Integrated assembly, measurement, and adjustment method of reconfigurable flexible fixture for aircraft panels based on augmented reality and human-computer interaction. *Journal of Manufacturing Systems*, 79, 117–133. doi : 10.1016/j.jmsy.2025.01.003.
- Zhehan, C., Fuzhou, D. & Xiaoqing, T. (2013). Research on uncertainty in measurement assisted alignment in aircraft assembly. *Chinese Journal of Aeronautics*, 26(6), 1568-1576. doi : 10.1016/j.cja.2013.07.037.
- Zhou, N., An, Z., Li, L. & Zhu, Y. (2013). iGPS Measurement Network Multi-Station Arrangement Design. *Applied Mechanics and Materials*, 443, 223 - 227. doi : 10.4028/www.scientific.net/AMM.443.223.
- Žlajpah, L. & Petrič, T. (2023). Kinematic calibration for collaborative robots on a mobile platform using motion capture system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 79, 102446. doi : 10.1016/j.rcim.2022.102446.