

TABLE DES MATIÈRES

Page		
	INTRODUCTION	1
	REVUE DE LA LITTÉRATURE ET STRUCTURE DE LA THÈSE	11
	CHAPITRE 1 DISTINGUISHING PROFILE DEVIATIONS FROM A PART'S DEFORMATION USING THE MAXIMUM NORMED RESIDUAL TEST	19
1.1	Abstract	19
1.2	Introduction	20
1.3	Background	21
1.4	Methodology	27
1.5	Results	30
1.6	Conclusion	41
1.7	Acknowledgments	42
	CHAPITRE 2 THE INSPECTION OF DEFORMABLE BODIES USING CURVATURE ESTIMATION AND THOMPSON-BIWEIGHT TEST	43
2.1	Abstract	43
2.2	Introduction	44
2.3	Rigidity/Flexibility definition	46
2.4	Background	53
2.5	Inspection of Deformable Bodies by Curvature estimation and the Thompson- Biweight test (IDB-CTB) approach	56
2.5.1	Registration and matching (Step 1, Step 2)	56
2.5.2	Curvature estimation method (Step 3)	56
2.5.3	Identification method – The Thompson-Biweight test (Step 4)	58
2.5.4	IDB-CTB approach	63
2.6	Case Studies and validation	65
2.6.1	Fist set: Simulated case studies	65
2.6.2	Second set: Experimental case study	67
2.6.3	Results	68
2.7	Conclusion	73
2.8	Acknowledgments	74
	CHAPITRE 3 THE COHERENT POINT DRIFT ALGORITHM ADAPTED FOR FIXTURELESS DIMENSIONAL INSPECTION OF DEFORMABLE BODIES	75
3.1	Abstract	75
3.2	Introduction	76
3.3	Background	78

3.4	Methodology.....	82
3.4.1	Prealignment.....	82
3.4.2	Initialization of parameters that will be optimized.....	82
3.4.3	Optimization of the parameters λ and β :.....	83
3.4.4	The Thompson-Biweight test identification module:.....	85
3.4.5	Summary of the proposed method.....	87
3.5	Case studies and validation.....	88
3.5.1	Description of the case studies.....	88
3.5.2	Results and discussion.....	91
3.6	Conclusion.....	93
3.7	Acknowledgments.....	94
	CONCLUSION.....	95
	RECOMMANDATIONS.....	99
ANNEXE I	STAGE BOMBARDIER AÉRONAUTIQUE : DÉVELOPPEMENT DE LA BANQUE DES ÉTUDES DE CAS ET DE DEUX INTERFACES DYNAMIQUES (GUI).....	103
	BIBLIOGRAPHIE.....	107

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 0.1	Résumé des méthodes d'inspection de composante flexible « suite »	6
Tableau 1.1	Parameters for the algorithm used in the case studies (Abenhaim <i>et al.</i> , 2011)	32
Tableau 1.2	Type I and II errors – Case a	40
Tableau 1.3	Type I and II errors – Case b	40
Tableau 1.4	Type I and II errors – Case c	41
Tableau 2.1	Results of the flexibility ratio R	51
Tableau 2.2	Researchers working on automated 3D shape inspection	53
Tableau 2.3	Steps to create the scanned part	65
Tableau 2.4	Table of the simulated case studies for the IDB-CTB method	66
Tableau 2.5	Results of the IDB-CTB method	72
Tableau 3.1	Description of the case studies	91
Tableau 3.2	Table of results of the proposed method	93

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 0.1	Classification de la rigidité.....4
Figure 0.2	Bibliographie sur les phases typiques du processus d'inspection automatisée.....12
Figure 0.3	Le problème de recalage des pièces souples.....14
Figure 0.4	Structure de la thèse.....18
Figure 1.1	Inspection of non-rigid part using a jig – Source: Volvo, PREVOST Car.....21
Figure 1.2	Examples of non-rigid parts in the aerospace industry.....22
Figure 1.3	The concept of the inspection of non-rigid parts: (a) CAD, (b) Free State (with deformations and defects) (c) CAD deformed (d) Profile deviations.....23
Figure 1.4	Automated 3D shape inspection (Background).....25
Figure 1.5	Outlier detection - Dsi : Projection of the distance $si - ci$ on the normal nsi28
Figure 1.6	Grubbs implemented in IDI, $Kmax$ is the maximum iteration.....29
Figure 1.7	Descriptions of the case studies (a) quasi-constant surface (b) omega shape Ω (c) freeform surface (Abenhaim <i>et al.</i> , 2011).....31
Figure 1.8	Case a–F1 / V1.....32
Figure 1.9	Case a–F1 / V2.....33
Figure 1.10	Case a–F1 / V3.....33
Figure 1.11	Case a–F1 / V4.....34
Figure 1.12	Case a–F1 / V5.....34
Figure 1.13	Case a–F2 / V1.....35
Figure 1.14	Case a–F2 / V2.....35

Figure 1.15	Case a–F2 / V3.....	36
Figure 1.16	Case a–F2 / V4.....	36
Figure 1.17	Case a–F2 / V5.....	37
Figure 1.18	Case b–F1 Default detection: (a) V1– IDI (b) V1– Grubbs.....	37
Figure 1.19	Case b–F1 Default detection: (a) V2 – IDI (b) V2 – Grubbs.....	38
Figure 1.20	Case b–F1 Default detection: (a) V3 – IDI (b) V3 – Grubbs.....	38
Figure 1.21	Case c–F1 (a) IDI – V5 (b) Grubbs – V5.....	39
Figure 2.1	Inspection of aerospace compliant parts using a jig – Bombardier Aerospace.....	45
Figure 2.2	Defects: (a) Waviness profile deviations (b) Dent shapes.....	46
Figure 2.3	The flexibility definition from an industrial point of view.....	47
Figure 2.4	Legend for the case studies.....	48
Figure 2.5	Layout drawing of the compliant case A part.....	48
Figure 2.6	Layout drawing of the compliant case B part.....	49
Figure 2.7	Layout drawing of the compliant case C part.....	49
Figure 2.8	Layout drawing of the compliant case D part.....	50
Figure 2.9	Layout drawing of the compliant case E part.....	50
Figure 2.10	Logarithmic scale representation of the flexibility.....	52
Figure 2.11	The curvature at a given point.....	58
Figure 2.12	Curvature estimation and the identification method of the IDB-CTB algorithm.....	62
Figure 2.13	The IDB-CTB approach.....	64
Figure 2.14	Descriptions of the simulated case studies for the IDB-CTB method.....	66
Figure 2.15	The experimental case study- (a) The specialized inspection fixture designed to conform the part (b) The part restrained on the fixture (c) GD&T description of the test panel.....	67

Figure 2.16	Measurement at Free State aligned with its nominal model and located on the proposed flexibility logarithmic scale.	68
Figure 2.17	Results - Case A.	69
Figure 2.18	Results - Case B.	69
Figure 2.19	Results - Case C.	70
Figure 2.20	Results - Experimental case study.....	71
Figure 3.1	Specialized fixtures for the inspection of aerospace compliant parts – Source: Bombardier Aerospace Inc.....	77
Figure 3.2	Point set registration partial overview.....	79
Figure 3.3	Problematic of relatively flexible parts registration problematic.....	81
Figure 3.4	Description of the criteria that belong to relatively compliant parts.	84
Figure 3.5	Description of the case study (1).....	89
Figure 3.6	Description of the case studies (2)	90
Figure 3.7	Results of the identification module	92
Figure-A I-1	Les études de cas expérimentales - Bombardier Aéronautique	104
Figure-A I-2	Interface graphique (GUI) – La banque des études de cas expérimentales.....	105
Figure-A I-3	Interface graphique (GUI) – Les approches développées dans le cadre du projet CRIAQ MANU-501	105

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

2D/3D	Two/Three Dimensional Space
AIAG	Automatic Action Group
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CAD	Computer Aided Design
CAT	Computer Aided Tolerancing
CIRP	The International Academy for Production Engineering
CMM	Coordinate Measuring Machine
CPD	Coherent Point Drift
CRIAQ	Consortium de Recherche et d'Innovation en Aérospatiale au Québec
DB	Distance Based
DDL	Degré De Liberté
FE	Finite Element
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing
GMM	Gaussian Mixture Module
GNIF	Generalized Numerical Inspection Fixture
ICP	Iterative Closest Point
ICMST	International Conference on Manufacturing Science and Technology
IDB-CTB	Inspection of Deformable Bodies using the Curvature and Thompson Biweight test
IDI	Iterative Displacement Inspection
IGES	Initial Graphics Exchange Specification

XX

ISO	International Organization for Standardization
LOF	Local Outlier Factor
MANU	Manufacturing
NSERC	National Sciences and Engineering Research Council
ODMAD	Outlier Detection for Mixed Attribute Datasets
P ² SEL	Products, Processes and Systems Engineering Laboratory
RDD	Relative Deviation Degree
RMS	Root Mean Square
RPM	Robust Point Matching
SPOT	Stream Projected Outlier Technique
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
TPS	Thin Plate Spline
WHS	Wavelet-based Hoteling Statistics
WPCA	Wavelet-based Principal Component Analysis
WSEAS	World Scientific and Engineering Academy and Society

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

$1 - \bar{\alpha}$	Niveau de confiance (ex. 95%)
c	Paramètre qui contrôle la distance du centre d'une distribution d'un échantillon de données
C	Ensemble de points de P correspondant aux points les plus proches de la surface nominale S
c_i	Point de l'ensemble P correspondant au point le plus proche du point s_i de la surface nominale, $c_i \in C$
δ_{max}	Le déplacement maximal résultant de l'application d'une force \vec{F} [mm]
E	Le module de Young [Pa]
\vec{F}	Force [N]
\vec{g}	Gravité [N/kg]
m	Nombre de points d'un nuage représentant la pièce physique numérisée, $m \gg n$
M	La médiane d'une distribution [mm]
MAD	La médiane de la valeur absolue des écarts des valeurs de l'échantillon par rapport à la médiane [mm]
n	Nombre de points du nuage représentant le modèle nominal maillé
P	Nuage de m points représentant la pièce physique numérisée
p_i	Un point de P , $p_i \in P$
s	Écart type estimé d'un échantillon de données x [mm]
S	Nuage de n points représentant le modèle nominal maillé
R	Le ratio entre le déplacement maximal δ_{max} et la tolérance de profil Tol

S'	Transformation de S dans un nouveau système de coordonnées après alignement en utilisant l'algorithme <i>Coherent Point Drift</i> (CPD)
R_1, R_2	Rayons de courbures principales
s_{bi}	Estimation de l'écart type d'un échantillon de données par la méthode <i>biweight</i> [mm]
s_i	Un point de S , $s_i \in S$
s'_i	Transformation de s_i dans un nouveau système de coordonnées après alignement avec le CPD
T	Matrice de transformation telle que calculée par l'algorithme CPD
u_i	Poids correspondant à chaque observation d'un échantillon de données
Tol	Valeur de la tolérance de profile [mm]
σ_{noise}	L'écart type du bruit de mesure gaussien [mm]
$t_{x,N}$	La valeur critique de la loi de Student avec N degré de liberté
w_i	Poids affecté (valeur 0 ou 1)
x	Échantillon de données
\bar{x}	La moyenne d'un échantillon de données x [mm]

SPÉCIFIQUE POUR LE CHAPITRE 1 (ARTICLE 1)

α	Erreur de type I
β	Erreur de type II
D	Distance euclidienne corrigée représentant la projection de la distance point-point sur la normale du point s_i [mm]
G	Indicateur de Grubbs
$G_{critical}$	La valeur critique du test de Grubbs

H_0	Hypothèse nulle – Il n'y a pas de données aberrantes dans l'échantillon
H_A	Hypothèse alternative – Il y a au moins une donnée aberrante dans l'échantillon
K_{max}	Nombre d'itérations maximal de l'algorithme <i>Iterative Displacement Inspection</i> (IDI)
N	Nombre de points pour un échantillon de données x

SPÉCIFIQUE POUR LE CHAPITRE 2 (ARTICLE 2)

A_D	La valeur imposée de l'aire du défaut de profil [m^2]
\widehat{A}_D	La valeur estimée de l'aire du défaut [m^2]
ΔC	Matrice $n \times 2$ contenant la valeur absolue de la différence entre HK de C et S
ΔH_i	La valeur absolue de la différence entre les courbures estimées de gauss de C et S
Δ	La différence entre les courbures de gauss de C et S
ΔK	Vecteur $n \times 1$ de la la différence entre les courbures estimées de gauss de C et S
$\overline{\Delta K}$	La valeur moyenne correspondant au vecteur ΔK
H_D	La valeur imposée du défaut de profil [mm]
ΔK_i	La valeur absolue de la différence entre les courbures gauss estimé de C et S
\widehat{H}_D	La valeur estimée du défaut de profil [mm]
δK_i	La valeur absolue de la déviation de ΔK_i par rapport à $\overline{\Delta K}$
e_A	Pourcentage d'erreur de l'aire du défaut estimé par rapport à la valeur imposée [%]
e_H	Pourcentage d'erreur du défaut de profil estimé par rapport aux la valeur imposée [%]

HK	Matrice $n \times 2$ contenant la courbure moyenne et la courbure de gauss
K	La courbure gaussienne
k_1, k_2	Les valeurs minimales et maximales respectivement de la courbure et qui portent le nom de courbures principales

SPÉCIFIQUE POUR LE CHAPITRE 3 (ARTICLE 3)

α	Poids associé au critère de <i>Stretch</i> (distance curviligne)
β	Parameter that represents the amount of smoothness regularization. It defines the model of the smoothness regularizer.
λ_0, β_0	Valeur initiale des paramètres λ et β
$\lambda_{opt}, \beta_{opt}$	Valeur optimisée des paramètres λ et β
D	Vecteur $n \times 1$ contenant les distances D_i
\bar{D}	La valeur moyenne estimée de D par la méthode biweight
D_i	Distance euclidienne entre c_i et s'_i [mm]
d_i	Distance entre s_i et ses voisinages de premier niveau [mm]
d'_i	Distance entre s'_i et ses voisinages de premier niveau [mm]
Δ_D	Vecteur $n \times 1$ contenant la valeur absolue de la différence entre la distance D de C et S' [mm]
δD_i	La valeur absolue de la déviation de D_i par rapport à \bar{D}
$\Delta_{Stretch}$	La valeur absolue de la différence entre la valeur du <i>Stretch</i> de S et S' [mm]
ε	Termination tolerance on the objective function
F	La fonction objective a optimisé
$MaxIter$	The maximum number of iteration

<i>Ne</i>	Nombre d'éléments au voisinage immédiat du point p_i
<i>RMS</i>	Erreur moyenne quadratique
<i>Stretch</i>	Valeur du critère de la somme des d_i par rapport à Ne [<i>mm</i>]
λ	Paramètre qui représente le compromis entre la qualité de l'ajustement du maximum de vraisemblance et la régularisation

INTRODUCTION

Depuis environ deux décennies, le processus de développement des nouveaux produits a connu des bouleversements majeurs. À ce sujet, nous pouvons invoquer la réduction du temps de développement, l'intégration massive des modeleurs numériques et l'avènement d'une économie mondiale. Le contexte canadien se distingue par une forte maturité technologique, une accélération des changements et des coûts de développement qui subissent de fortes concurrences de la part des pays en émergence. La majorité des spécialistes s'entendent pour prédire que l'avenir passe par une économie du savoir, une spécialisation accrue et un haut niveau d'efficacité (concevoir « *bon* » du premier coup et fabriquer « *bon* » du premier coup). Dans le cadre de ces contraintes grandissantes, la recherche d'un processus optimal pour le développement des nouveaux produits (conception-fabrication-inspection) devient un enjeu majeur. L'allocation des tolérances et le choix d'une méthode de construction se traduisent immédiatement par des coûts. Par conséquent, les équipes d'ingénierie doivent employer des outils de prédiction pour s'assurer de la maîtrise des variations et de leurs influences sur l'assemblabilité, la fonctionnalité et le coût global d'un produit.

L'inspection des composants mécaniques est une tâche indispensable qui doit être prise en considération dans l'industrie moderne. À la sortie d'un processus de fabrication, nous devons vérifier si la pièce produite respecte les exigences fonctionnelles AVANT de l'employer dans une chaîne d'assemblage. En d'autres termes, nous avons besoin de savoir si une pièce fabriquée correspond bien à son modèle nominal dans le but de localiser et quantifier les erreurs de forme, d'orientation et de localisation. Dans le cas de pièces rigides, le problème de la gestion des variations dimensionnelles et géométriques (GD&T) des composants mécaniques a été étudié, et résolu, par de nombreux chercheurs. Par contre, la majorité de ces méthodes souffrent encore de faiblesses qui se traduisent par des prédictions limitées à un scénario bien spécifique. Les méthodologies utilisées pour résoudre le problème nous ramènent toujours à des cas souvent trop spécifiques pour être employées dans une

panoplie d'applications industrielles. À titre d'exemple, il n'y a toujours pas de solutions viables dans le cas de composantes non rigides (souples ou flexibles).

Aujourd'hui, le contrôle de la qualité des pièces non rigides nécessite une approche particulière puisque leurs géométries peuvent prendre des formes significativement différentes à l'état libre par rapport à leurs géométries nominales telles que définies dans un modèleur (ex. CAD). Ceci peut être attribué aux déformations engendrées par les contraintes induites par le procédé de fabrication ou par les forces induites lors de l'assemblage, à l'effet de la gravité et aux variations inhérentes aux procédés de fabrication. Jusqu'à présent, des gabarits de conformation très coûteux pour l'industrie sont nécessaires pour contraindre la pièce souple durant l'inspection¹.

Qu'est-ce qu'une pièce souple ?

Le terme « *souple* » est un terme relatif. D'une manière équivalente, on utilise dans la littérature spécialisée les termes « *non rigides* », « *déformables* » ou encore « *flexibles* » pour désigner des composants dont la géométrie est facilement modifiable. Nous parlons ici de déformations strictement dans le domaine élastique et dont l'amplitude est supérieure aux tolérances des pièces. Beaucoup de pièces dans l'industrie du transport (automobile et aéronautique) peuvent être considérées et classées comme telles. À titre d'exemple, nous pouvons citer les panneaux de carrosserie, les pièces à paroi mince, les revêtements d'aéronefs, etc.

Pour les composants mécaniques, il y a un consensus de considérer qu'une pièce est « non rigide » si nous pouvons la déformer avec une force raisonnable sans induire des déformations plastiques et d'une manière à modifier significativement sa géométrie. Pratiquement, nous parlons généralement pour l'application de la force de

¹ Typiquement, dans l'industrie aérospatiale, la préparation d'un gabarit (ou d'un montage) spécialisé pour conformer une pièce flexible nécessite environ 60 heures-homme.

225 – 300 N/m [5 – 20 $lbf/pied$] linéaires et pour le niveau de déformation il est usuel de considérer un seuil minimal de 10% de sa tolérance de profile. La valeur de la force est dictée par ce qui est communément utilisé dans une chaîne de fabrication manuelle. Le seuil de 10 % est dicté par des recommandations pratiques lors de la qualification d'un système de mesure² (AIAG, 2002). Avec cette définition, nous pouvons regrouper de nombreux types de pièces pour l'industrie automobile et aéronautique. Par exemple, la plaque de revêtement (*Skin*) et les pièces de carrosserie, des composants à paroi mince (longeron, nervures...) et des composantes pour la finition intérieure³.

En admettant que la flexibilité⁴ d'une pièce désigne le rapport entre l'amplitude de la déformation de la géométrie et la force appliquée (δ/F). Nous constatons donc que la flexibilité est une notion relative. Par exemple, un tube sera considéré comme rigide sur une courte longueur. Par contre, le même tube sera considéré comme flexible sur de grandes longueurs et que l'effet de la gravité est suffisant pour affecter de manière significative les mesures de rectitude ou de cylindricité. Abenhaim *et al.* (2011) ont présenté la flexibilité (ou rigidité) sur une échelle approximative allant de 0 %, pour représenter les pièces parfaitement rigides, et se terminant par un hypothétique 100 % pour les pièces parfaitement flexibles. Cette notion **qualitative** a permis d'établir d'une manière arbitraire trois zones distinctes comme le montre la figure 0.1. Dans notre projet, nous ciblons particulièrement la zone B dans laquelle s'y trouve la majorité des composants mécaniques.

Ce point est important pour situer notre problématique de recherche et son défi spécifique. Comme nous verrons plus tard, le nuage de point obtenu lors de l'inspection n'est pas dans le

² Selon les recommandations de l'AIAG (*Automotive Action Group - Measurement System Analysis*), le seuil de 10 % de la tolérance admise est une limite qui sépare un « bon système de mesure avec une précision acceptable » d'un système de mesure ayant un niveau d'incertitude (incluant les erreurs de justesse, de linéarité, de répétitivité et de reproductibilité) trop grand pour permettre une détection efficace de l'état de conformité.

³ Une étude a inventorié qu'environ 37 % des composants sont « souples » dans le cas de l'industrie automobile [Shiu, B. W., Apley, D. W., Ceglarek, D., and Shi, J. (2003), « Tolerance Allocation for Compliant Beam Structure Assemblies »' IIE, Trans., 35(4), pp. 329-342].

⁴ On peut, et d'une manière similaire, parler de la « rigidité » qui dans ce cas désigne le rapport entre la force appliquée et l'amplitude de la déformation.

même repère que le modèle nominal (CAD) d'où la nécessité d'une opération de calage (ou de registration). Or, les algorithmes de calage sont nombreux et ils peuvent proposer des solutions robustes et rapides. Par contre, ils sont adaptés pour des cas spécifiques qui ne correspondent pas à notre problématique de la Zone B.

À titre d'exemple, l'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*, Besl et Mackay, 1992) qui très performant pour le calage rigide (Zone A) ne peut produire de bons résultats dans le cas des composants souples. À l'opposé, l'algorithme CPD (*Coherent Point Drift*, Myronenko et Song, 2009) est efficace pour le calage non rigide (très employé dans l'imagerie) des composants de la Zone C. Dans ce cas, un étirement (*stretching*) des surfaces est permis, ce qui ne correspond nullement à la spécificité des composants mécaniques souples. Bref, nous devons obtenir une sorte de « *calage flexible* » qui conserve les distances curvilignes (géodésiques) tout en admettant sur la pièce inspectée la présence de zones de défauts de fabrication.

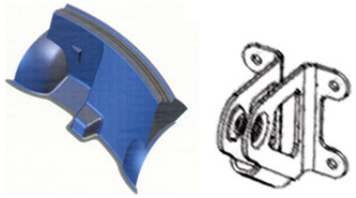
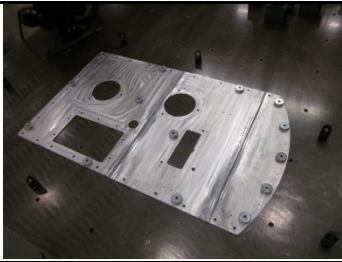

Zone A	Zone B	Zone C
Pièces rigides		Pièces très flexibles
		
Déformations négligeables par rapport aux tolérances données	La flexibilité dépend de la taille de la pièce, la direction et le montage de l'assemblage sur lequel l'inspection est effectuée (nécessite une force)	Très grande déformation uniquement avec l'effet de la gravité, ex. tissu

Figure 0.1 Classification de la rigidité.

Notre projet s'insère dans le cadre d'un projet plus global et d'une plus grande envergure (réf. CRIAQ MANU501). Une fois la problématique de l'**inspection** des pièces souples sera résolue, il faut s'attarder à la problématique du **tolérancement** des pièces souples. Or, comme mentionnée précédemment, l'échelle précédente (A, B et C) est surtout qualitative et ne peut qu'être employée pour catégoriser grossièrement les composants à inspecter. Ce

constat nous a guidés pour développer et proposer une nouvelle approche pour présenter la flexibilité/rigidité sur une échelle **quantitative**. Cette approche sera présentée dans le Chapitre 2 de cette thèse. Nous conjecturons que cette approche permettra aux industriels de bien classer leurs composants mécaniques et sera forte utile lors des opérations de tolérancement.


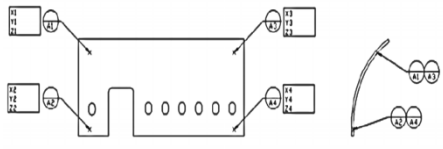
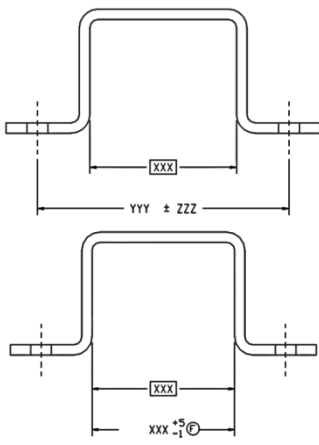
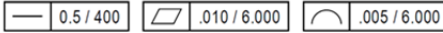
Est-ce que la norme ASME Y14.5 contrôle les pièces souples ?

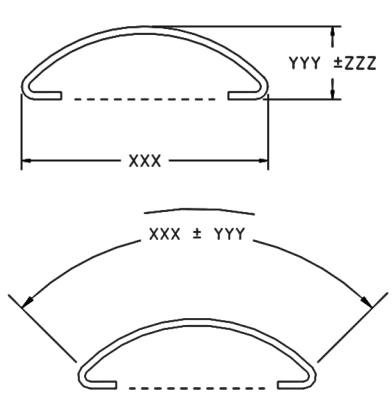
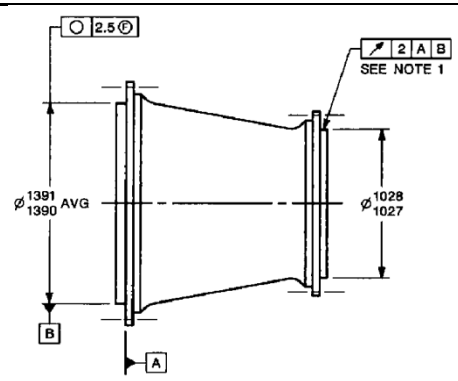
Il existe des standards nationaux et internationaux comme la norme ASME Y14.5 (2009) et la norme ISO 10579 (2010) pour définir et établir les règles d'interprétation du tolérancement dimensionnel et géométrique sur les dessins et devis techniques (2D ou 3D). La norme ASME Y14.5 (2009) considère que, par défaut et sauf indication contraire, l'inspection des pièces doit être effectuée à l'état libre sans une force appliquée lors de l'inspection (Réf. ASME Y14.5 (2009), paragraphe 1.4 *Fundamental Rules (m)*, page 8) et que, sauf indication contraire, la forme doit être parfaite à la condition maximale de matière (principe de l'enveloppe, principe de Taylor). En plus, la norme établit des règles pour déterminer le système d'axes (XYZ) lors de l'inspection en utilisant les référentiels (*datum*). Cette condition « *par défaut* » est parfaitement adaptée pour les composants de la Zone A. En d'autres termes, les modalités d'application sont parfaitement adaptées et applicables pour les composants quasi rigides.

La norme ASME Y14.5 indique que la règle de l'enveloppe est exclue dans le cas de pièces standard et des pièces flexibles telles que les tubes, les tôles, les coques minces, les profils extrudés, les poutres structurelles et les pièces soumises à des variations géométriques à l'état libre. Et que ces composants devraient être traités différemment.

Avec toutes les possibilités que les normes du tolérancement offrent, malheureusement, il n'y a pas une méthode adaptable et applicable pour toute la panoplie des pièces de la Zone B. Nous avons recensé plusieurs parmi les plus employées dans l'industrie. (Voir tableau 0.1)

Tableau 0.1 Résumé des méthodes d'inspection de composante flexible « suite »

Méthode	Figure/Schéma	Exemples d'application
		Désavantage
Conformation par un gabarit		Pièces produites à moyens et grands volumes (automobile)
		Nécessite un gabarit de conformation fidèle à la géométrie nominale/Étalonnage du gabarit/Répétitivité du gabarit
Violation des principes d'isostatisme		Pièces à paroi mince
		Nécessite un montage spécifique et un dispositif pour produire la force nécessaire à la conformation/sensible aux choix du concepteur
Utilisation d'une force	Une note typique est ajoutée sur le dessin de définition ' <i>Il est permis d'utiliser x N/m pour atteindre la tolérance</i> ' est ajoutée sur le devis	Pièces avec de faibles déformations élastiques, pièces à paroi mince
		L'ajout d'une tolérance à l'état libre est souvent nécessaire pour limiter le niveau de déformation/problématique sur la reproductibilité des mesures
Conformation à une dimension		Métal en feuille, pièces à paroi mince
		L'ajout d'une tolérance à l'état libre est souvent nécessaire pour limiter le niveau de déformations
Tolérance relative		Pièces primaires (poutre, tube, plaque, panneau, profilé, etc.)
		Limitée pour les défauts de forme seulement. Difficile à contrôler dans le cas des profils

Méthode	Figure/Schéma	Exemples d'application
		Désavantage
Longueur d'arc (longueur curviligne)		Structure mince, métal en feuille
		Limitée aux profils générés par un rayon constant/problématique sur la reproductibilité des mesures
Utilisation des dimensions moyennes (AVG)		Structures minces, métal en feuille
		Ne valide pas les valeurs extrêmes (erreur de forme)/problématique sur la reproductibilité des mesures
Remplacement des requis	P. ex. exiger un niveau minimal de la force nécessaire pour arracher un tuyau flexible monté sur un étalon cylindrique.	Pièces moulées, tuyaux flexibles, tissus, etc.
		Une preuve de corrélation est nécessaire

Problématique industrielle

Les normes de dessins comme ASME Y14.5 (2009) et ISO 10579 (2010) supposent que l'inspection doit être effectuée à l'état libre. Ce qui n'est pas approprié lorsqu'il s'agit de pièces non rigides. Les pièces non rigides, à l'état libre, peuvent avoir une forme significativement différente de leur modèle nominal à cause de la variation inhérente du processus de fabrication, de l'effet de la gravité et des contraintes résiduelles induites par la déformation ou la force d'assemblage. Comme mentionnée précédemment, l'inspection de ces pièces requiert un gabarit de conformation spécialisé ou un montage spécifique. Ces artefacts

posent toujours des difficultés et des coûts non négligeables pour l'industrie. À titre d'exemple, le temps requis actuellement pour préparer l'inspection d'une pièce flexible (gabarit, montage, etc.) chez la compagnie Bombardier Aéronautique est d'environ 50-60 heures-hommes.

La question fondamentale de notre projet est donc la suivante : « *comment peut-on s'assurer de la qualité géométrique des pièces non rigides sans le recours à un gabarit (ou un montage) pour les conformer ?* ». En corolaire à cette première question, nous pouvons ajouter, une deuxième question : « *à partir d'un nuage de points capté dans une condition arbitraire et connue, comme peut-on identifier les défauts de fabrication sur une pièce souple ?* ». Pour résumer, il s'agit de développer **un moyen répétable et précis qui permet de séparer défauts et déformations**. Ces dernières sont attribuables essentiellement à l'effet de la gravité et à l'effet des contraintes résiduelles.

Ces questions trouvent un intérêt immédiat dans l'industrie manufacturière en général et, plus spécifiquement, dans le secteur aérospatial. Le problème du tolérancement et de l'inspection des pièces mécaniques flexibles est décisif pour cette industrie; l'automatisation de l'inspection contribue grandement à son niveau de compétitivité.

Objectifs de la recherche

Cette recherche a pour but le développement, la validation et l'application des outils mathématiques permettant à partir d'un nuage de points collectés dans un état sans gabarit spécialisé de déterminer l'amplitude et la localisation des défauts induits par les variations inhérentes dues aux procédés de fabrication.

Cette thèse propose plusieurs approches qui proposent des techniques d'identification des défauts géométriques de profil à partir d'une maquette numérique captée sur un composant déformé.

La recherche proposée contribuera à améliorer nos connaissances fondamentales et par conséquent, à faire évoluer la capacité de prédiction des modèles. L'amélioration escomptée découle du fait que nous tenterons de prendre en compte des phénomènes liés à la flexibilité, au choix des méthodes d'assemblage et aux corrélations qui y en découlent. Le projet se traduira ultérieurement par des gains transférables à l'industrie canadienne. Nous anticipons des économies découlant d'une rapidité accrue des opérations d'inspection, d'une utilisation plus efficiente des tolérances, de l'élimination des gabarits de conformation et d'une amélioration de la productivité due à la réduction du temps de cycle.

Hypothèses de travail

Après avoir exposé la problématique ainsi que l'objectif de notre thèse, nous allons émettre les hypothèses générales et communes à toutes les étapes de notre recherche.

Hypothèse 1 : La pièce à inspecter est à parois minces. Elle est donc une pièce mécanique de faible épaisseur par rapport aux dimensions globales. Sa géométrie est parfaitement définie et disponible par un fichier mathématique MATH DATA (STEP, IGES, ou tout autre format compatible). Ces pièces sont largement utilisées dans une variété d'applications d'ingénierie (structures d'aéronefs, industrie automobile, etc.).

Hypothèse 2 : Le montage, lors de la numérisation, permet des déformations élastiques semblables ou plus grandes que les tolérances de profil requises.

Hypothèse 3 : La pièce fabriquée est numérisée sur une position arbitraire mais connue. Une représentation de la pièce sous forme d'un nuage de points (x, y, z) est donc disponible.

Hypothèse 4 : L'inspection est limitée aux défauts de profil de surface et de localisation tels que définis par l'ASME Y14.5 (2009).

D'autres hypothèses sont spécifiques pour chaque chapitre-article. Chaque article est présenté comme un chapitre dans cette thèse.

Suite à l'introduction, une brève revue de la littérature et la structure détaillée de la thèse sont présentées.

REVUE DE LA LITTÉRATURE ET STRUCTURE DE LA THÈSE

La revue de la littérature situe notre travail par rapport à d'autres recherches effectuées dans le même domaine. Notre bibliographie comportera les phases typiques du processus d'inspection automatisée tridimensionnelle (Figure 0.2).

En général, le processus d'inspection automatisée comporte trois phases. La première phase représente l'acquisition des données et, si nécessaire, un post traitement de ce nuage de points (ex. la génération d'un maillage, filtrage, etc.). Dans cette phase, un nuage de points est obtenu à partir des services de numérisation 3D des profils externes des diverses pièces industrielles. La deuxième phase porte sur l'alignement du nuage de points. Dans cette phase, les données mesurées seront alignées au système référentiel du modèle conçu par l'identification des zones de concordance. La troisième phase représente le module d'identification. Le but de cette phase est de déterminer le degré de conformité entre la pièce fabriquée et le modèle nominal (amplitude des défauts, localisation, etc.).

Une revue de littérature des travaux de recherche sur l'inspection tridimensionnelle automatisée des surfaces quelconques (*Free-Form surface*) sera présentée dans le premier et le deuxième chapitre de notre thèse. Notre bibliographie comportera également les phases B et C du processus d'inspection automatisée (Figure 0.2). Dans le Chapitre 1 de la thèse (article 1), nous présentons une revue générale sur les techniques d'identification (méthodes de vérification) pour distinguer les défauts qui sont dus à des procédés de fabrication aux déformations qui sont dues à la flexibilité de la pièce. Dans le Chapitre 3 de la thèse (article 3), nous exposons une revue générale sur les différentes techniques d'alignement.

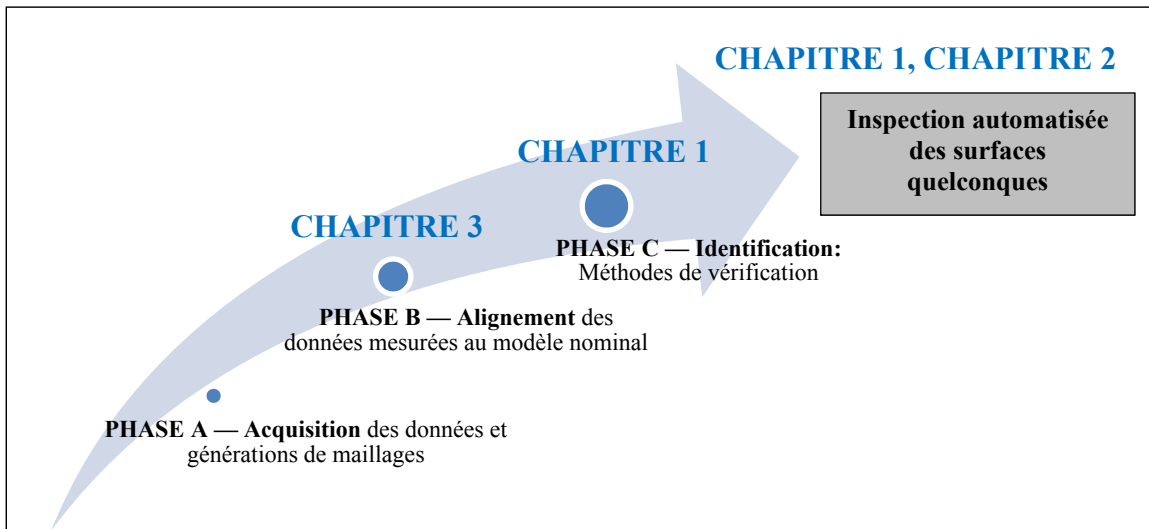


Figure 0.2 Bibliographie sur les phases typiques du processus d’inspection automatisée.

Les techniques d’alignement

De nos jours, il est d’usage d’employer un scanner laser/optique pour la métrologie dimensionnelle étant donné leur précision de mesure ainsi que leur coût abordable. Par la suite, le nuage de point obtenu doit être comparé avec le modèle nominal afin de localiser et quantifier les erreurs de forme, d’orientation et de localisation. La surface mesurée n’est pas dans le même repère que la surface nominale, d’où la nécessité d’une opération baptisée « calage », « registration » ou encore « alignement » dans la documentation scientifique. Cette opération a comme résultats une attribution *a priori* de la correspondance et/ou la transformation qui aligne un nuage de points à l’autre.

En général, il existe deux grandes catégories d’alignement : rigide et non rigide (Figure 0.3). Les méthodes de recalage rigide (en anglais, *rigid registration*) autorisent des transformations rigides uniquement (translations et rotations) et sont utilisées en général pour compenser uniquement des différences de repères d’acquisition. Ce type de transformation conserve les distances et les angles. Le nombre de degrés de liberté (DDL) est de 3 en 2D et

de 6 en 3D. L'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*) introduit par Besl et McKay (1992), est la méthode de recalage rigide la plus populaire en raison de sa simplicité et de sa faible consommation en calcul. Par contre, si le but consiste à modifier la forme globale des objets, on fait appel à des algorithmes de recalage non rigide (en anglais, *non-rigid registration*). Ces algorithmes sont caractérisés par un grand nombre de DDL et sont employés dans des applications d'imagerie (ex. imagerie médicale, animation, etc.). On peut citer dans ce cas l'algorithme CPD (*Coherent Point Drift*) introduit par Myronenko *et al.* (2010) et qui considère l'alignement entre deux nuages de points comme un problème d'estimation de la densité de la probabilité. Les différents algorithmes les plus utilisés pour les recalages rigides et non rigides ont été présentés dans le troisième chapitre de la thèse (article 3).

À noter qu'il existe également les méthodes de transformation affine (en anglais, *affine registration*). Ces méthodes autorisent, en plus des rotations et des translations, de prendre en compte un facteur d'échelle anisotrope et de modéliser des cisaillements. Ce type de transformation conserve le parallélisme. Le nombre de DDL est de 6 en 2D et de 12 en 3D.

Dans notre projet, nous ciblons la Zone B (relativement flexible) dans laquelle se trouve la majorité des pièces mécaniques. Les trois catégories de recalage ne correspondent pas à la spécificité des pièces souples situées dans cette zone. Nous devons obtenir une sorte de « *calage flexible* » qui conserve les distances curvilignes (géodésiques) tout en admettant sur la pièce souple inspectée la présence de zones de défauts de fabrication. Pour résoudre ce problème, une nouvelle approche pour l'inspection des pièces souples sans gabarits de conformation par optimisation du *Coherent Point Drift* (CPD) a été proposée dans le Chapitre 3 de cette thèse. Cette approche vise à adapter l'algorithme de transformation non rigide du CPD d'une façon à correspondre aux spécificités des pièces souples (Figure 0.3).

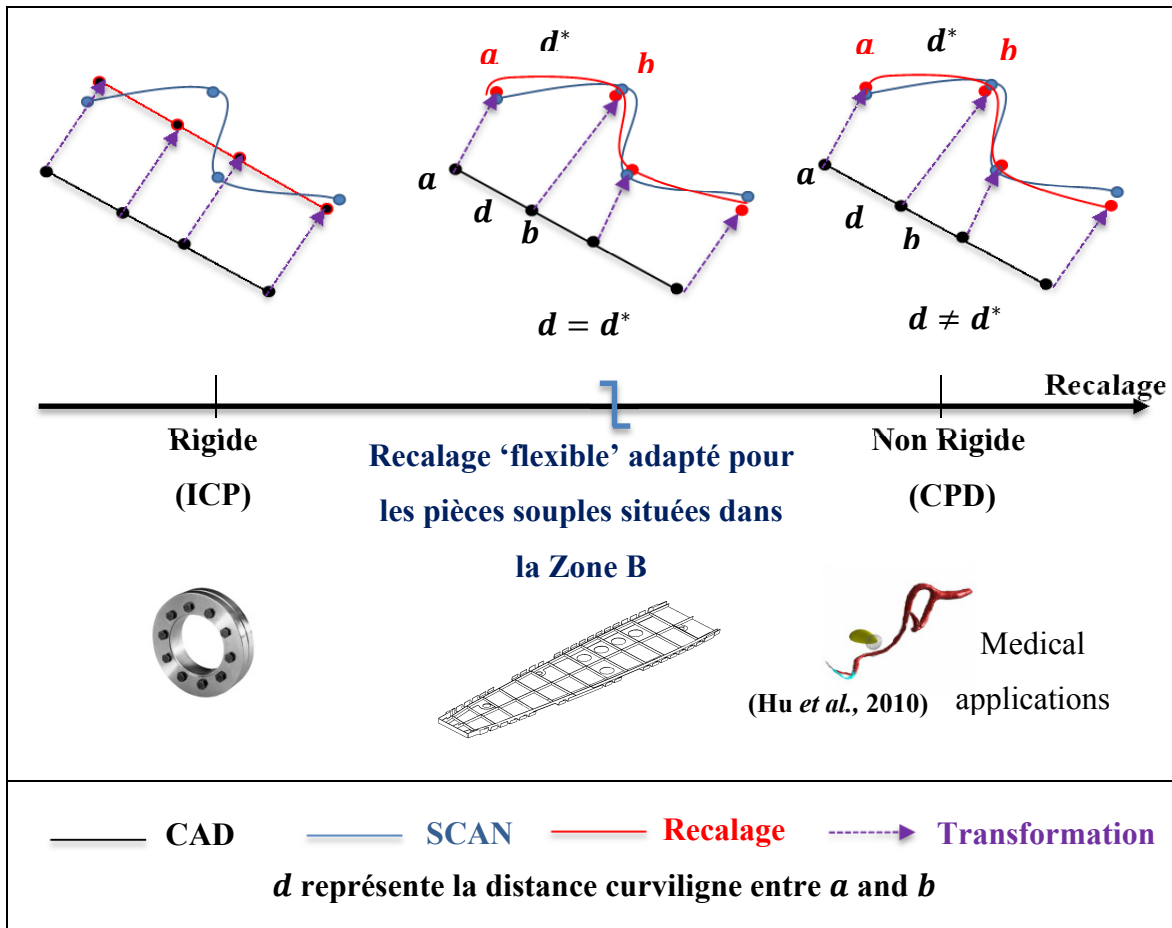


Figure 0.3 Le problème de recalage des pièces souples.

Les techniques d'identification

Après avoir aligné et cherché les correspondances entre les nuages de points de la pièce fabriquée et du modèle nominal, il est temps de déterminer le degré de conformité entre eux. D'où l'importance du choix de la technique d'identification.

Dans notre cas, les défauts dus au processus de fabrication sont considérés comme des données aberrantes qui doivent être éliminées d'une façon dynamique et itérative tout en respectant un seuil d'identification à déterminer. Ces défauts doivent être distingués des déformations qui sont dues à la flexibilité de la pièce et sont de même ordre de grandeur que

les tolérances de profil assigné. Une revue de littérature portant sur les différentes techniques d'identification est présentée dans le paragraphe 1.3 du Chapitre 1.

Dans notre projet, nous proposons l'utilisation des statiques extrêmes comme module d'identification. Dans le premier chapitre, nous utilisons le *Maximum Normed Residual Test* développé par Grubbs (1969). Dans le deuxième et troisième chapitre, nous proposons l'utilisation de la méthode *Thompson Test* qui sera combinée avec l'estimateur *Biweight* qui permet l'estimation de la moyenne et de la variance des données (Thompson, 1985; Hoaglin, 1983).

Structure de la thèse

La suite de cette thèse (figure 0.4) comporte trois (3) chapitres et une conclusion suivit des recommandations. En Annexe, nous présentons le développement d'une interface graphique (GUI) et les résultats du stage qui a été effectué chez Bombardier Aéronautique (Usine St-Laurent, Montréal, QC).

Les contributions de cette thèse sont obtenues à travers de la rédaction de trois (3) articles de revues, la participation à six (6) conférences et le développement d'une interface graphique (GUI) et d'une banque d'étude de cas expérimentale. Le tableau 0.2 récapitule les références bibliographiques des conférences et les articles de revues sont présentés dans les trois (3) prochains chapitres.

Tableau 0.2 Références bibliographiques des conférences, période : 2010-2014 « suite »

<p>Hangzhou, CHINA CIRP CAT MAY, 2014</p>	<p>Aidibe, A., Tahan, A. (2014). « The Coherent Point Drift Algorithm Adapted for Fixtureless Metrology of Non Rigid Parts ». <i>13th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing (CAT 2014) will be held in Hangzhou, China, on May 11th-14th, 2014.</i></p>
<p>Montréal, CANADA SAE SEPTEMBRE 2013</p>	<p>Aidibe, A., Tahan, A. (2013). « A Robust Iterative Displacement Inspection algorithm for Quality Control of Aerospace Non-Rigid Parts without Conformation Jig ». <i>SAE 2013 AeroTech Congress & Exhibition, September 24-26, 2013, Montréal, Canada.</i></p>

<p>Dubai, UAE ICMST AUGUST 2013</p>	<p>Aidibe, A., Tahan, A. (2013). « An Inspection Approach for Nonrigid Mechanical Parts ». <i>International Conference on Manufacturing Science and Technology ICMST 2013, Advanced Materials Research Trans Tech Publications, vols. 816-817, pp 806-811.</i></p>
<p>Wisconsin, USA ASME JUNE 2013</p>	<p>Aidibe, A., Tahan, A. (2013). « Curvature estimation for metrology of nonrigid parts ». <i>Proceedings of the ASME2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2013, June 10-14, 2013, Madison, Wisconsin, USA.</i></p>
<p>Corfu Island, Greece WSEAS JULY 2011</p>	<p>Aidibe, A., Tahan, A., Abenhaim, G.N. (2011). « Dimensioning control of non-rigid parts using the Iterative Displacement Inspection with the maximum normed residual test ». <i>Proceeding of the 2nd International Conference on Theoretical and Applied Mechanics 2011, TAM'11, July 15, 2011 – July 17, 2011, Corfu Island, Greece, World Scientific and Engineering Academy and Society.</i></p>
<p>Montréal, CANADA CASI APRIL 2011</p>	<p>Aidibe, A., Tahan, A., Abenhaim, G.N. (2011). « Improving the Iterative Displacement Inspection (IDI) for Aeronautics Flexible Part ». <i>58th CASI Aeronautics Conference - AERO 2011 - at the Delta-Centre Ville in Montreal, Quebec, Canada, April 26, 27 and 28.</i></p>

Deux approches ont été développées par l'équipe de recherche qui travaille sous la supervision du professeur Tahan dans le cadre du projet de l'inspection des pièces flexibles sans un gabarit de conformation. La première approche a été proposée par G.-N. Abenhaim dans le cadre de sa maîtrise en génie mécanique à l'École de technologie supérieure (ÉTS). Abenhaim et Tahan (2011) ont publié l'algorithme *Iterative Displacement Inspection (IDI)* qui consiste à appliquer une déformation au modèle nominal afin que celle-ci se rapproche de la géométrie de la pièce numérisée. La deuxième approche a été proposée par Hassan-Radvar Esfahlan, dans le cadre de son doctorat en génie mécanique à l'ÉTS. En fusionnant les technologies existantes de la géométrie métrique et informatique avec les méthodes des éléments finis, Esfahlan et Tahan (2012) ont développé l'algorithme *Generative Numerical Inspection Fixture (GNIF)*. Dans le cadre de notre thèse de doctorat, une amélioration du module d'identification de l'IDI a été proposée dans le Chapitre 1 et une nouvelle méthode pour la quantification de la flexibilité/rigidité a été développée dans le Chapitre 2. En plus, deux nouvelles approches pour l'inspection des pièces flexibles sans gabarit de conformation ont été développées dans les Chapitres 2 et 3 de cette thèse.

Comme mentionné précédemment, l'article du Chapitre 1 propose une amélioration du module d'identification de l'algorithme *Iterative Displacement Inspection* (IDI). Cet article a été publié dans la revue *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics* sous la référence: Aidibe, A., Tahan, A., Abenhaim, G.N. (2012). « *Distinguishing profile deviations from a part's deformation using the maximum normed residual test* ». *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, vol. 7, n° 1, p. 18-28.

L'article du Chapitre 2 présente une nouvelle méthode pour la quantification de la flexibilité/rigidité à l'aide d'un ratio (R) et représente les résultats sur une échelle logarithmique. Également, on présente une nouvelle approche pour l'inspection des pièces souples sans gabarit de conformation basée sur l'estimation de la courbure gaussienne, une des propriétés intrinsèques de la géométrie qui est invariante sous les transformations isométriques. Cette approche considère les défauts dus aux processus de fabrication comme des données aberrantes qui doivent être détectées d'une façon dynamique et itérative. Pour cet effet, on propose une technique d'identification basée sur les statistiques extrêmes (*Thompson-Biweight*) pour séparer les défauts dus au processus de fabrication, des déformations dues à la flexibilité de la pièce. Cette méthode fonctionne bien dans le cas des défauts de profil d'ordre 1 (ex. bosses) et d'ordre 2 (ex. défaut d'ondulation). Cet article intitulé « *Inspection of Deformable Bodies using Curvature Estimation and Thompson-Biweight Test* » a été publié dans la revue *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, n° 9-12, p. 1733-1747 – Springer London.

L'article du Chapitre 3 présente également une nouvelle approche complémentaire à celle du deuxième article. En plus des défauts de profil, cette approche permet l'identification et la quantification du défaut de localisation (par exemple, un trou qui n'est pas à sa bonne place). Cette approche consiste à adapter le puissant algorithme de recalage non rigide *Coherent Point Drift* à ce dont il satisfait les spécifications des pièces mécaniques souples. Cet article intitulé « *The Coherent Point Drift Algorithm Adapted for Fixtureless Dimensional Inspection of Deformable Bodies* » a été soumis pour publication.

À la fin de la thèse, nous présentons une conclusion qui récapitule les contributions apportées dans le cadre de notre étude doctorale ainsi que nos principales recommandations pour des recherches futures.

En Annexe, nous allons présenter deux interfaces graphiques (GUI). La première, pour manipuler la banque d'étude de cas expérimentale qui a été développée lors du stage effectué chez la compagnie Bombardier aéronautique durant la session d'hiver de l'année 2013. La deuxième interface pour représenter les approches développées dans le cadre du projet CRIAQ-MANU501. Ces interfaces seront disponibles pour la communauté scientifique dans un but de partage, de comparaison (*Benchmarking*).

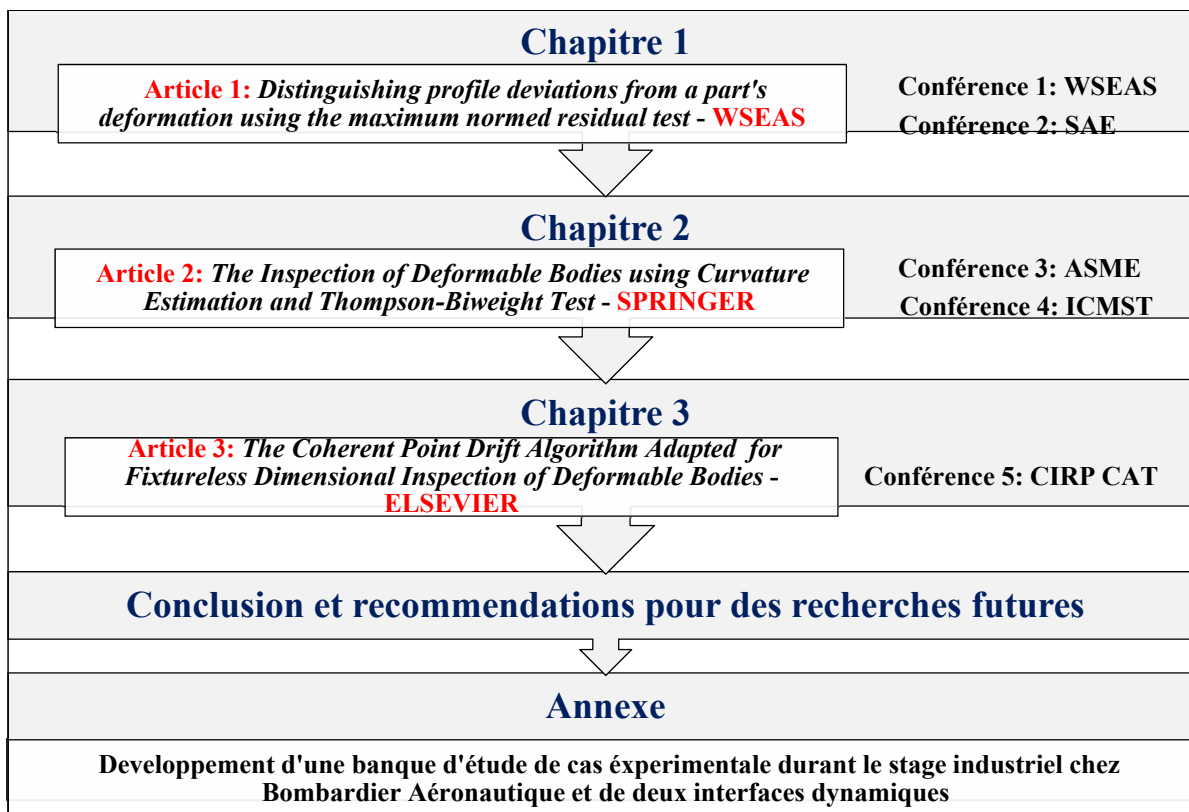


Figure 0.4 Structure de la thèse.

CHAPITRE 1

DISTINGUISHING PROFILE DEVIATIONS FROM A PART'S DEFORMATION USING THE MAXIMUM NORMED RESIDUAL TEST

Ali AIDIBE, Antoine S. TAHAN, Gad N. ABENHAIM,
Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS)
1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C1K3

This chapter has been published in the “WSEAS TRANSACTIONS on APPLIED and
THEORETICAL MECHANICS”, Volume 7, January 2012, Pages 18-28.

1.1 Abstract

Nonrigid parts, in *free-state*, may have a considerable different shape than their nominal model due to dimensional and geometric variations of the manufacturing process, gravity loads and residual stress induced distortion. Therefore, sorting profile deviation from a part's deformation by comparing the part's nominal shape to its scanned *free-state* shape is a challenging task. This task is a key step in the Iterative Displacement Inspection (IDI) algorithm used for the inspection of non-rigid parts without the use of costly specialized fixtures. This paper proposes the use of the statistical maximum normed residual test to improve the aforementioned identification task. Thirty two simulated manufactured parts are studied to show that the proposed method reduces the type I and II identification errors of the IDI method.

Key-Words:

Rigid registration, non-rigid registration, quality control, tolerancing, inspection, metrology, non-rigid parts, deformation, Geometric dimensioning and tolerancing (GD&T).

1.2 Introduction

One of the important tasks that have to be taken into consideration in the industry is the inspection of manufactured parts. At the end of the manufacturing process we must verify if the produced part respects the functional requirements under a given tolerance. The problem of the dimensional and geometric variations (GD&T) on mechanical components has been studied by many researchers in the case of rigid parts. Despite those researches there still no viable solutions in the case of non-rigid parts. Non-rigid parts, in free- state, may have a different form than their CAD model due to inherent variations of the manufacturing process, gravity loads, residual stress induced distortion, and/or assembly force. Specifically, the inspection of such parts poses difficulties and has significant costs industries because they need specialized fixtures. Therefore Automatic inspection becomes essential.

This paper proposes a method enabling the distinction between the geometrical defects due to an error in the manufacturing process and the deformations due to the flexibility of the parts in the case of thin shells during the inspection process. The distinction allows for the detection of profile variations without the need of conformation jig. Figure 1.1 illustrates an example of a conformation jig used in the inspection of an automotive body part. Extending the work of Abenhaim and Tahan (2011) on the inspection of non-rigid part, this paper focuses on the identification module of the iterative displacement inspection (IDI) method proposed by the latter with the following assumptions:

- The part to inspect is a quasi-constant thin shell.
- In a free-state, the manufactured parts elastic deformation is greater than the tolerances required profile.
- The defects are not distributed all over the part. In other words, they are localized.
- Inspection is limited to the defects in the surface profile as defined by ASME Y14.5-2009.



Figure 1.1 Inspection of non-rigid part using a jig –
Source: Volvo, PREVOST Car.

Firstly a short background research is presented. Afterward, the general methodology is exposed in order to focus on the implementation of statistical maximum normed residual test on the IDI algorithm. Finally, the implementation and evaluation of the proposed approach are tested on many case studies representing typical parts in the transport industry.

1.3 Background

A part is considered 'non-rigid' if the typical value of the deformation resulting from applying a force of 15 – 20 *lbf/linear foot* is more than 10% of its assigned profile tolerance. The value of force is dictated by what is commonly used in a manual assembly line. With this definition, many types of parts in aeronautics and the automotive industry can be grouped. For example, the wallboard (Skin), pieces of thin-walled structure (spar, ribs, etc...) and components for the interior finish of such planes as shown in Figure 1.2. The quality control of such parts requires a special approach. As mentioned previously, jigs and fixtures are needed to constrain dedicated and follow the component during the inspection. Therefore the aim of our research is to identify the magnitude and location of defects induced by the

inherent variation manufacturing processes, from a cloud of points collected in a condition without specialized fixtures.

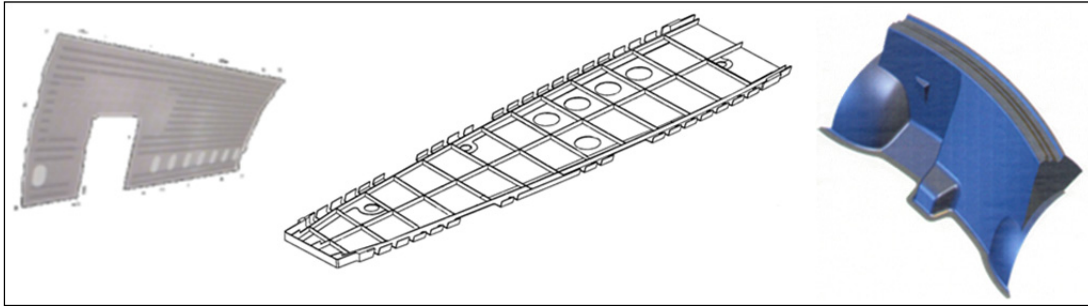


Figure 1.2 Examples of non-rigid parts in the aerospace industry.

Abenhaim and Tahan (2011) developed IDI algorithm. The IDI allows for the surface profile inspection of a non-rigid part without the need of a specialized jig. The method works through a comparison of two sets of points, one from the mesh of the CAD model and one from the scanned manufactured part, despite the significant difference in their respective geometries. The method outlined operates by iteratively deforming smoothly the CAD mesh until it matches the scanned part without profile deviation or measurement noise (Figure 1.3). This matching process is made possible with the introduction of the identification method, which enables the effects of profile deviations to be distinguished from the deformations due to the positioning of the part and its flexibility. This work focuses on improving the IDI identification techniques to distinguish between the defaults and the deformations.

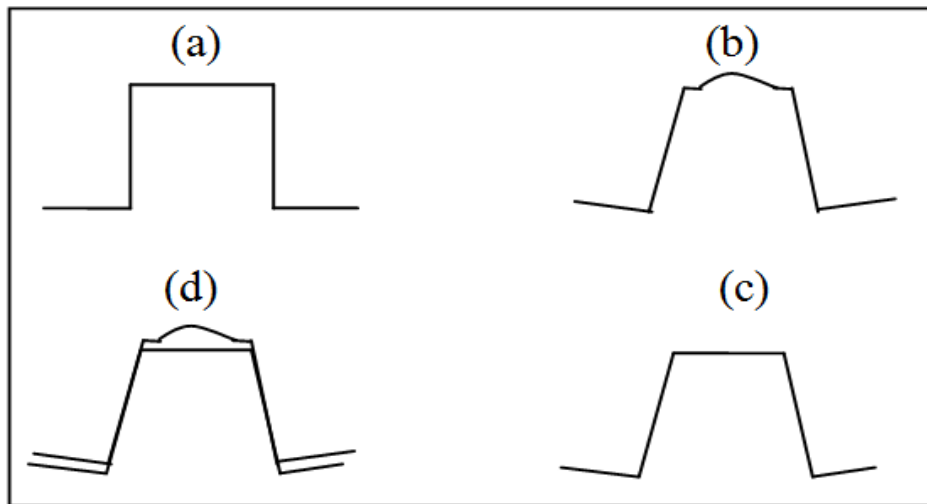


Figure 1.3 The concept of the inspection of non-rigid parts:
(a) CAD, (b) Free State (with deformations and defects)
(c) CAD deformed (d) Profile deviations.

The state of the art in machine vision inspection research and technology has been presented recently by Malamas *et al.* (2003). They classified the contemporary applications in the industry according to their measured parameters (i.e. Dimensions, surface, assembly and operation) and to their degrees of freedom. After the removal of manufacturing forces, flexible part could be subjected to significant distortion. This free-state variation is principally due to weight and flexibility of the part and the release of internal stresses resulting from fabrication. The inspection of freeform surfaces belonging to non-rigid parts has been presented by Ascione and Polini (2010). In their work, they proposed a fixture assembly methodology that enables both to simulate the mating part interface and to locate the part in coordinate measuring machines working volume. Then, they used a method for the evaluation of the actual surface with respect to its nominal model based on their Euclidean distance. Finally, a method based on a finite element analysis was proposed to evaluate the effects of the measuring force, induced by the touch probe on the inspected surface, on the measurement results. For the alignment of deformable parts that do not require any fixtures, Weckenmann *et al.* (2006) as well as Jaramillo *et al.* (2009) proposed an approach based on a finite element method to obtain a physical deformation of the original CAD model, and radial basis functions to approximate this deformation faster and in real-time, opening the door to

on-line inspection of deformable parts. Yadong and Peihua (2004) provided a comprehensive literature review of methodologies, techniques and various processes of inspections of parts with free-form surfaces. They discussed the profile verification techniques for free-form surface inspection by and without datums. The inspection of free-form surfaces includes two major processes: (1) the localization of measurement data to design coordinate system based on the datum reference information or a number of extracted surface features; and (2) the further localization based on the surface characteristics so that the deviation of the measured surface from the design model is minimized. Caulier (2010) proposed a general free-form stripe image interpretation approach on the basis of a four step procedure: (i) comparison of different feature-based image content description techniques, (ii) determination of optimal feature sub-groups, (iii) fusion of the most appropriate ones, and (iv) selection of the optimal features. She applies this technique to a broader range of surface geometries and types, i.e. to free-form rough and free-form specular shapes. Caulier and Bourennane (2008) proposed a general free-form surface inspection approach relying on the projection of a structured light pattern and the interpretation of the generated stripe structures by means of Fourier-based features. Lin *et al.* (2008) explored automated visual inspection of surface defects in a light-emitting diode (LED) chip by applying wavelet-based principal component analysis (WPCA) and Hotelling statistic (WHS) approaches to integrate the multiple wavelet characteristics. The principal component analysis of the WPCA and the Hotelling control limit of WHS individually judge the existence of defects. Cristea (2008) presents aspects of the design of an intelligent modular inspection system. This system consists of grouping the parts based on the relation between dimensional inspection process characteristics and modular design of all inspection equipments with a high universality and flexibility degree. Figure 1.4 summarizes the principal researchers who have worked on this subject.

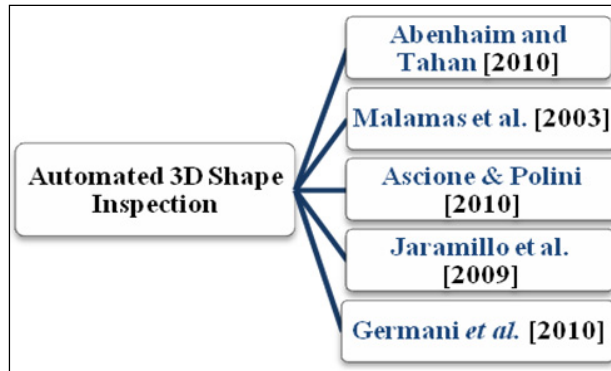


Figure 1.4 Automated 3D shape inspection (Background).

In our proposed method, the defects are identified as outliers of the Euclidian distance by an iterative method. A literature review about outliers' identification methods is presented in this section. Hawkins (1980) define an outlier as an observation that deviates so much from other observations as to arouse suspicions that it was generated by a different mechanism. Fagarasan (2008) provides a comparison between different methods of fault detection and some examples of the fault detection and identification procedure for industrial processes. Aggarwal and Yu (2005) developed a method for outlier detection especially suited to very high dimensional data sets by using the evolutionary search technique. Angiulli and Fassetti (2010) proposed a method for detecting distance-based outliers in data streams under the sliding window model. The novel notion of one-time outlier query is introduced in order to detect anomalies in the current window at arbitrary points-in-time. Breunig *et al.* (2000) assigned to each object a degree of being an outlier. This degree is called the local outlier factor (LOF) of an object (Identifying density-based local outliers). It is a local in that the degree depends on how isolated the object is with respect to the surrounding neighborhood. Hsiao *et al.* (2009) developed an efficient algorithm which converts outlier problem to pattern and relative deviation degree (RDD) problem. They present a new mechanism to distinguish outliers from the remainder in univariate dataset. Knorr *et al.* (1999) proposed finding strongest and weak outliers and their corresponding structural intensional knowledge. In 2001, they proposed a robust space transformation called the Donoho-Stahel estimator to support operations such as nearest neighbor search, distance-based clustering and outlier

detection. Koufakou and Georgiopoulos (2010) presented a fast distributed outlier detection algorithm for mixed attribute datasets that deals with sparse high-dimensional data. The algorithm called outlier detection for mixed attribute datasets (ODMAD) identifies outliers based on the categorical attributes first, and then focuses on subsets of data in the continuous space by utilizing information about these subsets from the categorical attribute space. Lateki *et al.* [2007] presented an outlier detection framework that is closely related to statistical non parametric density estimation methods with a variable kernel to yield a robust local density estimation. Outliers are then detected by comparing the local density of each point to the local density of its neighbors. Li and Kitagawa (2008) took an Example-Based approach based on the notion of the distance based (DB) Outliers and examine behaviors of projections of the outlier examples in high dimensional datasets. To address the problem with the curse of dimensionality, they employed a Subspace-Based method to bring down the dimensionality of detected spaces. Thus, they proposed a method whose central ideas are making the best of users' examples to omit boring predefined parameters. They did so by detecting an optimal subspace where these examples perform more abnormal behaviors than in others, and picking out outliers having similar characteristics to examples. Limas *et al.* (2004) proposed a method of outlier detection and data cleaning for both normal and non-normal multivariate data sets. This method named the PAELLA algorithm is based on an iterated local fit without a priori metric assumptions. They proposed a new approach supported by a finite mixture clustering which provides good results with large data sets. Because the relationship between the samples and the extreme values in a data set is so dependent upon the distributional properties of the data set in question. Mingxi and Jermaine (2009) considered the problem of estimating the extreme values in a data set by looking at a small number of samples from it by devising a Bayesian framework that uses previously observed queries to make a statistically rigorous guess as to the type of query that is currently under consideration. Sarker and Kitagawa (2005) used the definition of the distance-based outlier detection proposed by Knorr (1999) and proposed a distributed algorithm for detecting outliers for shared nothing distributed systems. The algorithm finds top n outliers in its rank based on the distance of a point to its k^{th} nearest neighbor. Rehm *et al.* (2007) presented a method to estimate the noise distance in noise clustering based on the

preservation of the hyper volume of the feature space. The main purpose of noise clustering is to reduce the influence of outliers on the regular clusters. Zhang *et al.* (2009) proposed a technique named stream projected outlier detector (SPOT), equipped with incrementally updatable data synapses, to deal with the problem of projected outlier detection in high-dimensional data streams.

1.4 Methodology

Let $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n | s_j \in \mathbb{R}^3\}$ be a set of N_S nodes representing the meshed CAD model and $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m | p_j \in \mathbb{R}^3\}$ be a set of $N_P | N_P \gg N_S$ nodes representing the scanned part. After the pre-alignment, a `dsearchn` function in Matlab® based on Quickhull (Barber *et al.*, 1996) is used to find the closest point $C = \{c_1, c_2, c, \dots, c_n | c_j \in \mathbb{R}^3\}$ in P to S .

As mentioned previously, in our proposed method, the defects are identified as outliers of the Euclidian distance by an iterative method. To illustrate this idea, Figure 1.5 presents an example of the outliers identified as defects by the IDI algorithm after 150 iterations. This identification has been performed by using a threshold defined by the user. In order to eliminate the user interaction, this research proposes the use of the statistical maximum normed residual test.

By the definition, the maximum normed residual test (also known as the Grubbs test, 1969) consists of:

- Detecting outliers in univariate data.
- Assuming data come from a normal distribution.
- Detecting one outlier at a time, removing the outlier, and repeating.
- H_0 : There is no outlier in data, H_A : There is at least one outlier.

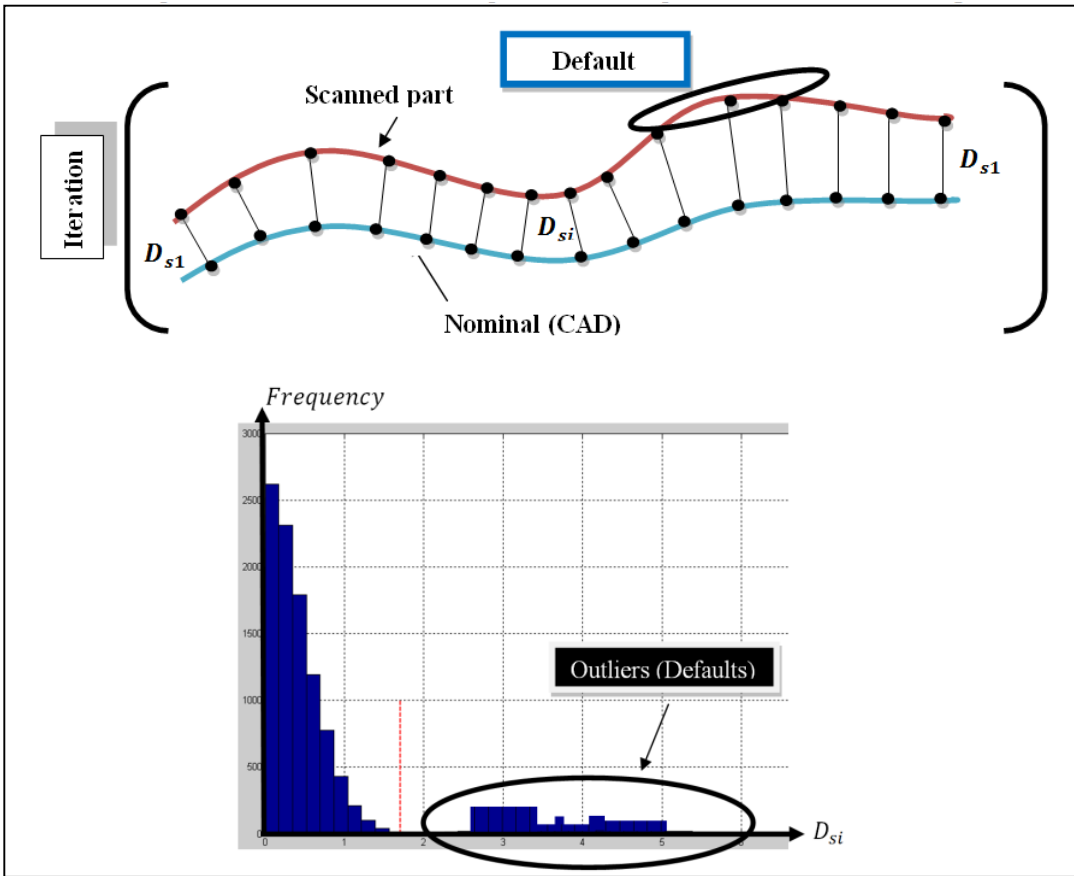


Figure 1.5 Outlier detection - D_{si} : Projection of the distance $s_i - c_i$ on the normal n_{si} .

The test is based on the difference of the mean of the sample and the most extreme data considering the standard deviation s as shown in (1.1).

$$G = \frac{\max|x - \bar{x}|}{s} \tag{1.1}$$

Reject H_0 if:

$$G > \frac{N - 1}{\sqrt{N}} \sqrt{\frac{t_{(\bar{\alpha}/2N, N-2)}^2}{N - 2 + t_{(\bar{\alpha}/2N, N-2)}^2}} = G_{critical} \tag{1.2}$$

With $t_{(\bar{\alpha}/2, N-2)}^2$: Critical value of the t -distribution with $(N - 2)$ degrees of freedom and a significance level of $\bar{\alpha}/2$ used to compute the confidence level.

In our case, we use an alpha $\bar{\alpha}$ of 0.05 that indicates a 95 percent confidence level. In this work, the maximum normed residual test is implemented in the identification module of the IDI (Figure 1.6) as described in the section 4.6 of Abenhaim *et al.* (2011) paper.

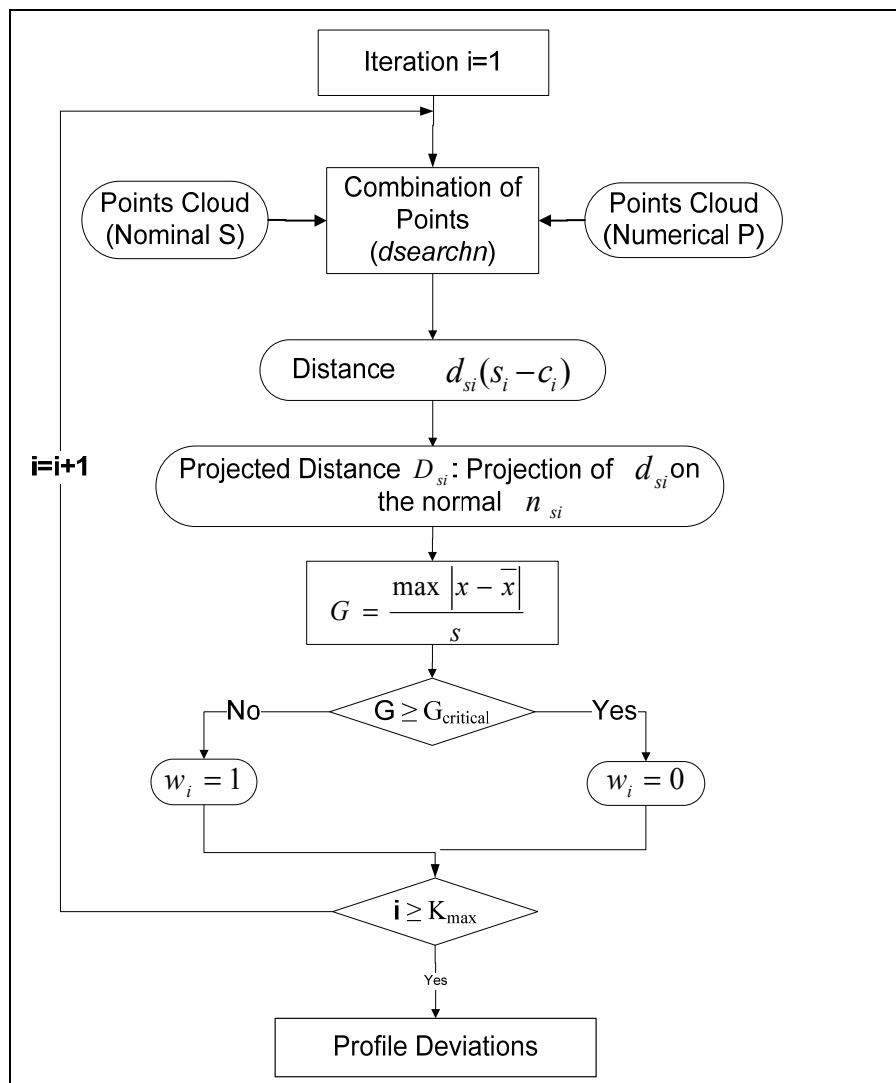


Figure 1.6 Grubbs implemented in IDI, K_{max} is the maximum iteration.

1.5 Results

In order to evaluate the performance of the new implementation, three case studies shapes representing typical non-rigid parts of transport industry are studied (Figure 1.7). All the parts are in aluminum gauge 14 (1.63 mm) with a Young modulus of $7 \times 10^{10} N/m^2$ and a density of $2700 kg/m^3$. Table 1.1 represents the parameters for the algorithm used in the case studies. In order to make the comparison between the original IDI identification method and the proposed herein, type I error (α) and the type II error (β) are used thereafter. Type I error (α) is the error of rejecting a "correct" null hypothesis(H_0), and type II error (β) is the error of not rejecting a "false" null hypothesis(H_0). In other words, α is rejecting a default when it should not have been rejected and β is failing to reject a default when it should have been rejected (β is a false detection). Assuming that the density is uniform throughout the part, the performance of the proposed method and of the IDI's identification method can be compared using a point-base metric instead of surface-base metric. In the ideal case the 2 types of errors must be equal to zero.

Analyzing Figure 1.8 to Figure 1.21 and Table 1.2 to Table 1.4, one can notice that the implementation of the maximum normed residual test has remarkably reduced the number of points with type I errors (α) and with type II errors (β) in the case of quasi constant surface (case a) compared to their original IDI identification method.

In the case of omega shape (case b) and freeform surface (case c), this implementation has slightly reduced the number of points with type I errors (α) and has remarkably reduced (only in case b) the number of points with type II errors (β) compared to their original IDI identification method.

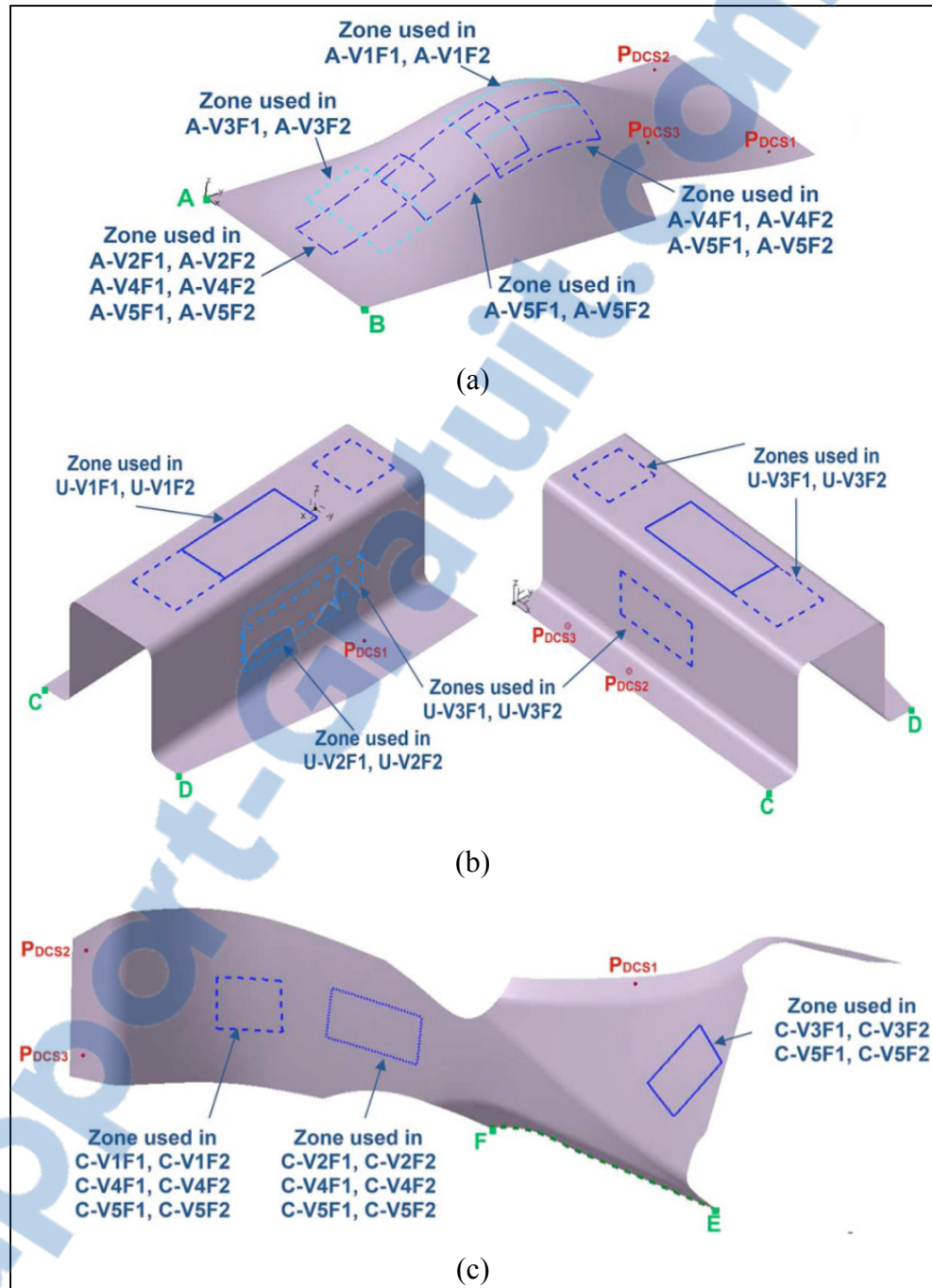


Figure 1.7 Descriptions of the case studies (a) quasi-constant surface (b) omega shape Ω (c) freeform surface (Abenham *et al.*, 2011)

Tableau 1.1 Parameters for the algorithm used in the case studies (Abenhaim *et al.*, 2011)

Simulation configuration			
Case Study	F1	F2	K_{\max}
a	2N force on point A	3N force on point A and B	150
b	10 N force on point C	5N force on point C and D	500
c	2N force on point E	10 mm displacement of curve F-E	300

In all the following figures, the red circles (\odot) represent the defaults detected and the blue squares (\square) represent the imposed defaults

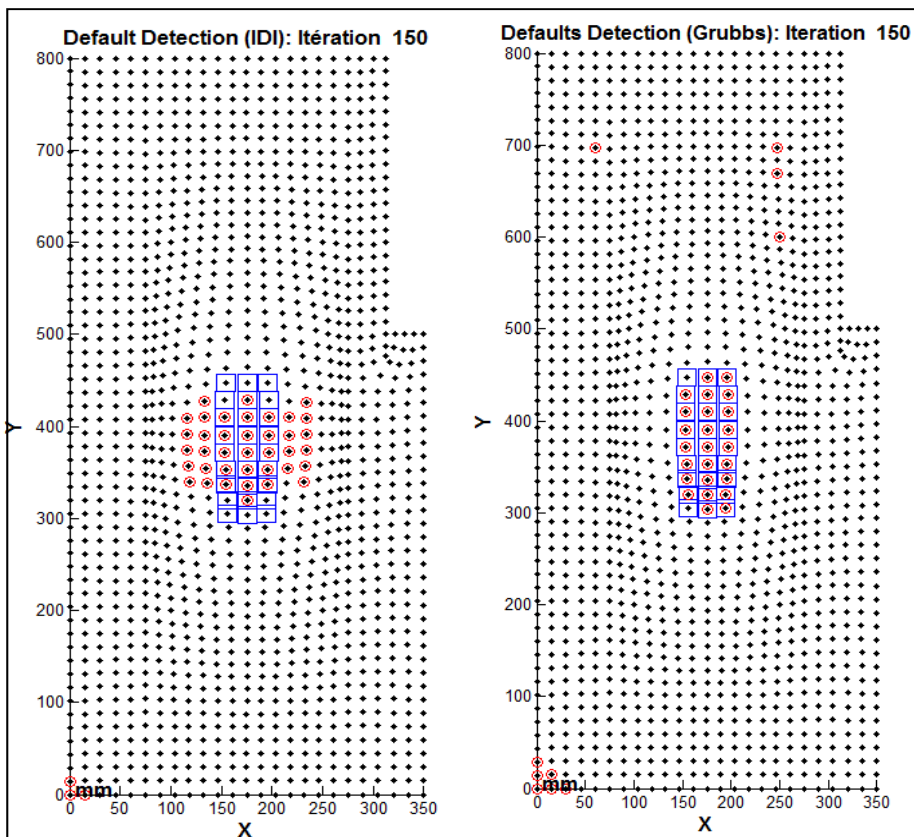


Figure 1.8 Case a-F1 / V1.

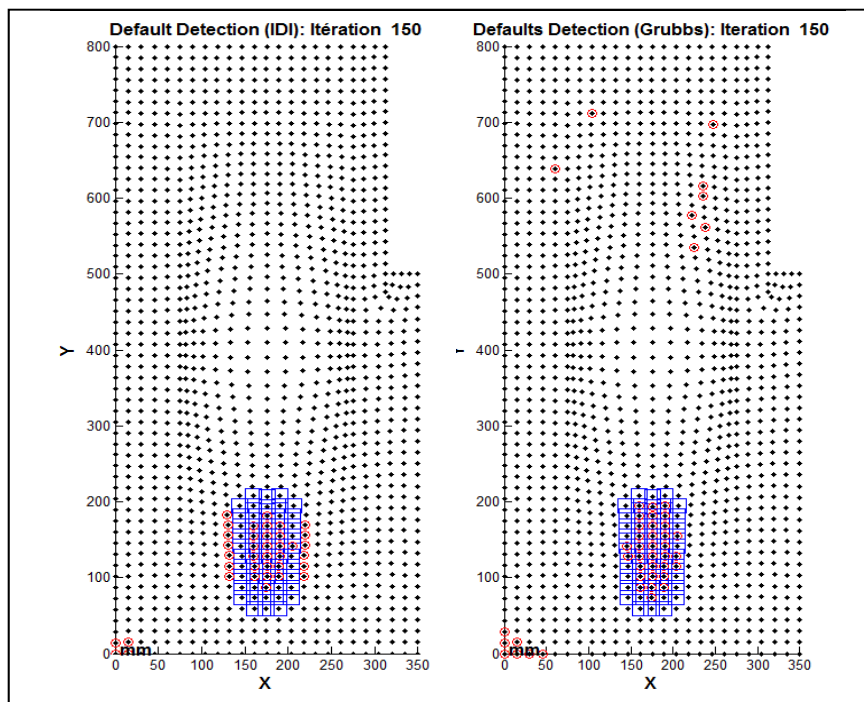


Figure 1.9 Case a-F1 / V2.

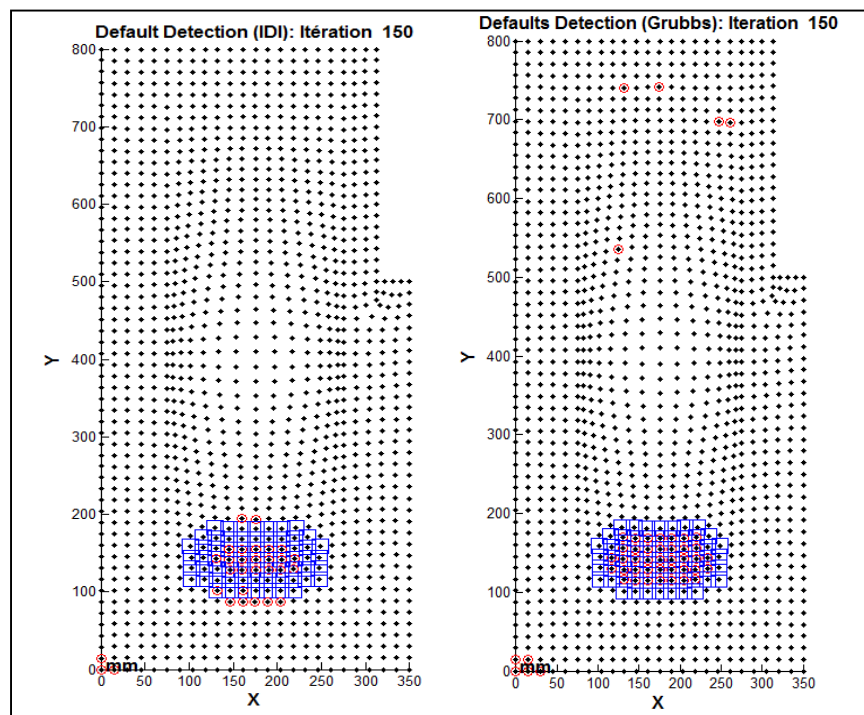


Figure 1.10 Case a-F1 / V3.

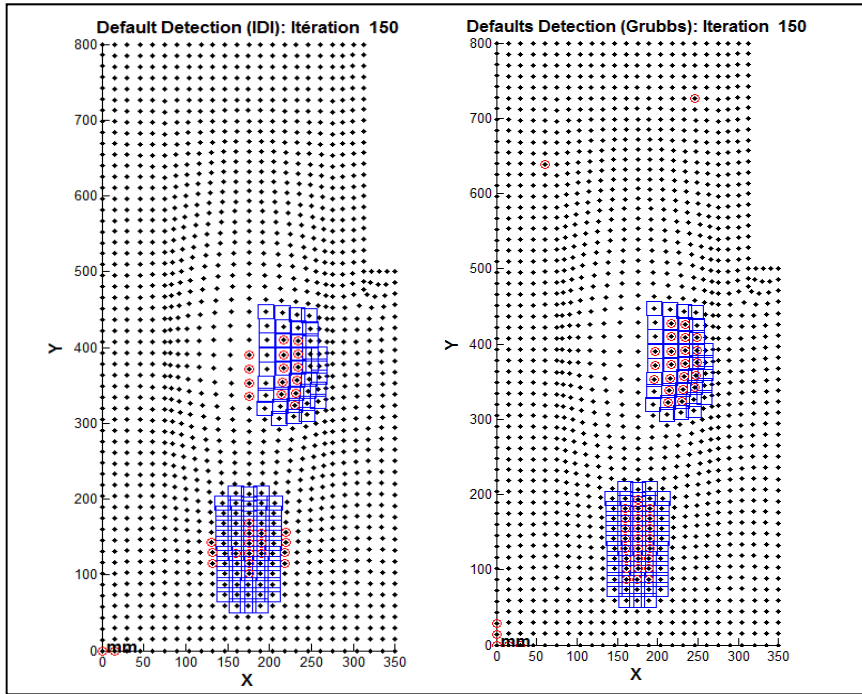


Figure 1.11 Case a-F1 / V4.

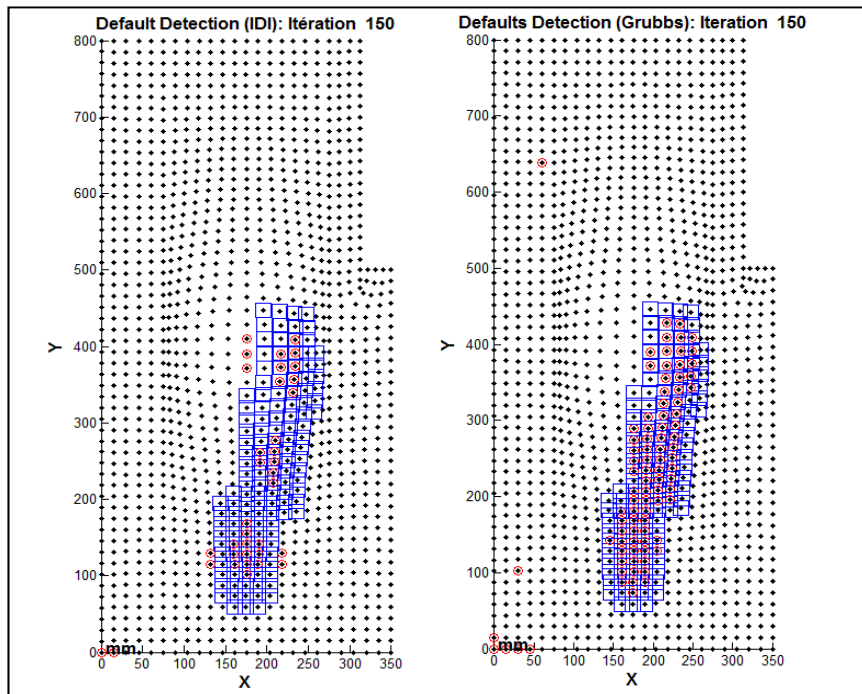


Figure 1.12 Case a-F1 / V5.

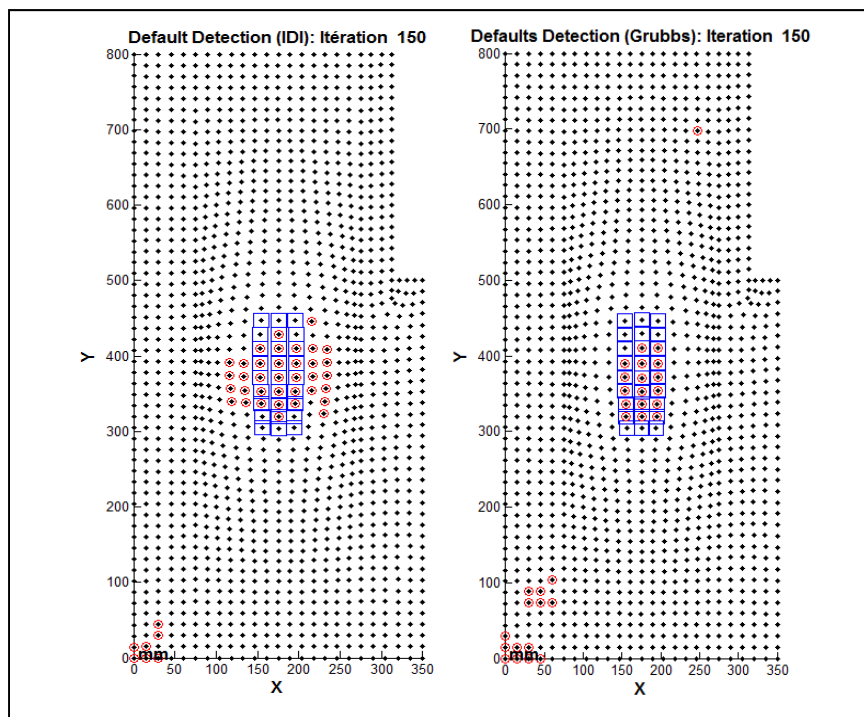


Figure 1.13 Case a-F2 / V1.

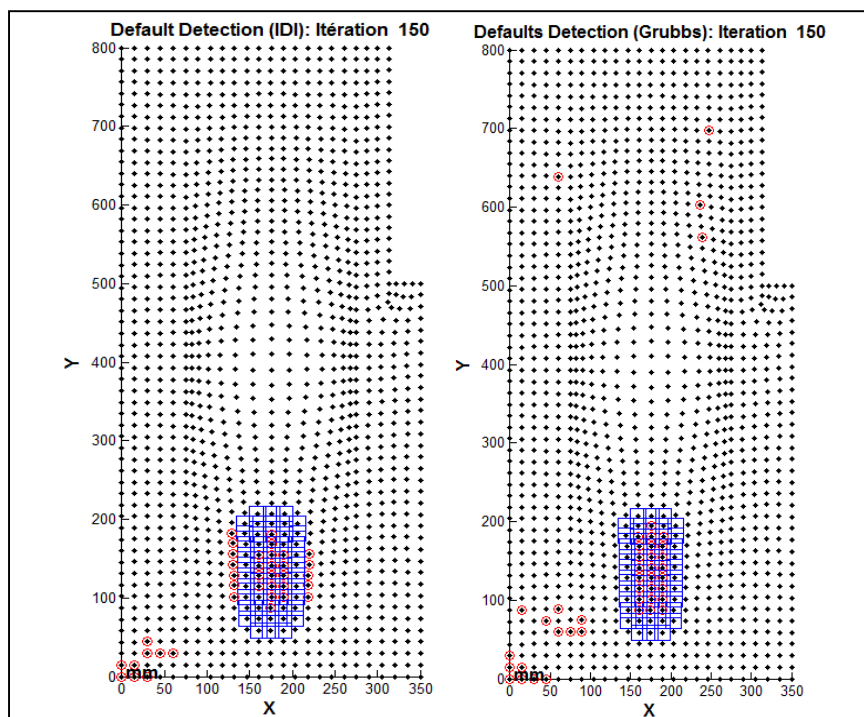


Figure 1.14 Case a-F2 / V2.

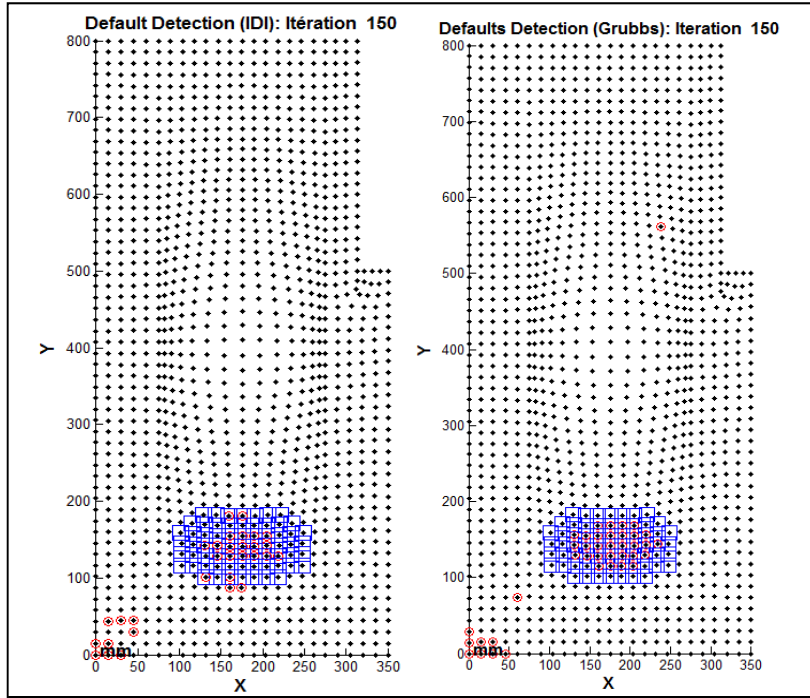


Figure 1.15 Case a-F2 / V3.

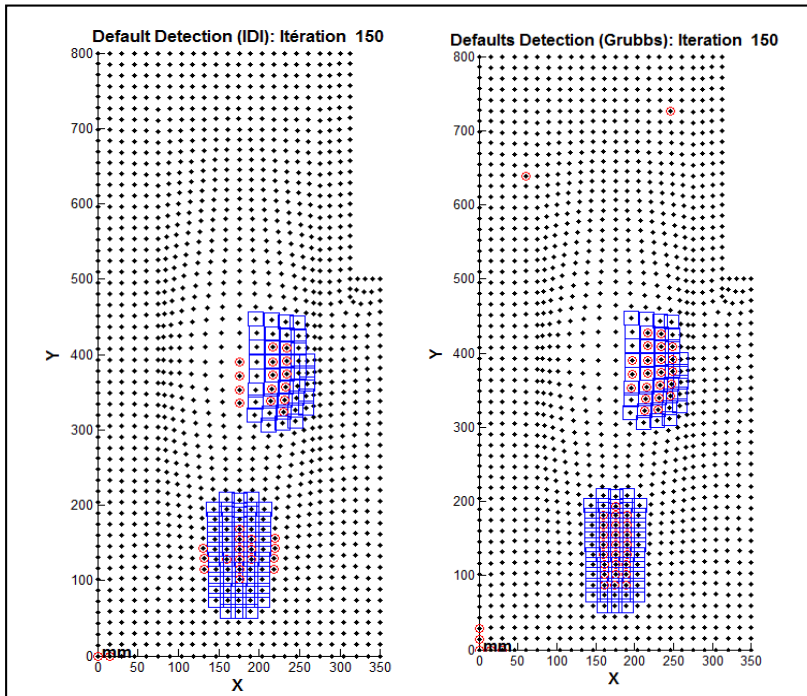


Figure 1.16 Case a-F2 / V4.

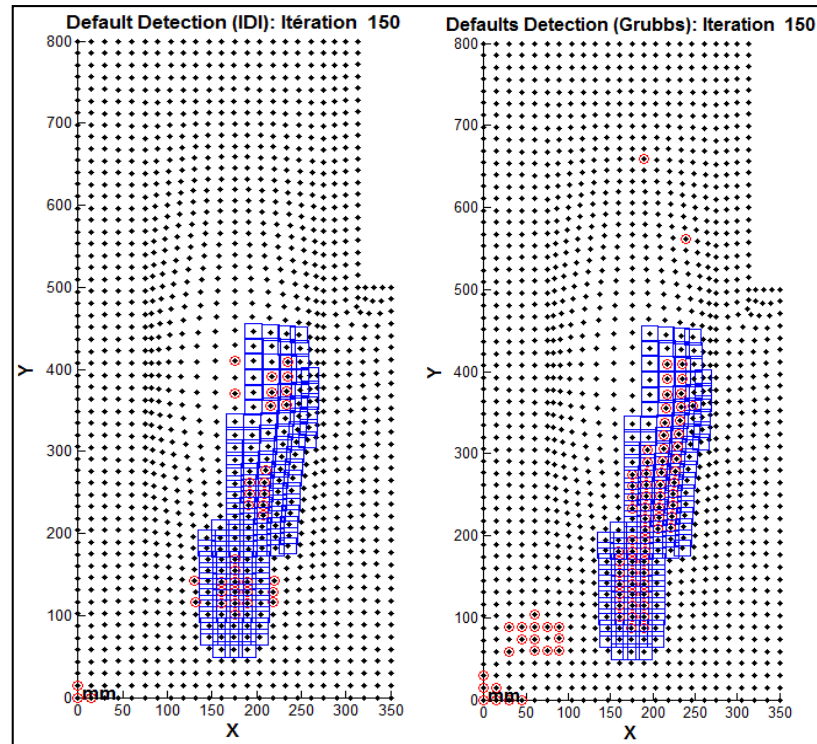


Figure 1.17 Case a–F2 / V5.

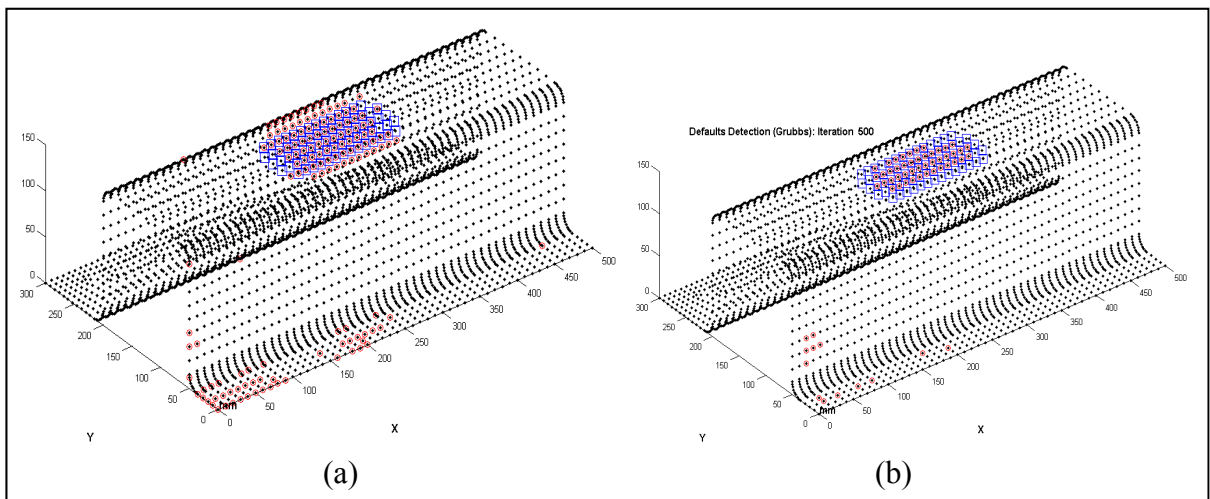


Figure 1.18 Case b–F1 Default detection: (a) V1– IDI (b) V1– Grubbs.

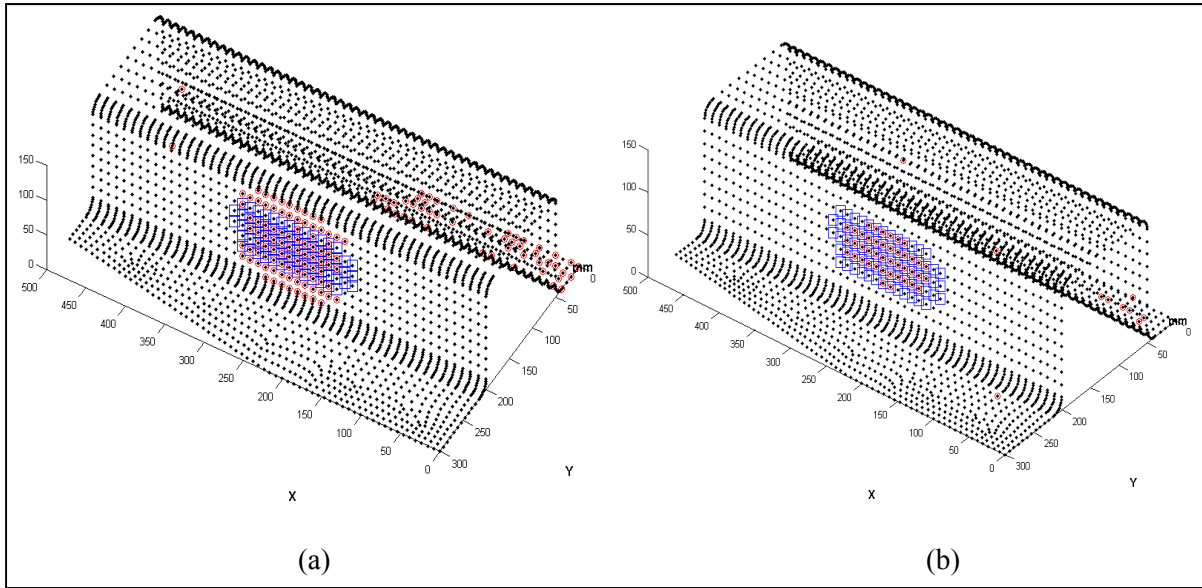


Figure 1.19 Case b-F1 Default detection: (a) V2 – IDI (b) V2 – Grubbs.

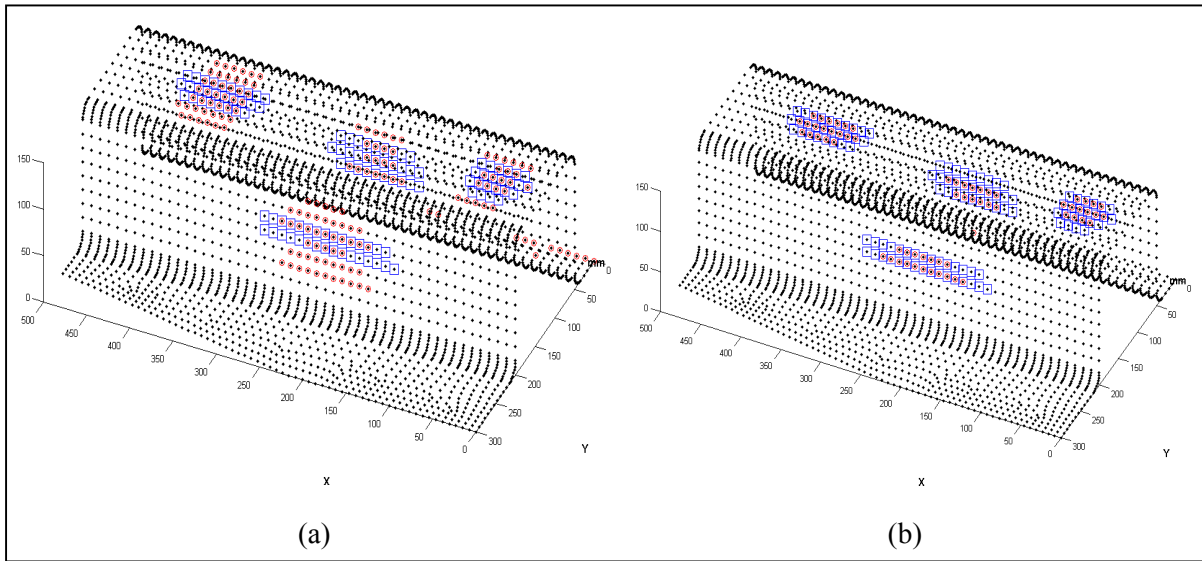


Figure 1.20 Case b-F1 Default detection: (a) V3 – IDI (b) V3 – Grubbs.

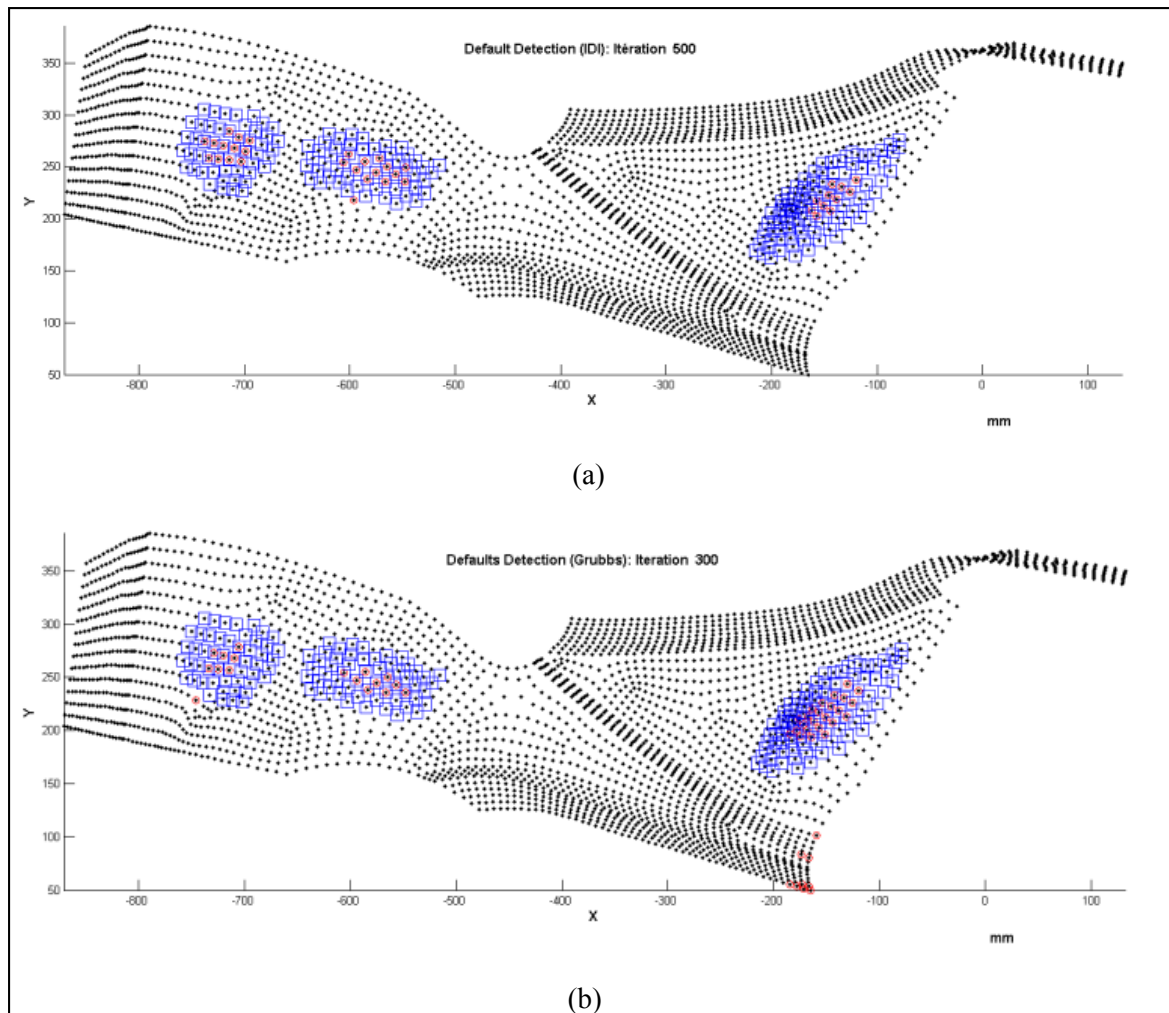


Figure 1.21 Case c-F1 (a) IDI – V5 (b) Grubbs – V5.

Another improvement compared to the original IDI identification module is that the identification threshold is not estimated by a trial and error process. Herein, the maximum normed residual test uses a constant parameter $\bar{\alpha} = 0.05$ that corresponds to $\pm\sigma \approx 95\%$ of the set.

Tableau 1.2 Type I and II errors – Case a

Case Studies		Imposed profile deviations	IDI		GRUBBS	
			Type I error (α)	Type II error (β)	Type I error (α)	Type II error (β)
a-F1	V0*	0	0	0	0	0
	V1	27	10	20	2	0
	V2	56	36	13	24	0
	V3	67	49	7	33	0
	V4	96	76	10	46	0
	V5	138	111	6	56	0
a-F2	V0*	0	0	0	0	0
	V1	27	10	20	10	6
	V2	56	40	15	31	6
	V3	67	48	5	38	1
	V4	96	71	10	59	0
	V5	138	111	6	72	0

*V0 tests are performed to ensure that the method does not induce a bias. In other words, no defects should be detected if there aren't any imposed defects in the simulation part.

Tableau 1.3 Type I and II errors – Case b

Case Studies		Imposed profile deviations	IDI		GRUBBS	
			Type I error (α)	Type II error (β)	Type I error (α)	Type II error (β)
b-F1	V0*	0	0	0	0	0
	V1	76	15	44	31	0
	V2	73	24	44	30	0
	V3	112	51	76	48	0
b-F2	V0*	0	0	0	0	0
	V1	76	28	25	21	0
	V2	73	31	22	44	0
	V3	112	62	61	60	0

Tableau 1.4 Type I and II errors – Case c

Case Studies		Imposed profile deviations	IDI		GRUBBS	
			Type I error (α)	Type II error (β)	Type I error (α)	Type II error (β)
c-F1	V0*	0	0	0	0	0
	V1	52	48	0	43	1
	V2	62	55	0	50	1
	V3	103	90	0	80	3
	V4	110	103	0	92	1
	V5	211	195	0	171	1
c-F2	V0*	0	0	0	0	0
	V1	52	48	2	40	7
	V2	62	54	1	49	1
	V3	103	82	1	73	6
	V4	110	94	1	87	2
	V5	211	184	0	171	2

1.6 Conclusion

In this paper, the problematic of the inspection of the non-rigid parts without specialized fixtures is presented. The review of the literature covering the major aspects of the problem shows that the inspection of non-rigid parts is still a real problem for the transport industry. Dealing with this problem, this paper presents implementing the maximum normed residual test in the IDI identification module followed by three case studies. Compared with the original IDI identification module, the results show that the proposed method reduces the type I and type II errors. In addition, in contrast to the IDI's identification method, the proposed method does not need a user-specified threshold based on a trial and error process. Future research is underway to validate the methodology.

1.7 Acknowledgments

The authors would like to thank the National Sciences and Engineering Research Council (NSERC) and École de Technologie Supérieure (ÉTS) for their support and financial contribution.

CHAPITRE 2

THE INSPECTION OF DEFORMABLE BODIES USING CURVATURE ESTIMATION AND THOMPSON-BIWEIGHT TEST

Ali AIDIBE, Antoine S. TAHAN,

Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS)

1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C1K3

This chapter has been published in the “International Journal of Advanced Manufacturing Technology”, Volume 71, April 2014, Pages 1733-1747 – Springer London

2.1 Abstract

Dimensioning and tolerancing standards assume inspection operation, unless otherwise specified, must be done in *Free State*. This can be problematic when dealing with compliant parts. The inspection of compliant parts needs specialized fixtures, because in *Free State* they may induce a significantly different form than their nominal model (CAD) due to inherent variations in the manufacturing process, gravity loads and residual strains. These specialized fixtures pose difficulties, bear significant costs to industry and the process is very time-consuming. To address these challenges, this paper proposes a novel method for quantifying flexibility/rigidity of the mechanical components. Subsequently, a novel approach named *IDB-CTB* is proposed to fixtureless Inspection of Deformable Bodies by Curvature estimation and Thompson-Biweight test. This approach combines the Gaussian curvature properties of manufactured compliant parts, one of the intrinsic properties of the geometry, with the Thompson-Biweight statistical test based on the extreme value notion as an identification method. The aim is to distinguish profile deviation due to the manufacturing process from a part's deformation due to its flexibility in order to determine whether the tolerance fits the CAD model or not. The *IDB-CTB* approach is tested on two sets of case studies. Three simulated, typical industrial sheet metal case studies were performed in the first set, and an experimental case study in the second one. The low percentage of errors in

defect areas and in the profile deviations estimated compared with their reference ones in most cases reflects the effectiveness of the proposed approach.

Keywords – curvature, registration, inspection, metrology, compliant, non-rigid, deformation, GD&T, fixtureless, intrinsic geometry.

2.2 Introduction

The metrology of compliant parts without specialized fixtures is a challenging task in the transportation industry especially in the aerospace and automotive fields. At the end of the manufacturing process, engineers must verify if the produced part satisfies the functional requirements under a given tolerance. Geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) standards like ASME Y14.5 (2009) and ISO 10579 (2010) consider that, by default and unless otherwise specified, the inspection of components must be made at *Free State* without applied force during the inspection. Many fixtureless inspection methods belonging to rigid parts have been published (Yadong and Peihua, 2004). In the case of compliant parts there are still no viable solutions. Due to dimensional variations, gravity loads, residual stress induced distortion and/or assembly force, compliant parts in a *Free State* condition may have a different form than their CAD models. Typically, the metrology of such parts requires a special approach where expensive and specialized fixtures are needed to constrain dedicated and follow the component during the inspection. These specialized jigs pose difficulties and significant costs to industry. For example, currently at Bombardier Aerospace Inc. the required preparation time for the inspection of compliant parts is about 50-60 man-hours (Figure 2.1). Therefore, the need for *Automatic* inspection that is faster and free of human error becomes essential in order to keep the global manufacturing market competitive.

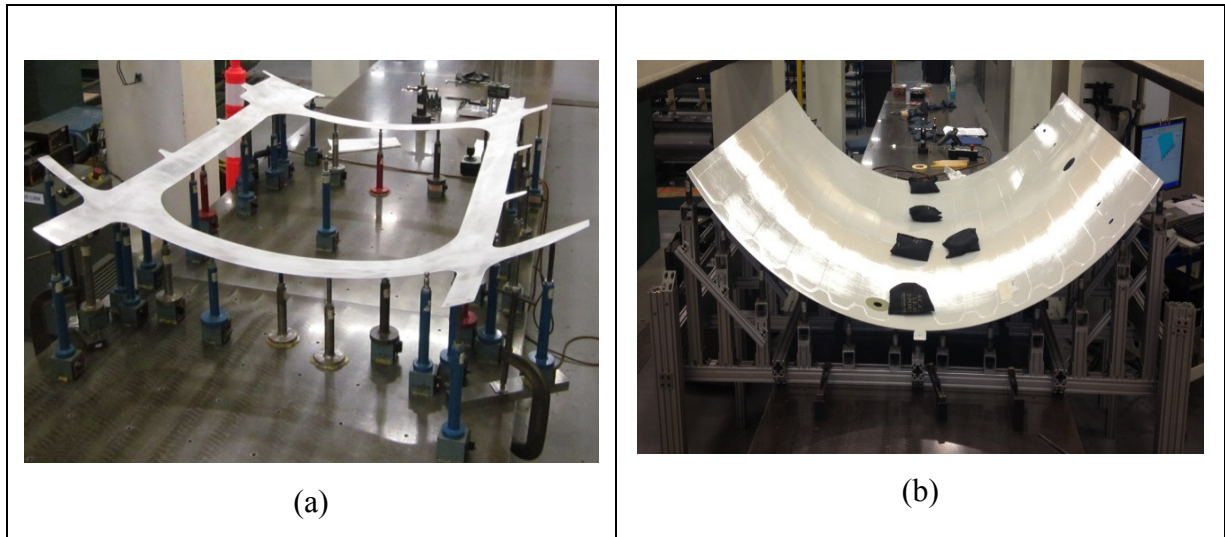


Figure 2.1 Inspection of aerospace compliant parts using a jig – Bombardier Aerospace.

The goal of this paper is to distinguish between geometrical defects due to an error in the manufacturing process, and deformations due to the flexibility of parts in the case of thin shells in order to ascertain whether the tolerance of the manufactured part fits the CAD model or not. To deal with this issue, the IDB-CTB method is developed. This new method takes advantage of the compliant parts' Gaussian curvature properties (one of the intrinsic properties of the geometry), and combines it with a statistical test based on the extreme value analysis techniques as an identification module which respects the following assumptions:

- The assembly, when scanning, allows elastic deformations greater than the required tolerance profile.
- Inspection is limited to the defects in the surface profile as defined by ASME Y14.5 (2009).
- Defects are dent shapes and/or waviness profile deviations as shown in Figure 2.2.
- Parts materials are considered isotropic with well-known characteristics.
- The manufactured part is a sheet metal completely scanned and represented as a point cloud (x, y, z) .
- The point cloud represents a significant coverage of the original surface. No curvature is calculated at areas of the object surface not covered by the point cloud.

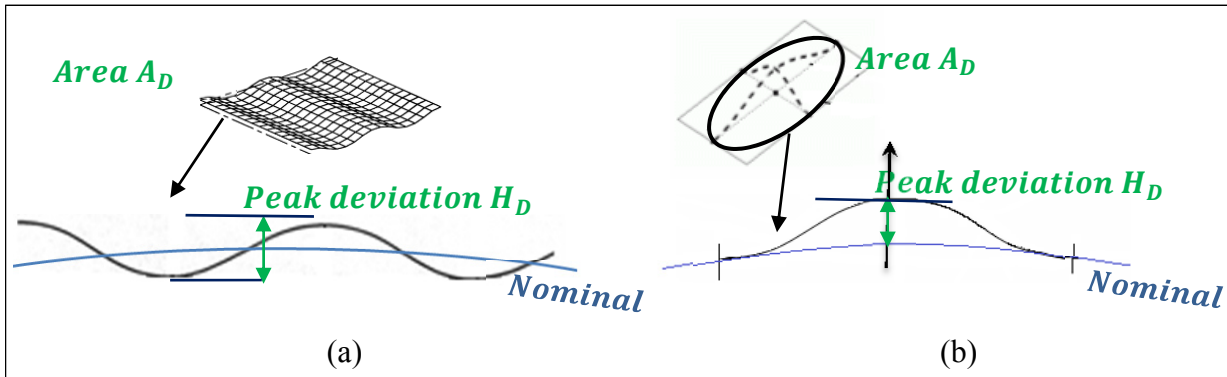


Figure 2.2 Defects: (a) Waviness profile deviations (b) Dent shapes.

The remainder of this paper is organized as follows: The proposition for flexibility definition and the automated 3D shape inspection literature review are presented in Sections 2 and 3 respectively. Section 4 describes the proposed method for the fixtureless metrology of compliant parts: The IDB-CTB method. Simulated and experimental case studies are described in Section 5 to demonstrate the effectiveness of the proposed method. Finally, a conclusion is provided in Section 6.

2.3 Rigidity/Flexibility definition

The rigidity (or flexibility) of a part is defined as the ratio between the deformation and the applied force. Basically, it's a relative concept. An aluminum tube with a diameter of $\varnothing 25 \text{ mm}$ [$\varnothing 1''$] is considered substantially rigid over a short length. The same tube will be considered compliant if its length is large, and only if the effect of gravity will be sufficient to significantly affect measures of straightness. To qualitatively analyze the problem, three different zones are proposed by Abenhaim *et al.* in 2011 where rigidity (flexibility/compliance) is presented on a relative scale of 0% to represent the perfectly rigid parts and 100% for perfectly non-rigid parts.

From an industrial point of view (AIAG, 2002), a part is considered 'compliant' if the typical value of the deformation resulting from applying a typical force of $150 - 450 \text{ N/m}$ [$10 - 30 \text{ lbf/linear foot}$] is more than 10% of its assigned profile tolerance (Figure 2.3). The force value is dictated by what is commonly used in a manual assembly

line. With this definition, many types of parts in the aeronautic and the automotive industry can be grouped such as a wallboard (skin), pieces of thin-walled structure (spar, ribs, etc...) and components for the interior finish of such planes. This definition isn't absolute. In certain mechanical parts, it's possible to have rigid, as well and non-rigid, areas. To quantitatively analyze the problem, a new method to represent flexibility using a logarithmic graph and a ratio R is proposed in this study (equation 2.1).

$$R \triangleq \frac{\delta_{\max}}{\frac{1}{2} Tol} \quad (2.1)$$

Where δ_{\max} is the maximum displacement induced by a certain force and Tol is the profile tolerance of the compliant part.

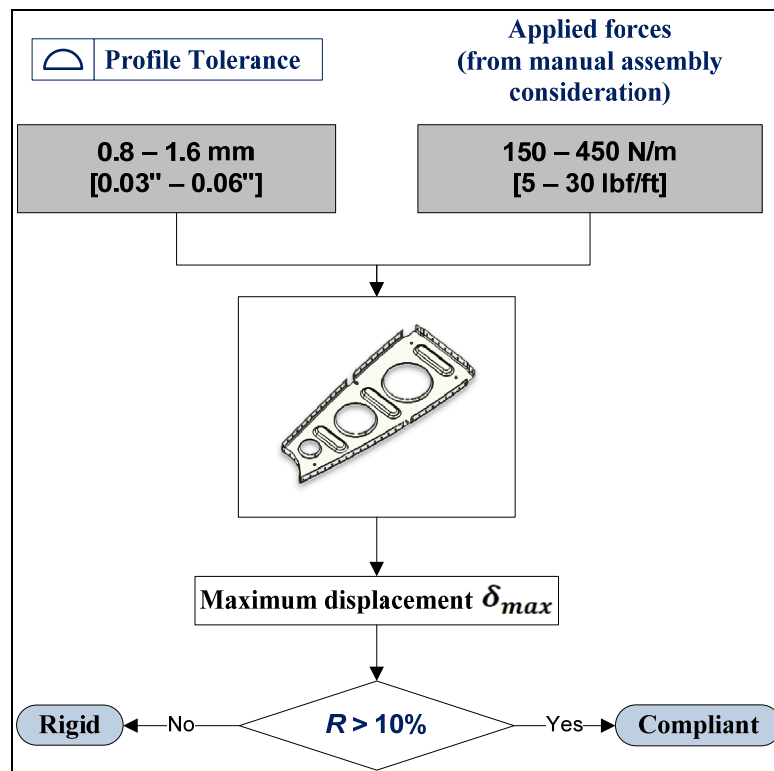


Figure 2.3 The flexibility definition from an industrial point of view.

For example, five (5) shapes, representing a sample of common parts in the industry, are examined. All parts are made of $E = 7 \times 10^{10} \text{ N.m}^{-2}$ aluminum. Figure 2.5 to Figure 2.9 illustrate the five parts used, their dimensions and their corresponding thickness (aluminium gauges), as well as the external constraints and the simulation configuration forces imposed in each case. The maximum induced deformation δ_{\max} in each case, as well as its relation to the profile tolerance expressed by the ratio R, is presented in Table 2.1. Lastly, Figure 2.10 represents the proposed quantitative representation of the flexibility in a logarithmic scale.

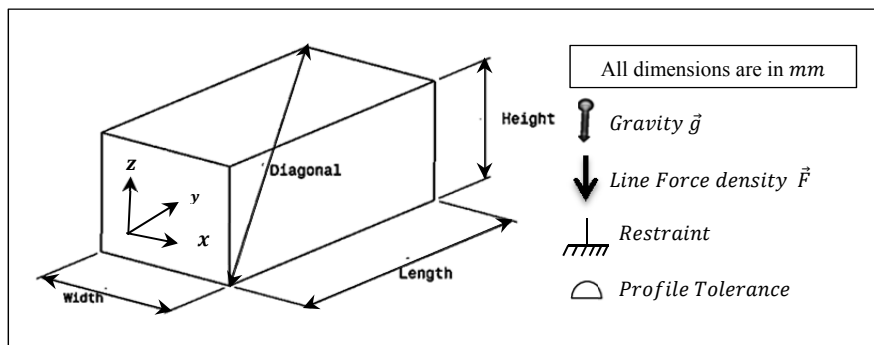


Figure 2.4 Legend for the case studies.

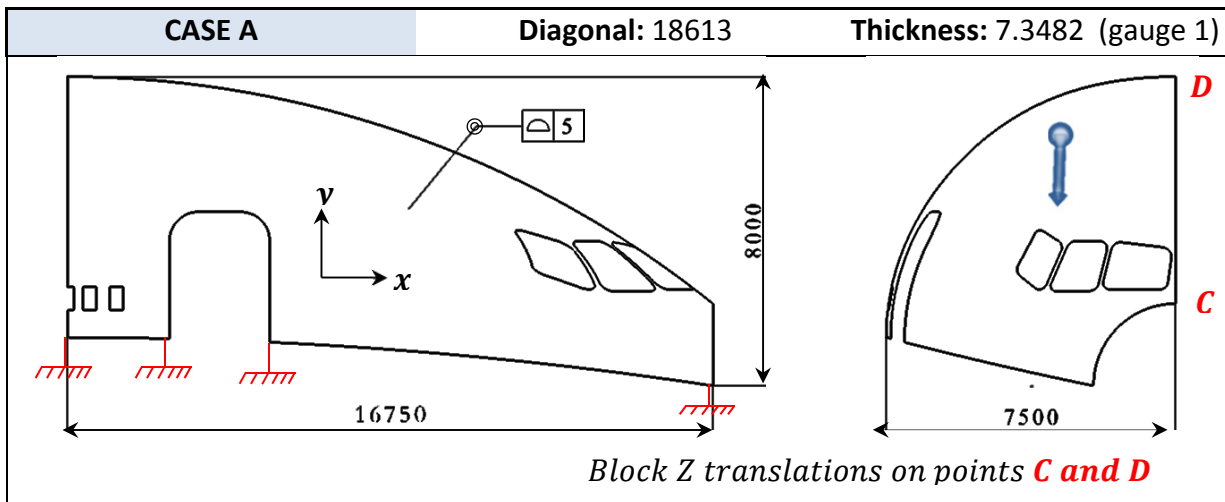


Figure 2.5 Layout drawing of the compliant case A part.

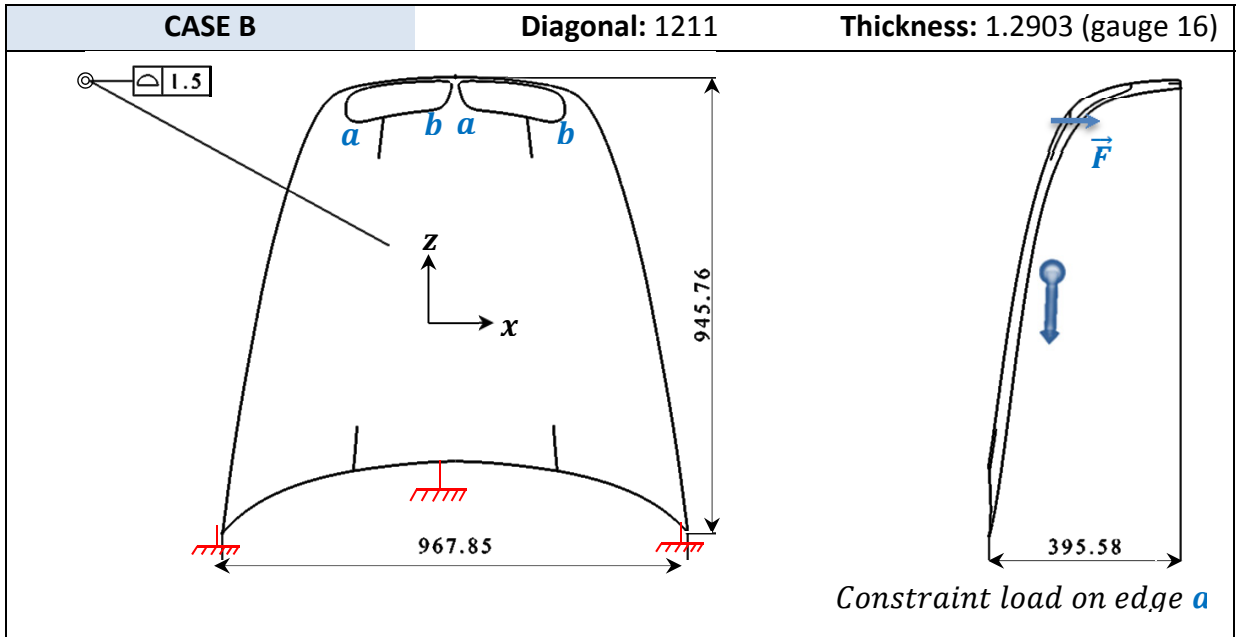


Figure 2.6 Layout drawing of the compliant case B part.

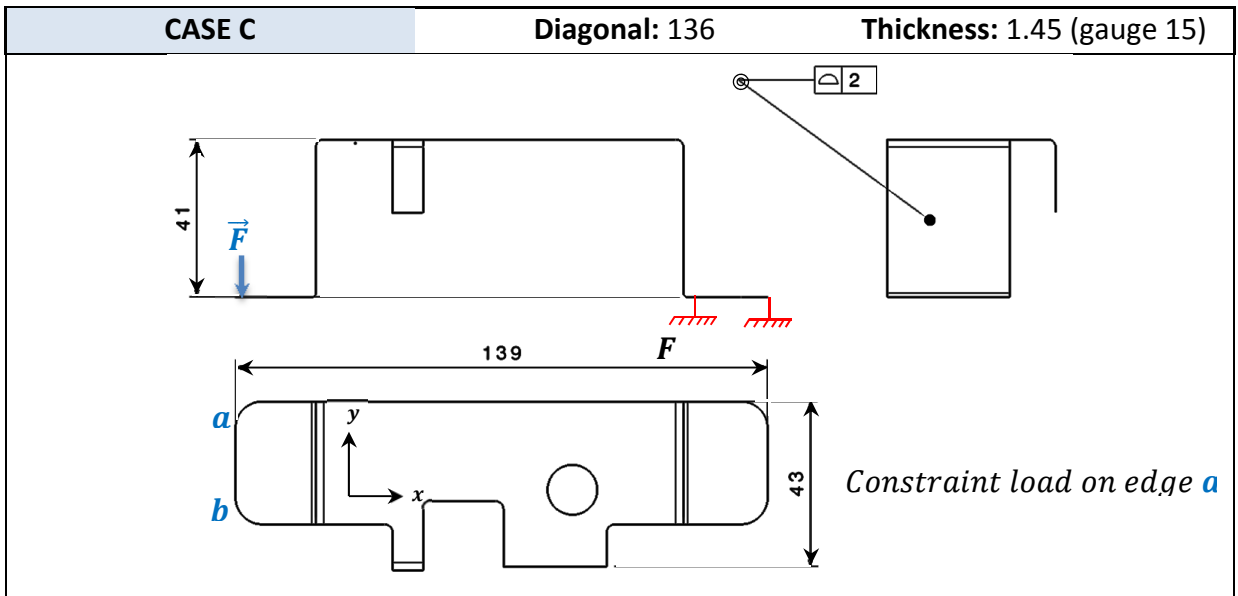


Figure 2.7 Layout drawing of the compliant case C part.

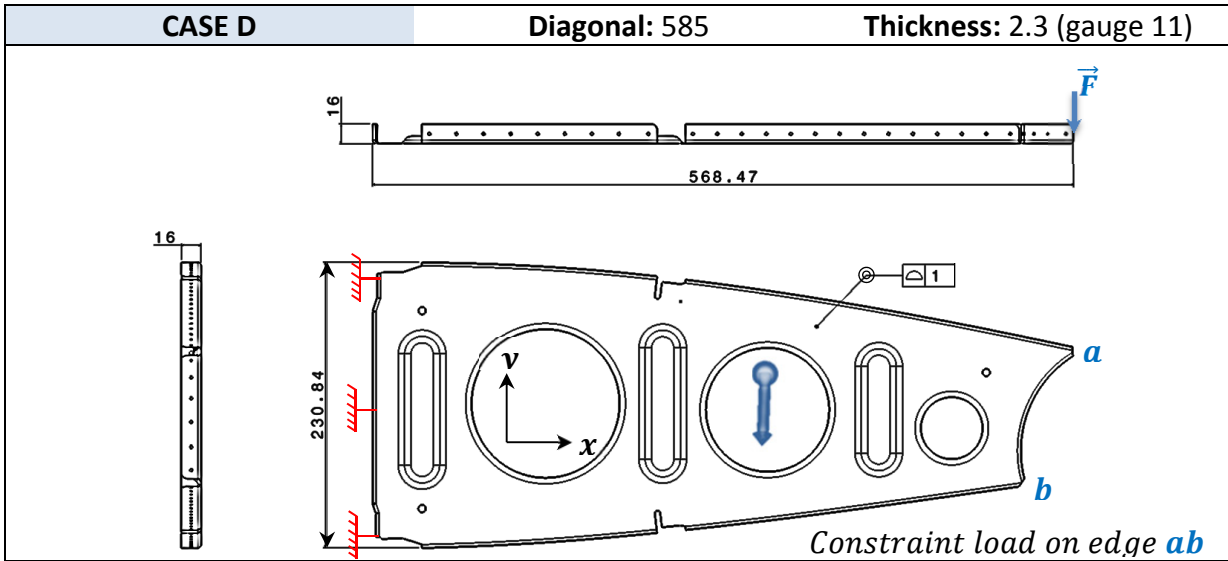


Figure 2.8 Layout drawing of the compliant case D part.

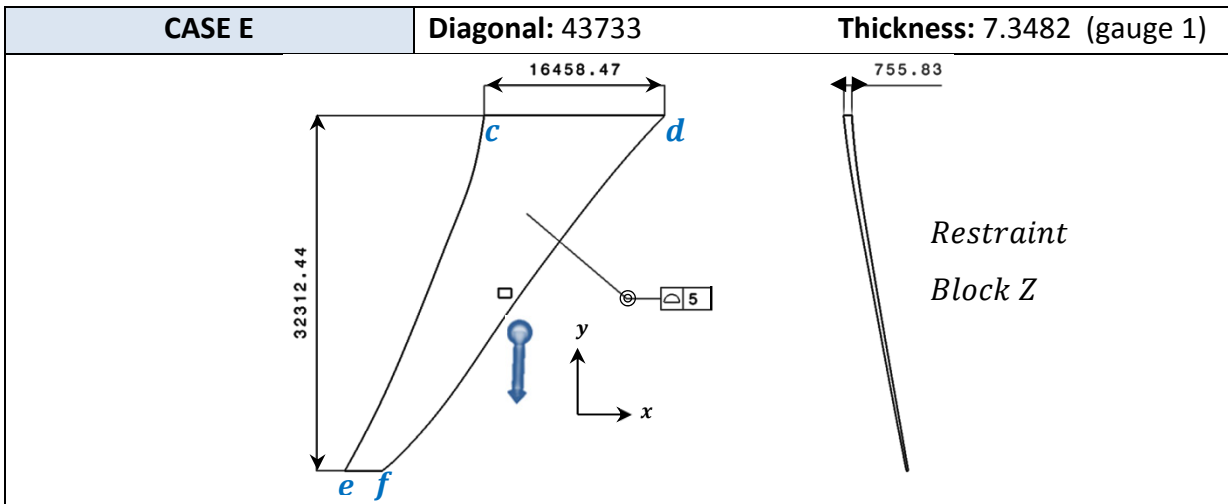


Figure 2.9 Layout drawing of the compliant case E part.

Tableau 2.1 Results of the flexibility ratio R

Case	Diagonal		Force		Typical profile tolerance	Maximum displacement	Flexibility ratio
	D		\vec{g}	\vec{F}	Tol	δ_{max}	R
	mm [inch]	$m.s^{-2}$ [ft.s ⁻²]	$N.m^{-1}$ [lb.ft ⁻¹]	mm [inch]	mm [inch]		
A	18613 [732.8]		9.81 [32.2]	0	5 [0.196]	1140 [45]	456
B	1 2	1211 [47.7]		0	1.5 [0.06]	10 [0.4]	13.33
				450 [30]		19.5 [0.77]	26
C	1 2	136 [5.35]		0	2 [0.078]	0.45 [0.018]	0.45
				150 [10]		5.53 [0.218]	5.53
D	1 2	585 [23]	0	1 [0.04]	4 [0.157]	8	
			200 [14]		30 [2.2]	111.2	
E	43733 [1721.77]			0	5 [0.196]	1230 [48.42]	492

Three different zones are proposed in the logarithmic graph (Figure 2.10):

- **Zone A** for the relatively rigid parts ($R < 0.1$). The displacement caused by a reasonable force during inspection is less than 10% of the parts' assigned tolerance.
- **Zone B** for the relatively compliant parts ($0.1 < R < 100$). Parts classified in this zone are the most problematic to manage with regards to the specification, tolerance, and inspection of their geometric and dimensional requirements. By applying a certain amount of force, these parts get closer to the third zone.
- **Zone C** for the very flexible parts ($R > 100$). In this zone, very large deformations are produced only by the effect of the gravity.

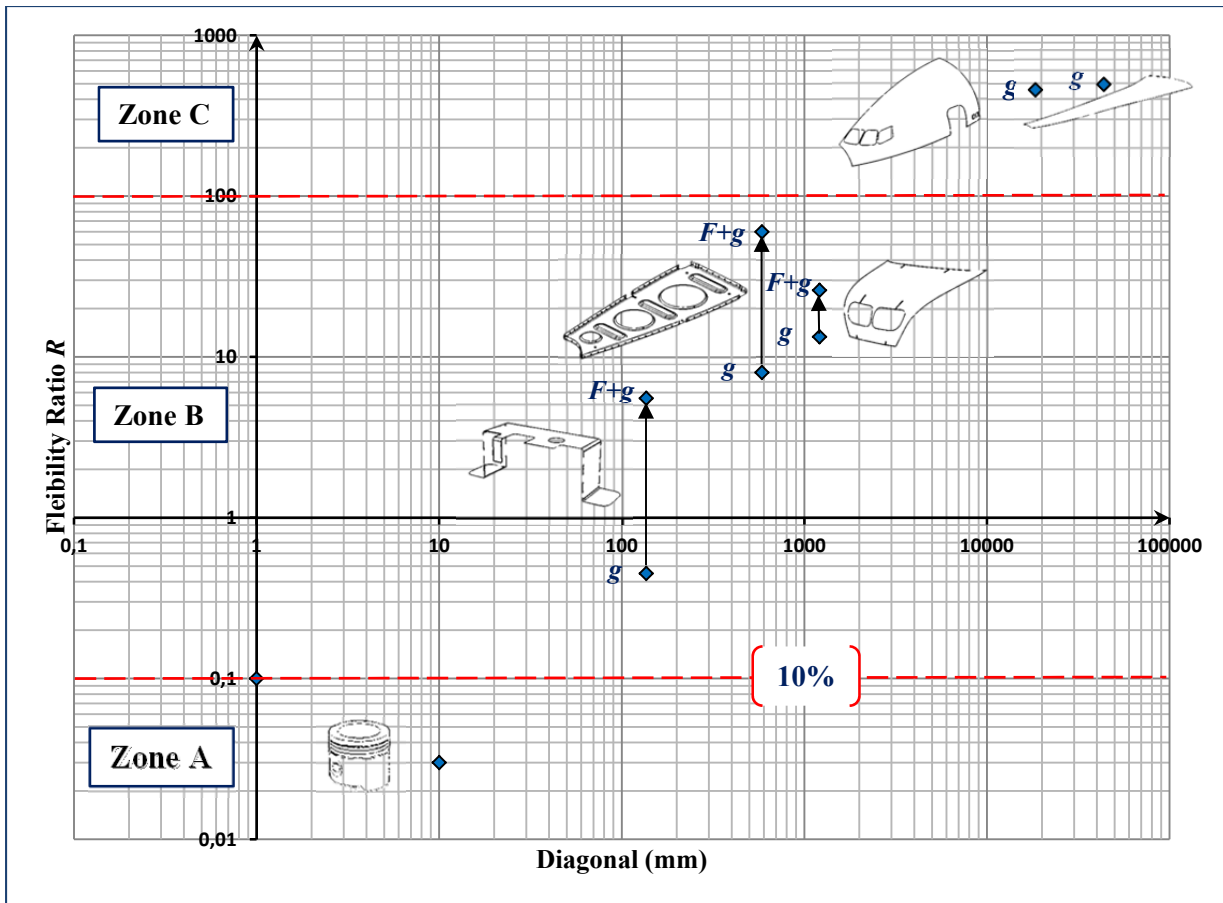


Figure 2.10 Logarithmic scale representation of the flexibility.

The quality control of compliant parts requires a special approach. As mentioned earlier, jigs and fixtures are needed to constrain dedicated part and to follow the component during inspection. Therefore the aim of this research is to identify the magnitude and location of defects induced by the inherent varying manufacturing processes, from a cloud of points collected in conditions without specialized fixtures in cases where relatively compliant parts (Zone B) represent the majority of industrial cases.

2.4 Background

Automated 3D shape inspection

Many researchers work on the automated inspection of freeform surfaces belonging to compliant parts (Table 2.2).

Tableau 2.2 Researchers working on automated 3D shape inspection

Automated 3D shape inspection	Malamas <i>et al.</i>	2003
	Li and Gu	2004
	Weckenmann <i>et al.</i>	2006
	Jaramillo <i>et al.</i>	2009
	Ascione and Polini	2010
	Abenhaim and Tahan	2011, 2012
	Radvar-Esfahlan and Tahan	2011

The state of the art of machine vision inspection research and technology has been presented by Malamas *et al.* (2003). They classified contemporary applications in the industry according to their measured parameters (i.e. dimensions, surface, assembly and operation) and to their degrees of freedom. After the removal of manufacturing forces, compliant parts were subjected to significant distortion. This free-state variation is principally due to the weight and flexibility of the part and the release of internal stresses resulting from fabrication. Abenhaim *et al.* (2012) presented a review of the available approaches for the fixtureless inspection method of the compliant parts, as well as a categorization of the particular specification methods used for the geometric dimensioning and tolerancing of compliant parts under the ASME and ISO standards. Yadong and Peihua (2004) provided a comprehensive literature review of methodologies, techniques and various processes for the inspection of parts with free-form surfaces. They discussed the profile verification techniques for free-form surface inspection by and without datums. The inspection of free-form surfaces includes two major processes: (1) the localization of measurement data to design a coordinate

system based on the datum reference information or a number of extracted surface features; and (2) the further localization based on the surface characteristics so that the deviation of the measured surface from the design model is minimized.

In 2010, Ascione and Polini proposed a fixture assembly methodology that enables both to simulate the mating part interface and to locate the part in a coordinate measuring machine's working volume. Then, they used a method for the evaluation of the actual surface with regard to its nominal model based on their Euclidean distance. Finally, a method based on a finite element analysis was proposed to evaluate the effects of the measuring force (induced by the touch probe on the inspected surface) on the measurement results. For the alignment of deformable parts that do not require any fixtures, Weckenmann *et al.* (2006), as well as Jaramillo *et al.* (2009), proposed an approach based on a finite element method to obtain a physical deformation of the original CAD model, and radial basis functions to approximate this deformation faster and in real time, opening the door to the on-line inspection of deformable parts. Caulier (2010) proposed a general free-form stripe image interpretation approach on the basis of a four-step procedure: (i) comparison of different feature-based image content description techniques, (ii) determination of optimal feature sub-groups, (iii) fusion of the most appropriate ones, and (iv) selection of the optimal features. She applies this technique to a broader range of surface geometries and types, i.e. to free-form rough and free-form specular shapes. Caulier and Bourennane (2008) proposed a general free-form surface inspection approach relying on the projection of a structured light pattern and the interpretation of the generated stripe structures by means of Fourier-based features. Lin *et al.* (2008) explored automated visual inspection of surface defects in a light-emitting diode (LED) chip by applying wavelet-based principal component analysis (WPCA) and Hotelling statistic (WHS) approaches to integrate the multiple wavelet characteristics. The principal component analysis of the WPCA, and the Hotelling control limit of WHS, is individually judging the existence of defects. Cristea (2008) presents aspects of the design of an intelligent modular inspection system. This system consists of grouping the parts based on the relation between dimensional inspection process characteristics and modular design of all inspection equipment's with a high universality and flexibility degree. Kase *et al.* (1999)

presented a local and a global evaluation method for the shape error of free form surfaces. The local evaluation method is based on the modification of principal curvatures between the CAD and the manufactured surfaces. The global evaluation method is based on the average normal vectors for the characterization of the representative direction of the surface portions.

In 2011, Abenhaim and Tahan developed the Iterative Displacement Inspection (IDI) algorithm. The IDI allows for the surface profile inspection of a compliant part without the need of a specialized jig. The method works through a comparison of two sets of points, one from the mesh of the CAD model, and one from the scanned manufactured part, despite the significant difference in their respective geometries. The method outlined operates by iteratively deforming the smooth CAD mesh until it matches the scanned part without profile deviation or measurement noise. This matching process is made possible with the introduction of the identification method, which enables the effects of profile deviations to be distinguished from the deformations due to the positioning of the part and its flexibility. Aidibe and Tahan (2012) proposed the use of the statistical maximum normed residual test to improve the aforementioned identification task and automatically set the identification threshold. Compared with the original IDI identification module, the results indicate that the proposed method reduces type I and type II errors. In addition, in contrast to the IDI's identification method, the proposed method does not require a user-specified threshold based on a trial and error process. Radvar-Esfahlan and Tahan (2012) proposed the Generalized Numerical Inspection Fixture (GNIF) algorithm. By taking advantage of the geodesic distance metric properties, GNIF uses the imposition of boundary conditions into a finite element (FE) model of the nominal CAD model to conform it to the scanned part and automatically determine the corresponding points between them.

Following the IDB-CTB approach which is a new method for fixtureless inspection of compliant parts will be presented.

2.5 Inspection of Deformable Bodies by Curvature estimation and the Thompson-Biweight test (IDB-CTB) approach

In order to compare deformable bodies, one should take advantage of their intrinsic geometries because they remain unchanged during isometric deformations. The IDB-CTB proposed method (Figure 2.13) is based on the Gaussian curvature estimation, which is invariant under isometric deformations, combined with a statistical identification module to distinguish the defects due to manufacturing process from the deformation due to the flexibility of a given part. The proposed identification module considered the defects as ‘outliers’ and combines the Thompson extreme value statistical test (Thompson, 1985) with the biweight mean and standard deviation estimator technique (Hoaglin *et al.*, 1983) in order to detect them. In this section the main steps of the proposed method will be presented.

2.5.1 Registration and matching (Step 1, Step 2)

Let $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n | s_j \in \mathbb{R}^3\}$ be a set of n nodes representing the meshed CAD model and $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m | p_j \in \mathbb{R}^3\}$ be a set of $m | m \gg n$ nodes representing the scanned part. The Iterative Closest Point (ICP) algorithm developed by Besl and McKay (1992) is used in order to register the two given point sets in a common coordinate system. The ICP algorithm is one of the most popular 3D matching algorithms which works for nearly any type of surface representation and aims to determine the transformation between two given point cloud sets by minimizing the square errors between corresponding entities. After the pre-alignment, a `dsearchn` function in Matlab® based on Quickhull (Barber *et al.*, 1996) is used to find the closest point $C = \{c_1, c_2, c, \dots, c_n | c_j \in \mathbb{R}^3\}$ in P to S .

2.5.2 Curvature estimation method (Step 3)

Knowledge of the curvature of surfaces is important in a number of applications, especially those dealing with evolving surface geometry. Curvature, defined in 3-space, is the measure

of how much the curve “bends” at a single point. It is a measure of how fast the unit tangent bends in the direction of the normal.

The Gaussian and the mean curvature of a regular surface in \mathbb{R}^3 at a point p are formally defined as:

$$K(p) = \det(S^*(p)) \quad (2.2)$$

$$H(p) = \frac{1}{2} \text{tr}(S^*(p)) \quad (2.3)$$

Where S^* is the shape operator and \det, tr denotes the determinant and the matrix trace respectively.

The Gaussian and mean curvature are also given by:

$$K(p) = k_1 k_2 = \frac{1}{R_1 R_2} \quad (2.4)$$

$$H(p) = \frac{k_1 + k_2}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.5)$$

Where k_1 and k_2 are the principal curvatures that measure the maximum and minimum bending of a regular surface at each point. k_1 and k_2 are the maximum and minimum of the normal curvature. R_1 and R_2 are the principal radii of curvature. (See Figure 2.11)

The Gaussian and mean curvatures are chosen because they are invariant under rotation and translation.

In our case, the curvature is estimated from discrete surface information (nodes of triangulation). For this, initial estimation of the surface normal is done using the triangular mesh. Then a smooth quadratic polynomial surface is fitted to a local set of points around the point of interest and the surface curvature at that point is used as the curvature estimate (Peng *et al.*, 2003)

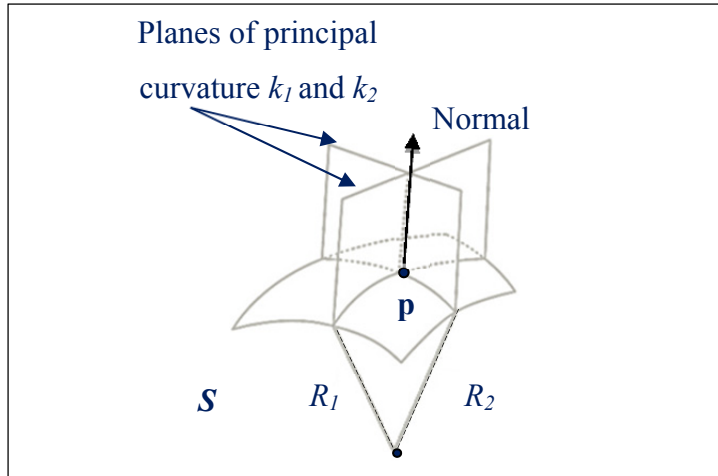


Figure 2.11 The curvature at a given point.

The curvature estimation method (Figure 2.12) works as follows:

Input: A pair of point clouds and triangular meshes. One from CAD model (S) and the other from scan model (C). C is the closest point in P to S .

1. Compute the principal curvature directions for S and C : k_1^S, k_2^S and k_1^C, k_2^C
2. Compute the Gaussian and the mean curvatures at each node for S and C

Output: Two matrixes \mathbf{HK}^C and \mathbf{HK}^S where \mathbf{HK} is a $n \times 2$ matrix containing, respectively, the mean and the Gaussian curvature estimation at each node.

2.5.3 Identification method – The Thompson-Biweight test (Step 4)

In the proposed algorithm, the defects due to the manufacturing process are identified as outliers of the Gaussian and mean curvature. In statistics, an outlier is an observation that is numerically distant from the rest of the data. The Thompson statistical test with the biweight mean and standard deviation estimator techniques are used as identification module to

distinguish between the defects and the deformations. Defects, in our assumption, are dent shapes and/or waviness profile deviations.

The Thompson tau technique is a statistical method for deciding whether to keep or discard suspected outliers in a sample of single and multiple variables. The biweight is a more sophisticated estimator belonging to a category known as redescending estimators. The biweight estimate is a weighted average where weighting decreases from the center of the distribution. Thereafter, the term Thompson-Biweight will be used to designate our proposed statistical identification method.

The identification module (Figure 2.12) works as follows:

Input: Two matrixes \mathbf{HK}^C and \mathbf{HK}^S

1. Compute the difference delta between the two matrixes \mathbf{HK}^C and \mathbf{HK}^S

$$\begin{aligned}\Delta\mathbf{C} &= |\mathbf{HK}^C - \mathbf{HK}^S| \\ \Delta\mathbf{C} &= [\Delta H \quad \Delta K]\end{aligned}\tag{2.6}$$

where $\Delta\mathbf{C}$ is a $n \times 2$ matrix containing, respectively, the difference in mean and the difference in Gaussian curvatures estimations at each node.

2. Arrange the ΔK values in increasing order, so that the suspected outliers are easily spotted.

3. For each ΔK_i , we compute the absolute value of the deviation:

$$\delta K_i = |\Delta K_i - \overline{\Delta K}|\tag{2.7}$$

Where $\overline{\Delta K}$ is estimated using the biweight mean estimator technique.

$$\overline{\Delta K} = M + \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta K_i - M)(1 - u_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - u_i^2)^2} \quad (2.8)$$

- The median (M) is the “middle” value of a distribution and is estimated (from a sample of n values) by:

$$M = \begin{cases} \Delta K_{(n+1)/2} & n \text{ odd} \\ (\Delta K_{n/2} + \Delta K_{(n/2)+1})/2 & n \text{ even} \end{cases} \quad (2.9)$$

- The MAD is the median of the absolute values of the deviations of the sample values from the median.

$$MAD = Median (|\Delta K - M|) \quad (2.10)$$

- u_i is a weight corresponding to each of the n observations ΔK_i .

$$u_i = \frac{\Delta K_i - M}{c \times MAD} \quad (2.11)$$

- The biweight influence function returns to zero at some distance away from the center of the distribution. This distance is controlled by a parameter c . All values beyond a certain critical distance from the center are given zero weight. A c value between 6 and 9 is recommended (Hoaglin *et al.*, 1983). $c = 9$ is proposed in the method (the sensor values more than 6 standard deviations away).

4. Compute the value of the Thompson technique τ (Greek letter tau). τ is calculated from the critical value of the student's density function.

$$\tau = \frac{t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \cdot (n-1)}{\sqrt{n} \sqrt{n-2 + t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}^2}} \quad (2.12)$$

Where $t_{\frac{\bar{\alpha}}{2}, n-2}$ is the critical student's t value with $(n - 2)$ degrees of freedom and a significance level of $\bar{\alpha}/2$.

5. Determine whether to reject or keep this suspected defect, using the following rules:

<i>If $\delta K_i > \tau s_{bi}$</i>	Reject the data point. It's a defect. $w_i = 0$
<i>If $\delta K_i \leq \tau s_{bi}$</i>	Keep the data point. It's not a defect. $w_i = 1$

Where s_{bi} is the estimation of the biweight standard deviation of ΔH .

$$s_{bi} = \frac{\sqrt{n \sum_{i=1}^n (\Delta K_i - M)^2 (1 - u_i^2)^4}}{\sum_{i=1}^n (1 - u_i^2)(1 - 6u_i^2)} \quad (2.13)$$

The same procedure is applied for ΔH .

Output: The weights $w_i = \begin{cases} 0 & \text{for the points identified as outliers in } \Delta \text{ (defects)} \\ 1 & \text{else} \end{cases}$

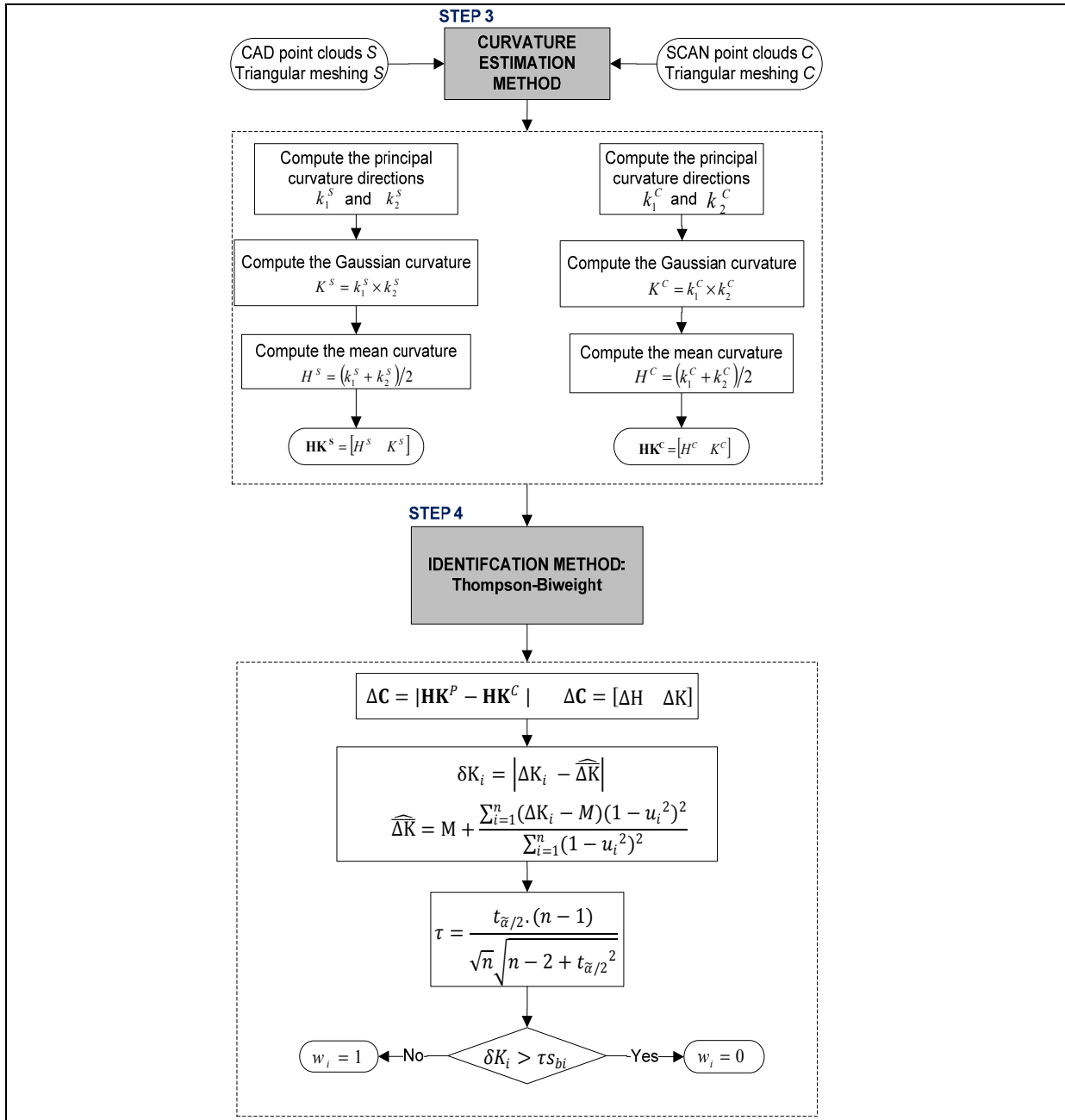


Figure 2.12 Curvature estimation and the identification method of the IDB-CTB algorithm.

2.5.4 IDB-CTB approach

Having explained the curvature estimation method, as well as the identification method, the IDB-CTB algorithm will now be presented. Starting with the set of nodes s_i of the CAD model and the point cloud p_i of the manufactured part, the IDB-CTB method schematized in Figure 2.13 works as follows:

1. Make a geometric alignment between S and P using the Iterative Closest Point (ICP) algorithm.
2. Find point c_i corresponding to each node s_i using the `dsearchn` function based on Quickhull algorithm.
3. Create the triangular mesh for C .
4. Compute the Gaussian and the mean curvature as described in section 3.1.
5. Applying the proposed Thompson-Biweight test in order to identify deformation from deviations.

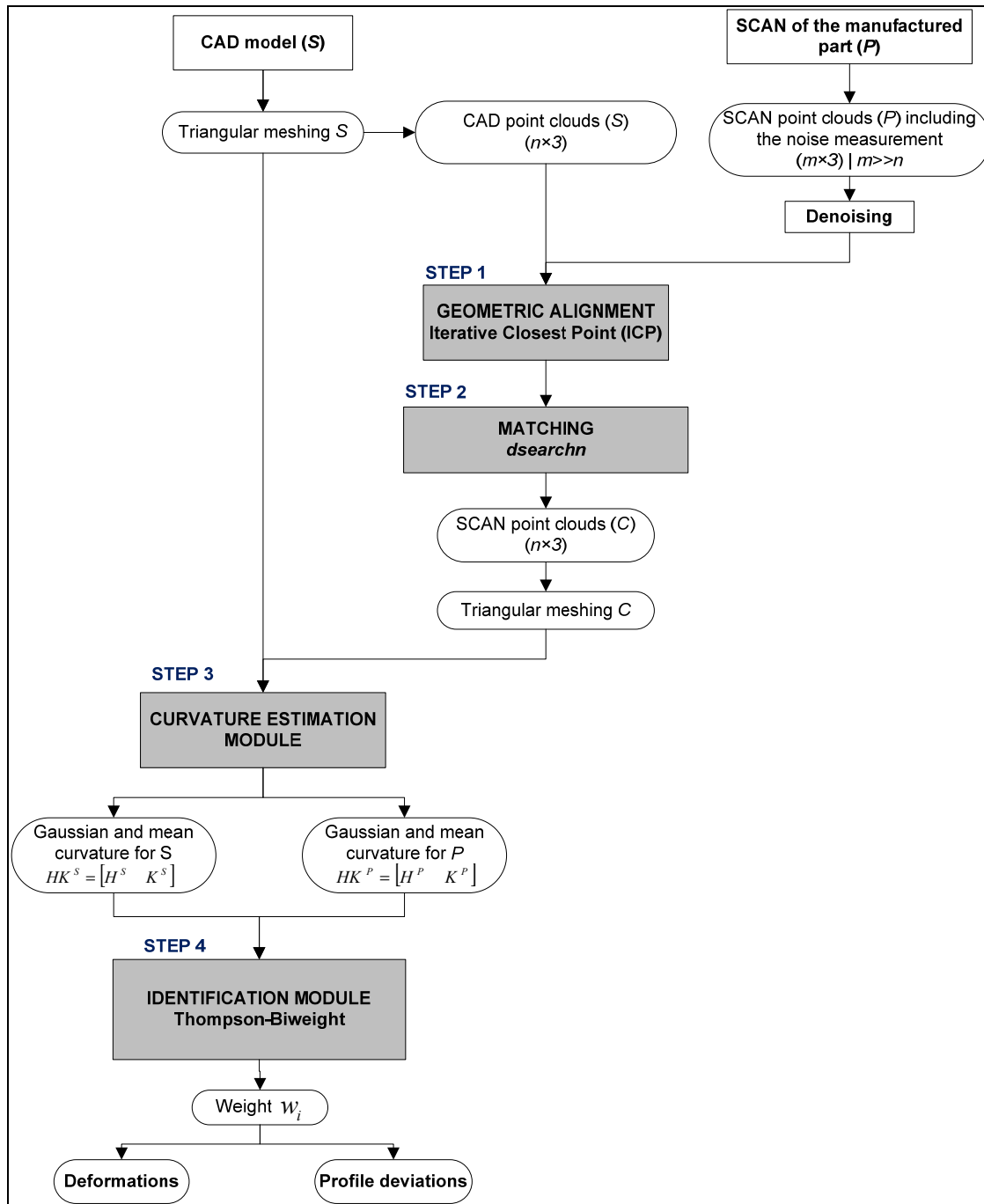


Figure 2.13 The IDB-CTB approach.

2.6 Case Studies and validation

This section presents two sets of case studies to test and validate the IDB-CTB approach developed in this paper: Three simulated case studies and an experimental one.

2.6.1 First set: Simulated case studies

In the first set, three shapes are chosen from section 2.3, representing a sample of common parts in the transport industry. The compliant parts are simulated by CATIA® V5 as well as the finite element analysis. Starting with the CAD model, the scanned manufactured part is simulated in accordance with the steps described in Table 2.3. Predefined profile deviation is added to all case studies. The defect is a dent shape and/or waviness profile deviation characterized by its peak deviation H_D and its area A_D as already presented in section 1. Specific external force is applied to model and to simulate the free-state condition. The finite element analysis takes into account both the mounting fixture configuration during a presumed digitalization and the force of gravity. The spatial sampling frequency of scanned data is different from the mesh used in the CAD data. A new point cloud representing the mesh of the part with a profile deviation zone and also with a deformed shape is then created.

Tableau 2.3 Steps to create the scanned part

Step	Action
1	A local modification of the CAD surface, representing a zone with a waviness profile deviation and/or dent shape, is created using the generative shape design module in CATIA® V5.
2	A finite element analysis of the model created in the step 1 is generated using the generative structural analysis module in CATIA® V5.
3	A Gaussian measurement noise $N(0, \sigma_{noise})$ is introduced on the newly created point cloud. $\sigma_{noise} = 0.02 \text{ mm}$.

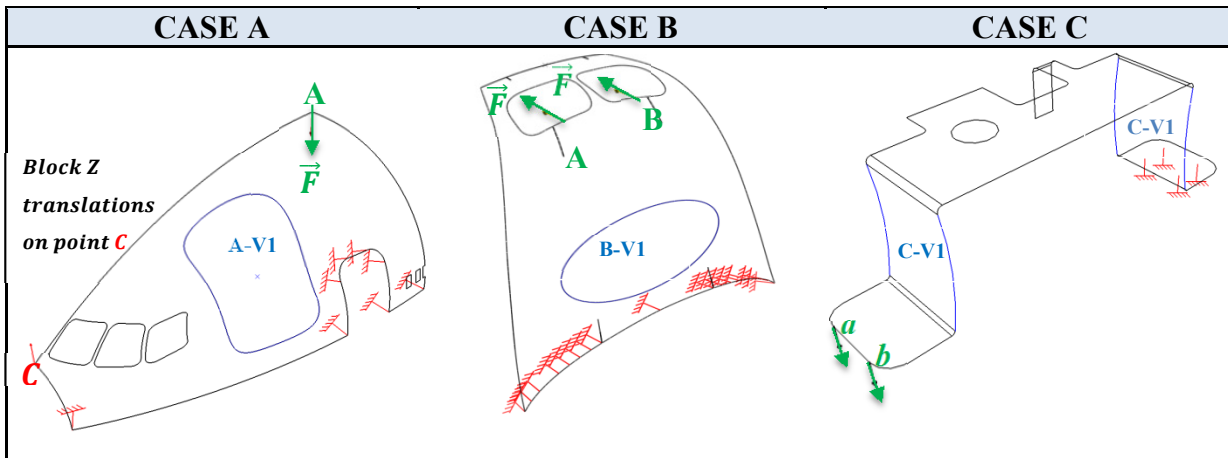


Figure 2.14 Descriptions of the simulated case studies for the IDB-CTB method.

Figure 2.14 illustrates the three shapes used, the position of the imposed profile deviation, as well as the external constraints imposed (with the force of gravity). Table 2.4 describes the set of nodes of the meshed CAD model and the scanned part, the maximum induced deformation resulting from the external constraints, the area of the defect, and the peak profile deviation in each case. V0 tests are performed to ensure that the method does not induce a bias. In other words, no defects should be detected if there aren't any imposed defects in the simulation part.

Tableau 2.4 Table of the simulated case studies for the IDB-CTB method

Case studies	$[n \ m]$ ↙ ↘ CAD SCAN	Simulation configuration \vec{F} (N [lbf])	Maximum induced deformation (mm [inch])	A_D (m^2 [ft^2])	H_D (mm [inch])
A	A-V0	150 [33.72] / on point A	495 [19.5]	n/a	n/a
	A-V1				
B	B-V0	10 [2.25] / on points A and B	20 [0.78]	n/a	n/a
	B-V1				
C	C-V0	5 [1.125] / on edge ab	10.5 [0.413]	n/a	n/a
	C-V1				

2.6.2 Second set: Experimental case study

In the second set, an experimental case study carried out in the Products, Processes and Systems Engineering Laboratory (P²SEL) at École de Technologie Supérieure (ÉTS), Montréal, Canada is presented. The experiment was conducted in order to validate the IDB-CTB proposed method. Figure 2.15 shows the test panel and its specialized inspection fixture designed and manufactured by ÉTS.

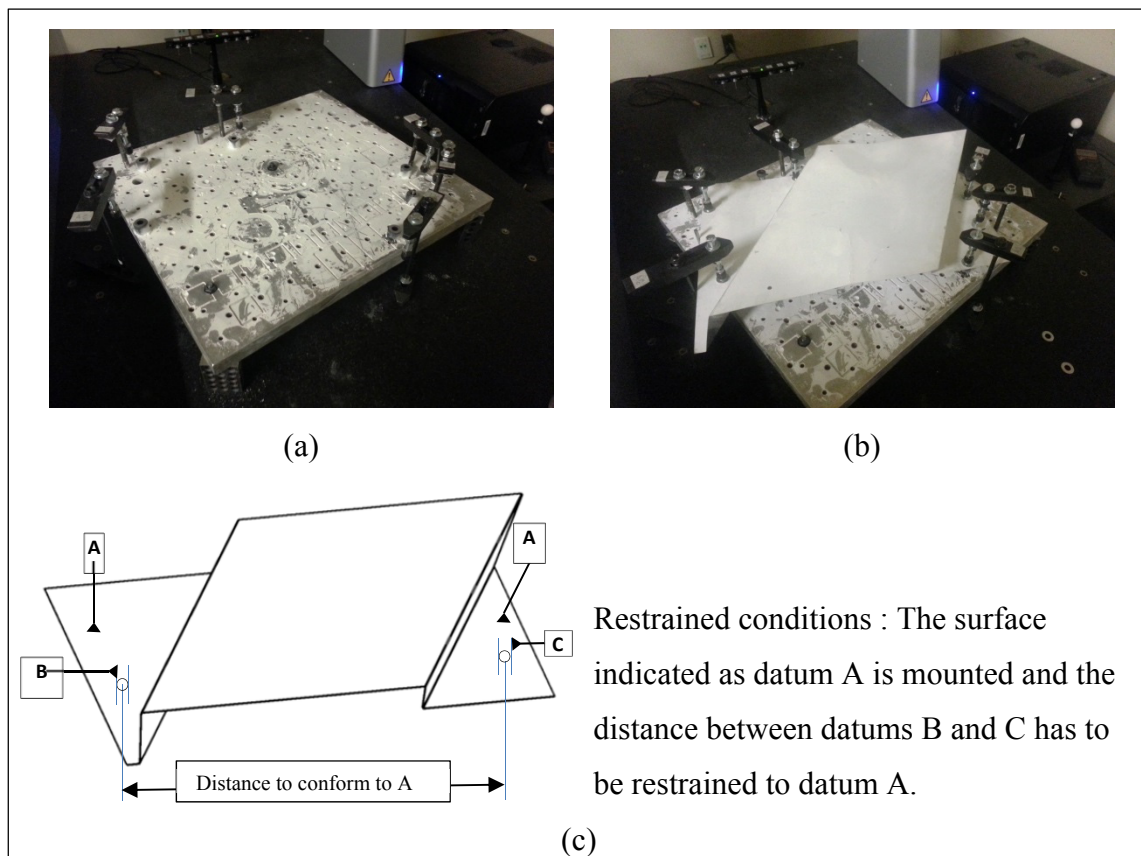


Figure 2.15 The experimental case study- (a) The specialized inspection fixture designed to conform the part (b) The part restrained on the fixture (c) GD&T description of the test panel.

The considered case study is an aluminum flat panel of 373 mm [14.685 inch] width by 516 mm [20.315 inch] of length. The panel has a thickness of 0.5 mm [0.022 inch] and a

height of 48 mm [1.89 inches]. In a free state, the part shape varies significantly from its nominal shape. An over-constrained fixture is therefore necessary to adequately evaluate the surface profile of the part (Figure 2.15). It has a static error less than 0.05 mm. With a Metris LC50 laser probe mounted on a Mitutoyo CMM (accuracy ≈ 0.02 mm), we performed two different measurements; The first one at restrained state and the second one at Free State. Figure 2.16 shows the measurement at Free State aligned with its nominal model, as well as its location on the flexibility scale proposed in section 2 of this paper.

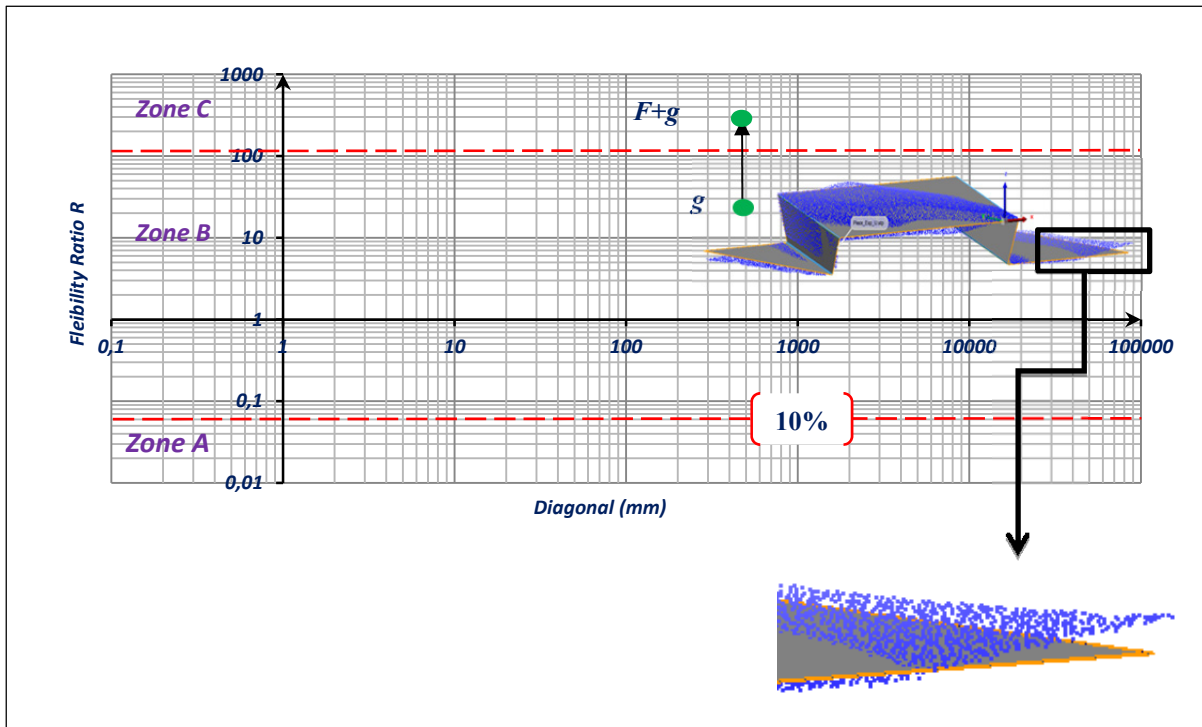


Figure 2.16 Measurement at Free State aligned with its nominal model and located on the proposed flexibility logarithmic scale.

2.6.3 Results

The scanned parts are compared with their corresponding nominal models using the IDB-CTB proposed method. Figure 2.17, Figure 2.18 and Figure 2.19 illustrate the Gaussian curvature estimation for the nominal and for the simulated scanned compliant part,

respectively, for cases A-V1, B-V1 and C-V1. Figure 2.20 illustrates the mean and the Gaussian curvatures estimation for the nominal and for the experimental scanned part at Free State.

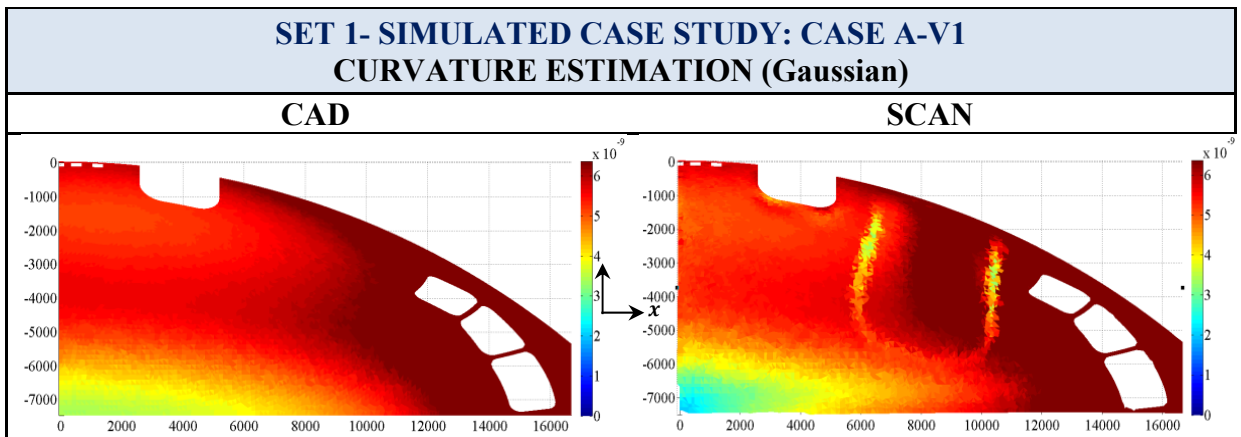


Figure 2.17 Results - Case A.

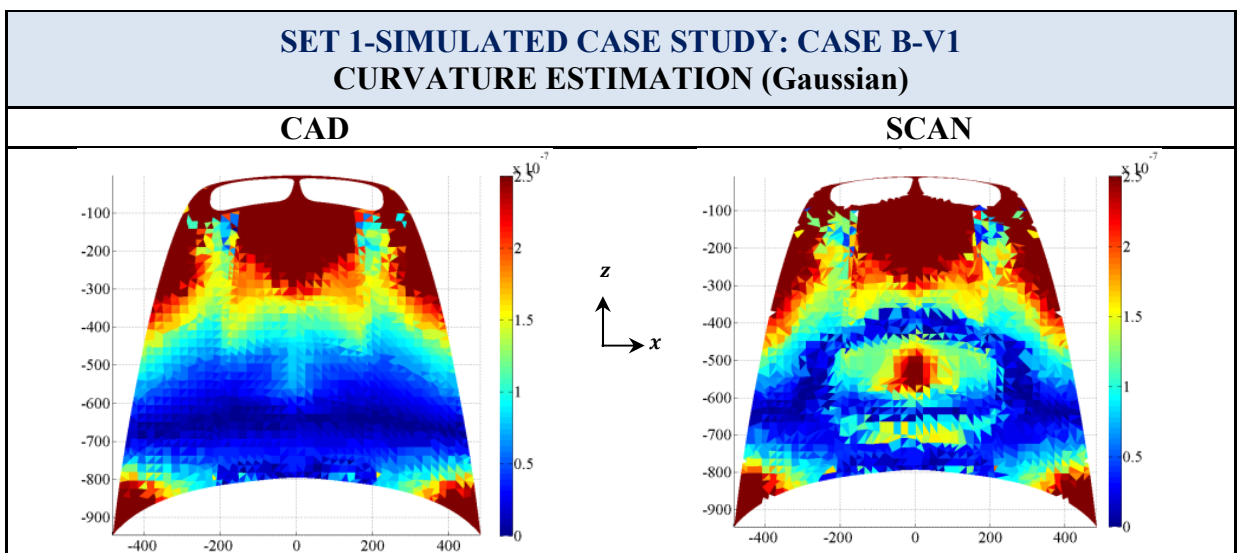


Figure 2.18 Results - Case B.

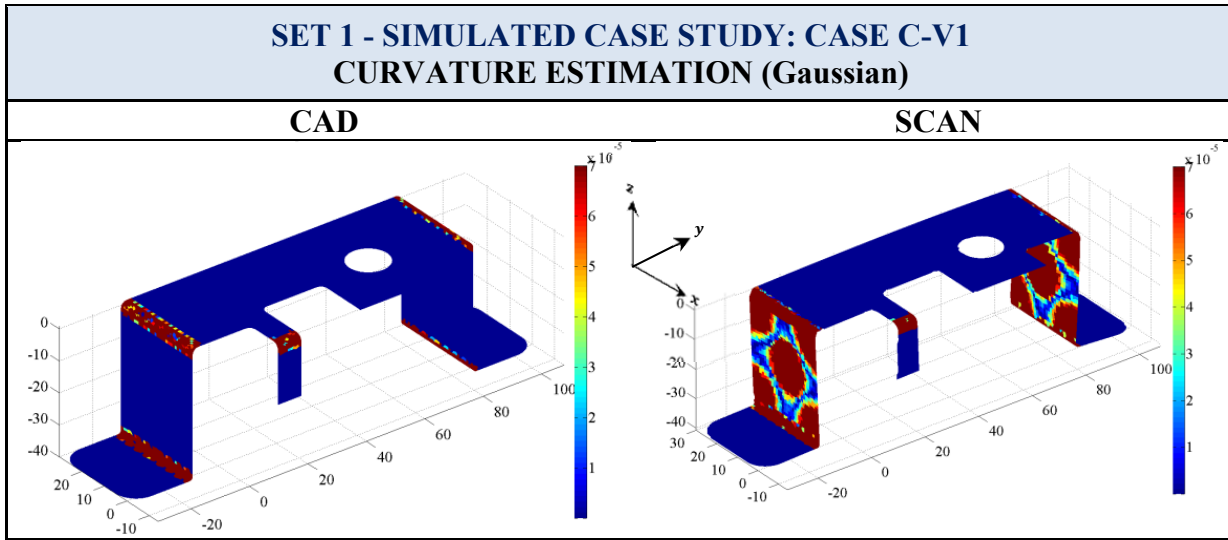


Figure 2.19 Results - Case C.

All case studies were performed on an Intel Core i7, 1.73 GHz, 4.0 GByte using a 64 bit operating system. Case A took 40 s, case B took 7.7 s, case C took 3 min and the experimental case took 4 min. There isn't any remarkable change in the Gaussian and mean curvatures in all V0 case studies. No defects are detected and this ensures that the IDB-CTB method does not induce a bias. On the other side, the remarkable change in the Gaussian and mean curvatures in all case studies, as well as the results of the identification module, reflects a good detection of the imposed defects by IDB-CTB as shown in Figure 2.17 to Figure 2.20.

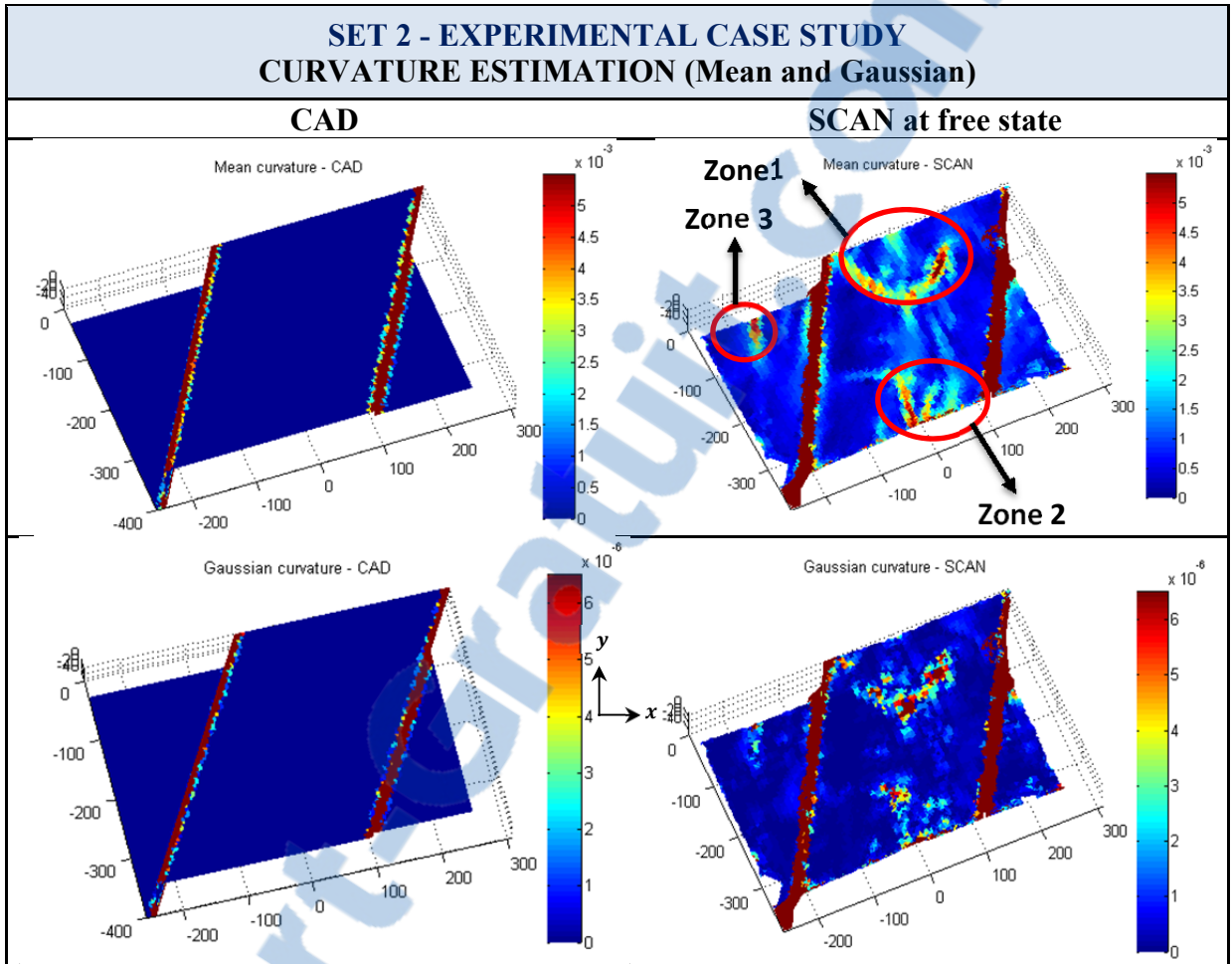


Figure 2.20 Results - Experimental case study.

In order to numerically evaluate the detection, the percentage of error in a defect area and the percentage of error in peak profile deviation is calculated. They are given by equations 2.9 and 2.10, respectively.

$$e_A = \frac{\widehat{A}_D - A_D}{A_D} \times 100 \quad (2.9)$$

$$e_H = \frac{\widehat{H}_D - H_D}{H_D} \times 100 \quad (2.10)$$

Where \widehat{A}_D represents the estimated area value of the defect, e_A its percentage of area error compared to the imposed one A_D , \widehat{H}_D the estimated peak profile deviation and e_H its percentage of peak profile deviation error compared to the imposed one H_D .

For the simulated case studies, the peak profile deviation value is calculated by projecting the peak point estimated in the SCAN model onto the closest triangle located on the nominal model. The numerical results of the evaluation are represented in Table 2.5.

For the experimental case study, the peak profile deviation is estimated using Polyworks V12 ®. The reference values in this case will be those of the restrained parts.

Tableau 2.5 Results of the IDB-CTB method

Case studies		Reference value		Estimated value		Error	
		A_D (m^2 [ft^2])	H_D (mm [inch])	\widehat{A}_D (m^2 [ft^2])	\widehat{H}_D (mm [inch])	e_A (%)	e_H (%)
A	A-V0	0	0	0	0	0	0
	A-V1	27 [290]	10 [0.393]	26.424 [284.42]	9.667 [0.38]	(-) ^a 2%	(-) 3%
B	B-V0	0	0	0	0	0	0
	B-V1	0.131 [1.41]	3 [0.12]	0.1415 [1.52]	2.813 [0.11]	(+) 8%	(-) 6%
C	C-V0	0	0	0	0	0	0
	C-V1	0.001 [0.01]	2 [0.078]	0.000932 [0.009]	1.655 [0.065]	(-) 6%	(-) 17%
Experimental		Reference value \approx The scanned part on fixture		Estimated values from the scanned part at freestate			
	Zone 1	0.043 [0.46]	7.556 [0.297]	0.0445 [0.478]	7.115 [0.28]	(-) 3%	(-) 5%
	Zone 2	0.041 [0.44]	6.434 [0.253]	0.0423 [0.455]	6.818 [0.268]	(+) 3%	(+) 6%
	Zone 3	0.023 [0.25]	2.319 [0.09]	0.0246 [0.264]	2.715 [0.1]	(+) 6%	(+) 17%

^a (+) overestimated the value and (-) underestimated value compared with the reference one.

The percentage of error in a defect area is less than 8% in all the cases (Table 2.5) as well as the percentage of error in peak profile deviation except in case C and Zone 3 of the

experimental case where the percentage is higher than 10% (17.25%). This shows that by using the IDB-CTB approach good results in the detection of the defect area, position, and peak deviation have been achieved.

The high percentage error of case C and of experimental - Zone 3 (Table 2.5) is due to the alignment process. In this work the ICP method is used in order to pre-align the SCAN model to its nominal one. Working on the alignment stage can improve the peak profile deviation error percentage in this case.

2.7 Conclusion

In this paper a quantification of the flexibility/rigidity behavior of mechanical parts is proposed. The maximum deformation induced by a certain force is compared to the profile tolerance of five typical compliant parts and the results are represented in a logarithmic scale. Three zones were then defined and reflected where our compliant parts were located in the flexibility scale. This quantification approach will allow industries to properly classify their mechanical components and will be strongly useful during tolerancing operations. After that, the technologies in metric and computational geometry are merged along with extreme statistics to develop a novel approach to the geometrical inspection of compliant parts located in the relatively flexible zone (Zone B) which represents the majority of industrial cases. The IDB-CTB method combines the Gaussian curvature estimation with the Thompson statistical test, and the biweight mean and standard deviation estimator in order to compare two sets of points, one from the CAD model, and the other from the scanned manufactured part in a free-state condition, in order to distinguish deformations due to the flexibility and the positioning of parts from deviations due to the manufacturing process. The estimated values of the defect areas and the profile deviations, as well as their positions, are much closer to their reference ones in most cases, thus reflecting the accuracy of the proposed method. This method is useful and efficient to verify a diverse range of deformable bodies without using special inspection fixtures. The IDB-CTB method can be of immediate interest for the manufacturing industry in general and, more specifically, for the aerospace and automotive sector. It contributes greatly to its productivity and competitiveness.

2.8 Acknowledgments

The authors would like to thank the National Sciences and Engineering Research Council (NSERC) and the École de Technologie Supérieure (ÉTS) for their support and financial contribution.

CHAPITRE 3

THE COHERENT POINT DRIFT ALGORITHM ADAPTED FOR FIXTURELESS DIMENSIONAL INSPECTION OF DEFORMABLE BODIES

Ali AIDIBE, Antoine S. TAHAN,

Mechanical Engineering Department, École de technologie supérieure (ÉTS)

1100 Notre-Dame Ouest, Montréal, Québec, Canada H3C1K3

This chapter has been submitted for publication

3.1 Abstract

In a free-state condition, deformable bodies (or compliant parts) may have a significantly different shape than their nominal geometry (CAD model) due to gravity loads and residual stress. Typically, the dimensional metrology of such parts requires a particular approach where expensive and specialized jigs are needed to constrain and follow the component during inspection. Inspecting these parts without specialized fixtures will have significant economic impacts on industry, reducing the delays and costs associated with product quality inspection. This paper proposes a new method to fixtureless inspect compliant parts. This new approach combines the optimization of the *Coherent Point Drift* powerful non rigid registration method with the Thompson-Biweight statistical test as an identification method to distinguish profile and localization process manufacturing defects of a part's deformation. In other words, a 'flexible' registration that meets the specifications of compliant parts is proposed. The CAD model is smoothly modified to fit the scanned part by minimizing two criteria that belong to deformable bodies. The first criterion is the conservation of the curvilinear distance. That is to say, it is the condition that the stretch difference between the original CAD model and the modified one should be very small. The second criterion is the Euclidian distance between the modified CAD model and its corresponding scanned part. The goal of this study is to deliver an inspection report which determines whether the tolerance fits the CAD model or not. Many case studies were performed on an industrial

sheet metal which presented profiles and localization defects. The estimated values of the defects, as well as their positions, are much closer to their reference ones in most cases, thus reflecting the effectiveness of the proposed method.

Keywords – registration, inspection, metrology, compliant, non-rigid, deformation, fixtureless, outliers.

3.2 Introduction

The process of new product development has been subject to major changes over the last two decades. Accordingly, we can cite the reduction of development time, the massive integration of virtual modelers, as well as the development of the global economy. For instance, the industrial context is characterized by a technological maturity and development costs which are subject to strong competition. Competitiveness involves metrology, which concerns the application of measurement science to manufacturing parts ensuring that they are in a state of compliance with engineering requirements. The problem with the dimensional and geometric variations of mechanical components has been studied by many researchers in the case of rigid parts. In spite of all the research, no viable and industrial solutions in the case of compliant parts are available. Compliant parts, in a free-state condition, may have a significantly different form than their nominal model (CAD) due to gravity load and residual stress. Specialized fixtures are needed for the inspection of such parts which lead to difficulties and significant costs to the transport industry. Figure 3.1 shows experimental case studies from Bombardier Aerospace Inc. The required preparation time for the inspection of these compliant parts is about 50-60 man-hours. Therefore, automatic fixtureless inspection becomes a crucial issue in order to keep the global manufacturing market competitive. This work proposes a methodology to improve inspection and validation operations. The expected improvement derives from taking into account the phenomena which are related to the flexibility in the choice of assembly and registration methods as well as their arising correlations.

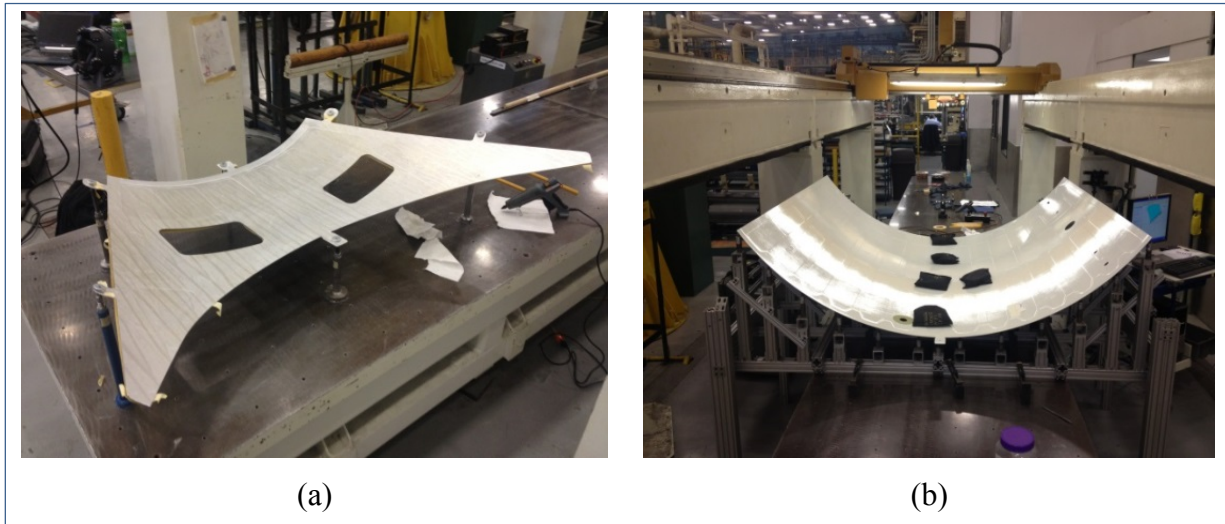


Figure 3.1 Specialized fixtures for the inspection of aerospace compliant parts – Source: Bombardier Aerospace Inc.

This research aims to identify the magnitude and location of defects induced by the inherent varying manufacturing processes, from a cloud of points collected in conditions without specialized fixtures.

To deal with this issue, a novel approach is developed. This new method takes advantage of the coherent point drift powerful rigid and non-rigid registration method and combines it with the Thomson-Biweight statistical test as an identification module which respects the following assumptions:

- The part or the assembly, when scanning, allows elastic deformations greater than the required tolerance profile.
- Inspection is limited to the defects in the surface profile [\frown and \smile] and the localization [\oplus] as defined by ASME Y14.5 (2009).
- Part materials are considered isotropic with well-known characteristics.
- The manufactured part is a sheet metal completely scanned and represented as a point cloud (x, y, z) .
- The point cloud represents a significant coverage of the original surface.
- The defects, considered as outliers in our case, are of the same order of magnitude as the assigned tolerance zone.

The remainder of this paper is organized as follows: the automated 3D shape inspection and a literature review of registration techniques are presented in Sections 2. Section 3 describes the proposed approach for the metrology of fixtureless compliant parts. This method is tested and validated on twenty six case studies described in Section 4 followed by an analysis and a discussion of the results. Finally, a summary is provided in Section 5.

3.3 Background

From an industrial requirement perspective, a part is considered 'compliant' if the typical value of the deformation resulting from applying a typical force of 150 – 450 N/m [10 – 30 lbf/linear foot] is more than 10% of its assigned profile tolerance (AIAG, 2002). The force value is dictated by what is commonly used in a manual assembly line. This definition isn't absolute. In certain mechanical parts, it's possible to have rigid, as well as non-rigid, areas. To facilitate analysis, three different zones categorized the compliant parts:

- **Zone A** for the relatively rigid parts. The displacement induced by a reasonable force during inspection is less than 10% of the parts' assigned tolerance.
- **Zone B** for the relatively compliant parts. Parts classified in this zone are the most problematic to manage with regards to the specification, tolerance, and inspection of their geometric and dimensional requirements. By applying a certain amount of force, these parts get closer to the third zone.
- **Zone C** for the very flexible parts. In this zone very large deformations are produced just by the effect of the gravity (such as textile, human tissue, vessels, etc.).

As mentioned earlier, jigs and specialized mounting fixtures are needed by the industry to constrain dedicated and to follow the component during inspection. Therefore the aim of the research is to identify the magnitude and location of defects induced by the inherent varying manufacturing processes, from a cloud of points collected in conditions without specialized fixtures in cases where relatively compliant parts (**Zone B**) represent the majority of industrial cases.

Automated 3D shape inspection

Most research aims to solve the problem of the dimensional and geometric variations of rigid mechanical components (Yadong et Peihua, 2004). Despite the research, there still no viable solutions in the case of compliant parts exist. A literature review of automated 3D freeform shape inspection belonging to deformable bodies is provided in (Aidibe *et al.*, 2014; Abenhaim *et al.* 2012).

Point set registration

Point set registration, also known as point matching, is a key component in pattern recognition and computer vision. The purpose of this process is to find the transformation that aligns one point set to another. In addition, it can be used to assign a correspondence between two sets of points.

In general, there are two categories of registration categories: rigid and nonrigid. A rigid transformation allows only for translation and rotation. Non-rigid transformation typically involves nonlinear transformation and is very useful in many real-world problems, including deformable motion tracking, shape recognition and medical image registration. Affine registration is the simplest non-rigid transformation and allows for scaling and shear mapping. Figure 3.2 provides a brief overview of the main powerful existing rigid and non-rigid point set registration algorithms.

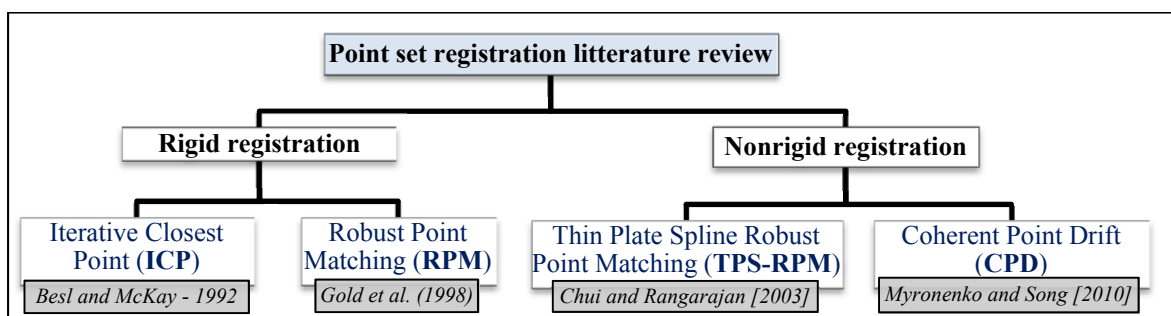


Figure 3.2 Point set registration partial overview.

The Iterative Closest Point (ICP) algorithm developed in 1992 by Besl and Mackay represents one of the most important 3D rigid matching registration techniques. Taking advantage of the characteristics of the quaternions, this ICP algorithm iteratively estimates the least square rigid transformation matrix used to align the scanned part with its corresponding nominal model. This is done by minimizing the square errors between the corresponding entities.

Another rigid registration technique that overcomes the ICP limitations is the Robust Point Matching algorithm (RPM) developed by Gold *et al.* (1998). It performs registration using deterministic annealing and soft-assignment of correspondences between all combinations of points according to a certain probability, which generalizes the binary assignment of correspondences in ICP. By combining the Thin Plate Spline (TPS) parameterization of the transformation with the RPM method, we fall into one of the most popular non-rigid point set registration developed by Chui and Rangarajan (2003) known as the TPS - RPM method.

In 2010, Myronenko and Song introduced the Coherent Point Drift (CPD) algorithm which is a probabilistic method for both rigid and non-rigid point set registration. It is considered one of the most powerful non-rigid registration techniques. They considered the alignment of two point sets as probability density estimation, where one point set represents the Gaussian Mixture Model centroids, and the other represents the data points. They iteratively fit the GMM centroids by maximizing their likelihood and finding the posterior probabilities of centroids, which provide the correspondence probability. At the core of their method they force the GMM centroids to move coherently as a group, which preserves the topological structure of the point sets. CPD has been used in many applications, particularly in the medical domain. In original CPD, a weight parameter w reflects an assumption of the amount of noise in the point. To avoid setting this parameter manually, a fully automatic refined CPD algorithm is proposed by Peng *et al.* (2011) to select the optimal weight parameter w using a hybrid optimization procedure. Koch *et al.* (2013) modeled the left atrium shape modeling by taking advantage of the non-rigid point cloud CPD registration. Based on the set of non-rigidly registered point clouds, they perform a principal component analysis to establish a deformable shape model. For vessel-based registration applications, Hu *et al.*

(2010) developed an extension of the CPD algorithm to enable landmarks guides, such as vessel bifurcations, in order to improve the registration accuracy and speed of execution.

Although there are numerous registration algorithms that offer robust and fast solutions but they are adapted to specific cases that do not match with our alignment problems of relatively compliant parts located in Zone B. For example, the ICP algorithm which is perfectly adapted for rigid parts located in Zone A isn't able to produce good results for relatively non-rigid parts. As well, the CPD algorithm is very effective for very flexible parts located in Zone C (widely used in medical imaging). In this case, a stretching of the surface is permitted which doesn't correspond to the characteristics of the relatively flexible parts (Figure 3.3). In short, a 'flexible registration' that retains the curvilinear distances (geodesic) while taking into account the presence of manufacturing defects areas on the inspected part is needed. Following the proposed methodology to solve this problem is described.

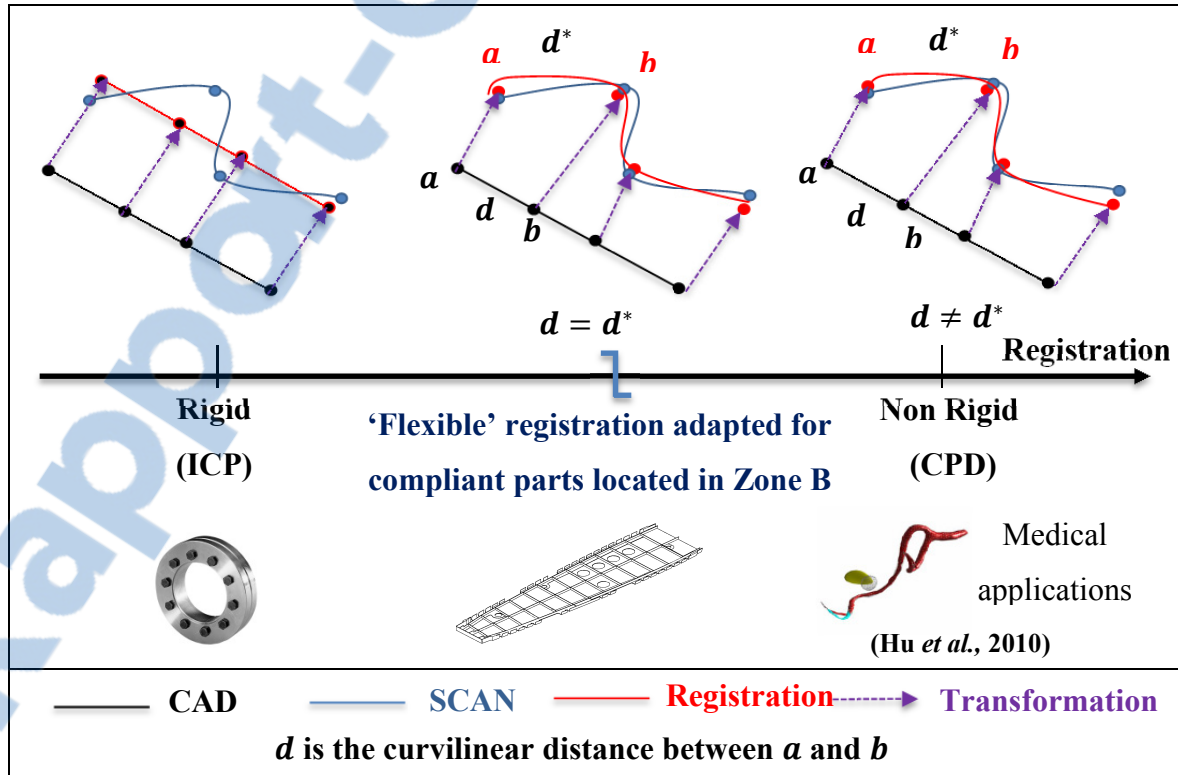


Figure 3.3 Problematic of relatively flexible parts registration problematic.

3.4 Methodology

As mentioned in Section 3.3, the aim is to develop a ‘flexible’ registration technique adapted to relatively compliant parts located in Zone B. The proposed method is based on the optimization of the Coherent Point Drift algorithm parameters combined with a statistical identification module based on the extreme value analysis to distinguish the defects due to the manufacturing process from the deformation due to the flexibility of a given compliant part located in Zone B. The proposed identification module combines the Thompson extreme value statistical test (Thompson, 1985) with the biweight mean and standard deviation estimator technique (Hoaglin *et al.*, 1983) in order to detect the defects. The defects are considered as ‘outliers’ that have the same order of magnitude than the part’s assigned tolerance and must be detected dynamically and iteratively. In this section the main steps of the proposed method summarized in Algorithm 3.2 will be detailed.

3.4.1 Prealignment

Let $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots, s_n | s_j \in \mathbb{R}^3\}$ be the set of n nodes representing the meshed CAD model and $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_m | p_j \in \mathbb{R}^3\}$ be the set of $m | m \gg n$ nodes representing the scanned part. The Iterative Closest Point (ICP) algorithm developed by Besl and McKay in 1992 is used in order to register the two given point sets in a common coordinate system.

3.4.2 Initialization of parameters that will be optimized

Originally, the CPD algorithm includes three free parameters w , λ and β which are set manually:

1. Parameter w ($0 \leq w \leq 1$) reflects the assumption about the amount of noise in the point sets and number of outliers in the Gaussian mixture model, and its value has an influence on the point set registration performance.
2. Parameters λ and β both reflect the amount of smoothness regularization. Parameter β defines the model of the smoothness regularizer. Parameter λ represents the trade-off

between the goodness of maximum likelihood fit and regularization (Myronenko et Song, 2010). In other words, β controls the rigidity and the locality of spatial smoothing while λ reflects its strengths. CPD algorithm is more sensitive to parameter β because it defines the model of the nonrigid transformation. A detailed explanation about the difference between these two parameters is given by Yuille *et al.* (1989).

One of the main contributions of this paper is a proposition to automatically estimate parameters λ and β by a process that decides how much smoothing is necessary and how wide the range of interaction should be with respect to certain specific criteria. These criteria belong to relatively compliant parts (Zone B) and they are described in the next paragraph. The proposed method is started by initializing λ and β . Typically $\lambda_0 \in [1 \ 100]$ and $\beta_0 \in [1 \ 20]$, where λ_0 and β_0 are the initial parameters of λ and β .

3.4.3 Optimization of the parameters λ and β :

With an each combination of λ and β (iteration i), the CAD model S is aligned to the scanned part P by the non-rigid transformation method of the CPD algorithm.

$S' = \{s'_1, s'_2, s'_3, \dots, s'_n | s'_j \in \mathbb{R}^3\}$ is the set of n nodes resulting from this alignment and $C = \{c_1, c_2, c, \dots, c_n | c_j \in \mathbb{R}^3\}$ is the set of n nodes representing the closest point in P to S' . A *dsearchn* function in Matlab® based on Quickhull (Barber *et al.*, 1996) is used to find C .

In this section, two criteria that belong to the problematic of relatively compliant parts (Zone B) are introduced: the conservation of the curvilinear distance (stretch criterion) and the minimization between two objects (Euclidian Distance criterion).

- The **STRETCH criterion** between S and S' (equation 3.1, Figure 3.4). In other words, the isometric transformation difference between them that should be small.

$$\Delta_{Stretch} = |Stretch_{S'} - Stretch_S| = \left| \frac{\sum_{i=1}^{Ne} d'_i}{Ne'} - \frac{\sum_{i=1}^{Ne} d_i}{Ne} \right| \quad (3.1)$$

Where Ne is the number of neighborhoods around point s_i and d_i the distance between s_i and its neighborhood.

- The **EUCLIDIAN DISTANCE criterion** between C and S' (equation 3.2, Figure 3.4).

$$\Delta_D = |D_{C,S'} - D_{reference}| \quad (3.2)$$

Where D is the Euclidian distance between s'_i and its corresponding point c_i . $D_{reference}$ represents the ideal value between c_i and s'_i that must be equal to zero.

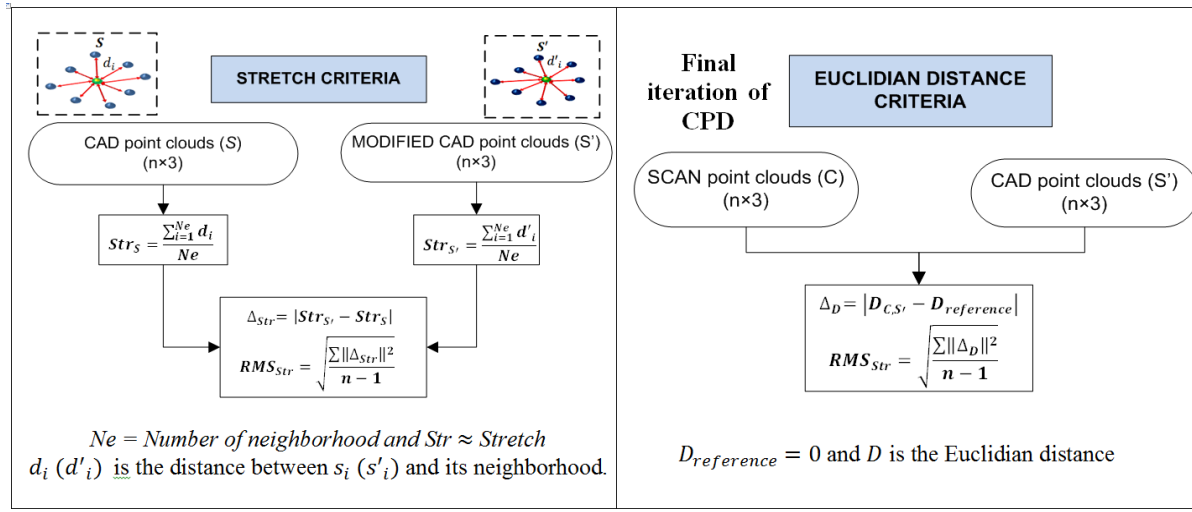


Figure 3.4 Description of the criteria that belong to relatively compliant parts.

For each criterion, its root mean square error is computed as presented in equations 3.3 and 3.4.

$$RMS_{Stretch} = \sqrt{\frac{\sum \|\Delta_{Stretch}\|^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

$$RMS_D = \sqrt{\frac{\sum \|\Delta_D\|^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

And the aim to minimize the corresponding objective function F (equation 3.5):

$$\min F(\beta, \lambda|C, S, S') = \min \alpha \times RMS_{Stretch} + RMS_D \quad (3.5)$$

α is added to ensure the same order of magnitude between the root mean square errors. We set α to 20.

Iteration (i) ends when the last step is smaller than a termination tolerance (ϵ) on the function or when the maximum number of iteration ($MaxIter$) is reached. The optimal parameters β_{opt} and λ_{opt} (equation 3.6) will be used to output the corresponding final transformation parameters as computed by the CPD algorithm.

$$(\beta_{opt}, \lambda_{opt}) = \operatorname{argmin} F \quad (3.6)$$

3.4.4 The Thompson-Biweight test identification module:

In the proposed algorithm, the defects stemming from the manufacturing process are identified as outliers of the Euclidian distance estimated between C and S' . In statistics, an outlier is an observation that is numerically distant from the rest of the data. The Thompson statistical test with the biweight mean and standard deviation estimator techniques are used as identification modules to distinguish between the defects and the deformations. In our assumption, outliers have the same order of magnitude than the assigned part's tolerance. As well, we are dealing with profile and localization defects. The Thompson Tau Technique is a statistical method for deciding whether to keep or discard suspected outliers in a sample of single and multiple variables. The biweight is a more sophisticated estimator belonging to a category known as redescending estimators. The biweight estimate is a weighted average where weighting decreases from the center of the distribution. Thereafter, the term Thompson-Biweight will be used to designate the proposed statistical identification method summarized in Algorithm 3.1.

Algorithm 3.1 The identification module of the proposed method algorithm

1. Begin

2. Input the Euclidian distance vector D ;
3. Arrange D values in increasing order, so that the suspected outliers are easily spotted;
4. Estimate the median (M) which is the “middle” value of a distribution by:

$$M = \begin{cases} D_{(n+1)/2} & n \text{ odd} \\ (D_{n/2} + D_{(n/2)+1})/2 & n \text{ even} \end{cases}$$

5. Estimate the MAD which is the median of the absolute values of the deviations of the sample values from the median by: $MAD = Median (|D - M|)$;
6. Set the parameter c ; The bought influence function returns to zero at some distance away from the center of the distribution. This distance is controlled by a parameter c . All values beyond a certain critical distance from the center are given zero weight. A c value between 6 and 9 is recommended [13]. We propose $c = 9$ in our method (Sensor values more than 6 standard deviations away);
7. Compute u_i which is a weight corresponding to each of the n observations D_i by:

$$u_i = \frac{D_i - M}{c \times MAD}$$

8. Estimate \bar{D} using the biweight mean estimator technique:

$$\bar{D} = M + \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - M)(1 - u_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n (1 - u_i^2)^2}$$

9. For each D_i , compute the absolute value of the deviation: $\delta D_i = |D_i - \bar{D}|$;
10. Compute the value of the Thompson technique τ (Greek letter tau). τ is calculated from the critical value of the student's density function.

$$\tau = t_{\frac{\alpha}{2}, n-2} \cdot (n-1) / \sqrt{n} \sqrt{n-2 + t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}^2}$$

Where $t_{\frac{\alpha}{2}, n-2}$ is the critical student's t

value with $(n-2)$ degrees of freedom and a significance level of $\alpha/2$;

11. Estimate s_{bi} which is the biweight standard deviation of D .

$$s_{bi} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (D_i - M)^2 (1 - u_i^2)^4}{\sum_{i=1}^n (1 - u_i^2)(1 - 6u_i^2)}};$$

12. We determine whether to reject or keep this suspected defect, using the following rules: *If* $\delta D_i > \tau s_{bi}$ Reject the data point. It's a defect; *else* Keep the data point. It's not a defect.

13. The weights $w_i = \begin{cases} 0 & \text{for the points identified as outliers in } D \text{ (defects),} \\ 1 & \text{else} \end{cases}$,

14. End

3.4.5 Summary of the proposed method

Having explained the optimization CPD method, as well as the identification method, a summary of the proposed fixtureless inspection algorithm belonging to compliant parts will now be presented. Starting with the set of nodes s_i of the CAD model and the point cloud p_i of the manufactured part, the proposed method is summarized in the Algorithm 3.2.

Algorithm 3.2 Main steps of the proposed method

- 1. Begin**
2. **Prealignment** using the ICP algorithm;
3. **Initialization** β_0, λ_0 ;
4. **Repeat**
 5. CPD non-rigid registration to align the CAD model (S) into the scanned part. As a result we'll have a modified CAD named S' ;
 6. Compute the Stretch criteria between S and S' ;
 7. Find the corresponding points C in P to S' ;
 8. Compute the Euclidean distance criteria between P and C ;
 9. Compute the objective function F ;
 10. Optimize the objective function F using the optimization technique, making β, λ the unknown parameters;
 11. Update the parameters β, λ ;
- 12. Until** the last step is smaller than a termination tolerance (ϵ) on the function or when the maximum number of iteration ($MaxIter$) is reached; then output the optimal parameters $\beta_{opt}, \lambda_{opt}$ and its corresponding final transformation parameters T as computed by the CPD algorithm.
- 13. Thompson-Biweight statistical identification module;**
- 14. CPD using** $\beta_{opt}, \lambda_{opt}$;
- 15. End**

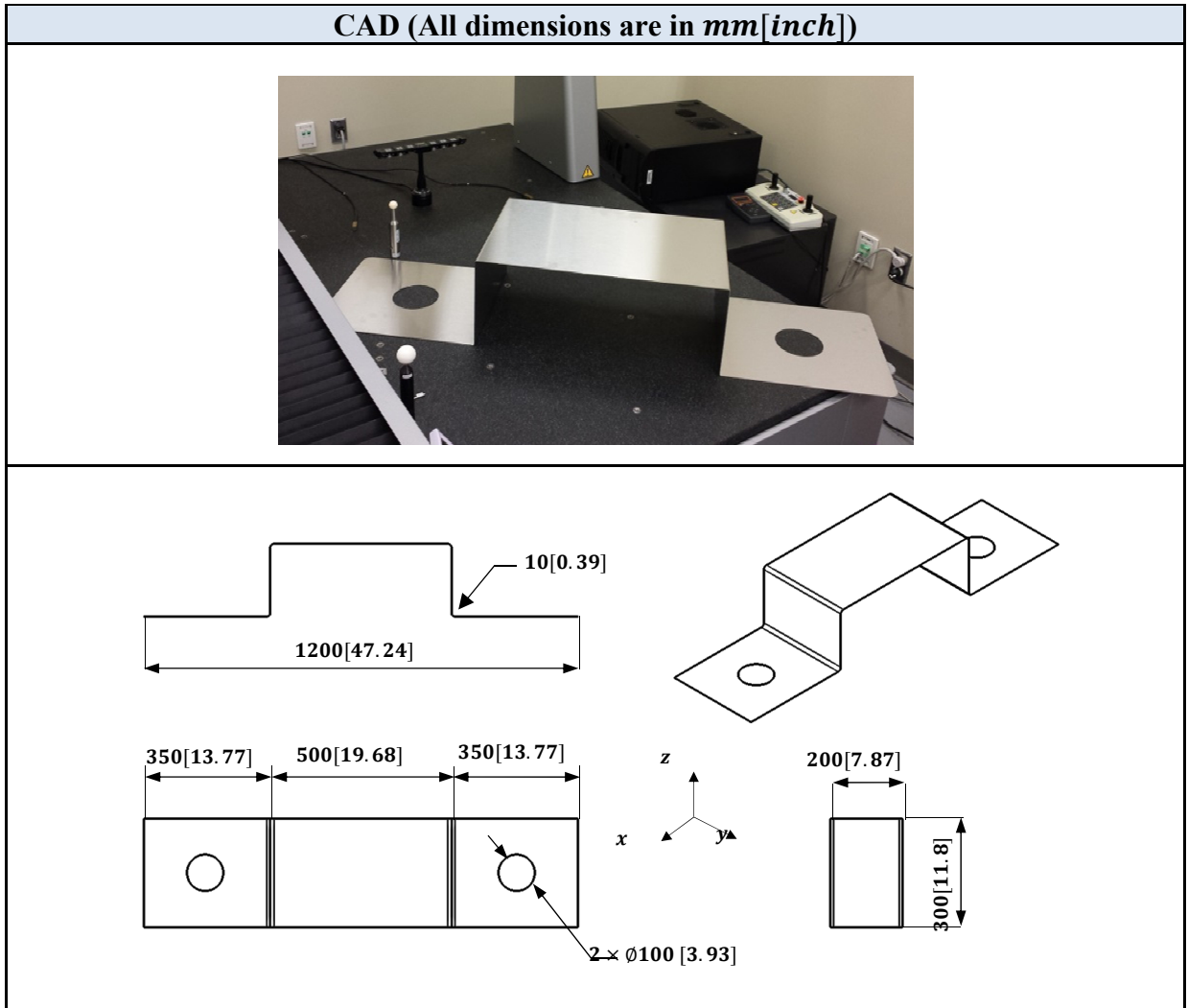
3.5 Case studies and validation

In order to test and validate the approach developed in this paper; this section will feature twenty six industrial case studies.

3.5.1 Description of the case studies

A sheet metal representing a sample of common parts in the transport industry will be considered for our case study. The part is made with an aluminum gauge 14 (1.63 *mm*) with a Young modulus of 7×10^{10} *Pa* and a density of 2700 *kg.m⁻³*. Figure 3.5 shows the test panel designed and manufactured at École de Technologie Supérieure (ÉTS), Montréal, Canada. In a free-state, the part shape varies significantly from its nominal shape. Twenty six case studies were carried out in order to test and validate our approach.

It is our assumption that we are dealing with profile and localization defects (sheet metal bend failure, erroneous hole location...). The finite element analysis takes into account both the mounting fixture configuration during a presumed digitalization and the force of gravity. The spatial sampling frequency of scanned data is different from the mesh used in the CAD data. Twenty six point clouds, representing the part's mesh with different defect zones and deformed shapes, are then created.



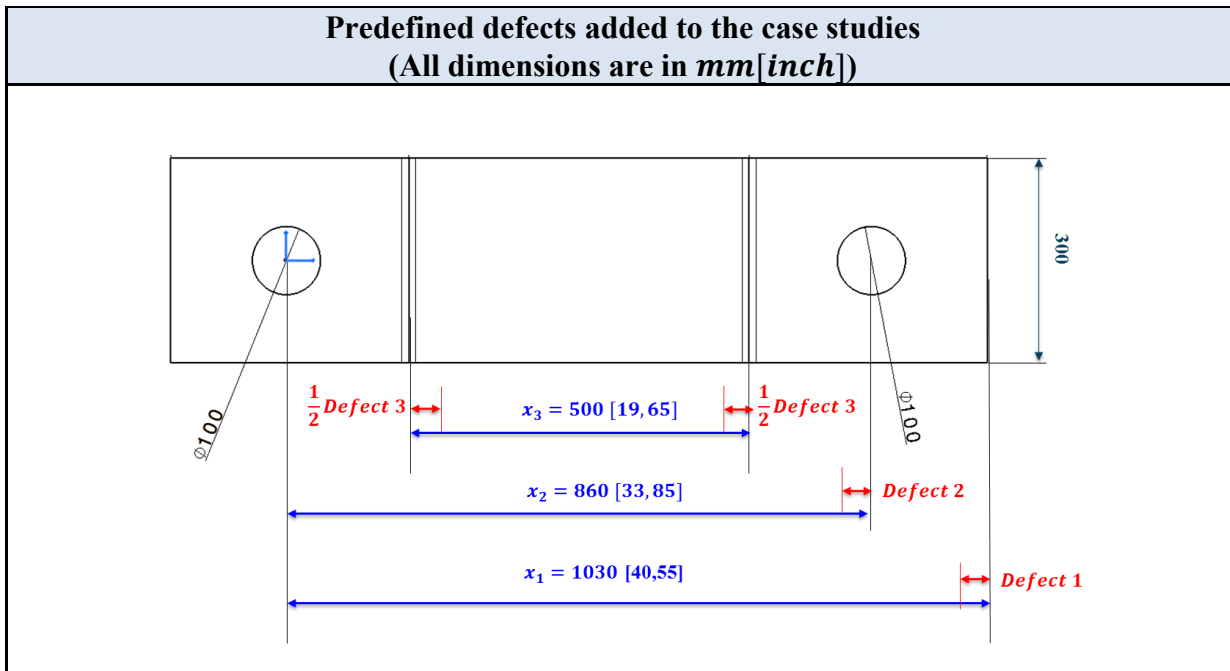


Figure 3.6 Description of the case studies (2)

Figure 3.6 and Tableau 3.1 describe the different positions of the imposed manufacturing defects. Defect 1 and Defect 3 (profile defects) represent dimensional bend sheet metal failure. Defect 2 (localization defect) represents a hole that is not drilled in the correct position. V0 tests are performed to ensure that the method does not induce a bias. In other words, no defects should be detected if there aren't any imposed defects in the simulation part. In addition, twenty five additional tests representing a combination of the imposed defects (Defect 1, Defect 2 and Defect 3) were performed to validate the methodology.

Tableau 3.1 Description of the case studies

(All dimensions are in $mm[inch]$)					
Case Study	$(n\ m)$		Defect 1 ($x_1 = 1030[40.55]$)	Defect 2 ($x_2 = 860[33.85]$)	Defect 3 ($x_3 = 500[19.68]$)
	CAD	SCAN			
A	V0	(4865 20046)	0[0]	0[0]	0[0]
	V1	(4865 20113)	3.5[0.1377]	0[0]	0[0]
	V2	(4865 20108)	7[0.275]		
	V3	(4865 19940)	17.5[0.689]		
	V4	(4865 19731)	28[1.1]		
	V5	(4865 19719)	35[1.378]		
B	V1	(4865 20046)	0[0]	1.8[0.07]	0[0]
	V2	(4865 20052)		3.6[0.14]	
	V3	(4865 20042)		9[0.354]	
	V4	(4865 20051)		14.4[0.567]	
	V5	(4865 20050)		18[0.7]	
	V6	(4865 20046)		18[0.7]	
C	V1	(4865 20117)	3.5[0.1377]	1.8[0.07]	0[0]
	V2	(4865 20101)	7[0.275]	3.6[0.14]	
	V3	(4865 19942)	17.5[0.689]	9[0.354]	
	V4	(4865 19728)	28[1.1]	14.4[0.567]	
	V5	(4865 19719)	35[1.378]	18[0.7]	
	V6	(4865 19719)	18[0.7]	18[0.7]	
D	V1	(4865 20082)	0[0]	0[0]	5[0.197]
	V2	(4865 19993)			10[0.393]
	V3	(4865 19833)			25[0.984]
	V4	(4865 19581)			40[1.575]
	V5	(4865 19498)			50[1.97]
	V6	(4865 19498)			50[1.97]
E	V1	(4865 20084)	3.5[0.1377]	1.8[0.07]	50[0.197]
	V2	(4865 19938)	7[0.275]	3.6[0.14]	10[0.393]
	V3	(4865 19664)	17.5[0.689]	9[0.354]	25[0.984]
	V4	(4865 19310)	28[1.1]	14.4[0.567]	40[1.575]
	V5	(4865 19044)	35[1.378]	18[0.7]	50[1.97]
	V6	(4865 19044)	18[0.7]	18[0.7]	50[1.97]

3.5.2 Results and discussion

The scanned parts are compared with their corresponding nominal models using the proposed method. All case studies were performed on an Intel Core i7, 1.73 GHz, 4.0 GByte using a 64 bit operating system. The optimization phase was performed using the constrained nonlinear minimization (fmincon) on a Matlab R2012b platform. Tableau 3.2 presents the results of the method. No defects are detected in the V0 case and this ensures that the proposed method does not create a bias.

The nominal model is aligned to the scanned one in all cases using the optimized coherent point drift section of the proposed algorithm. The results of this alignment as well as those of the Thompson-Biweight identification module reflect an excellent detection of the imposed profile and localization defects.

Figure 3.7 shows the results of the identification module for case A-V5. The Thompson test identification threshold corresponds to $\pm 3\sigma \approx 99.7\%$ of the set. Profile defects (encircled) are detected and removed after being considered as outliers. This proves that the proposed algorithm is able to correctly **identify** and **select** the zones that represent the profile and/or the localization manufacturing defects. This is to say, the **position** of the defect.

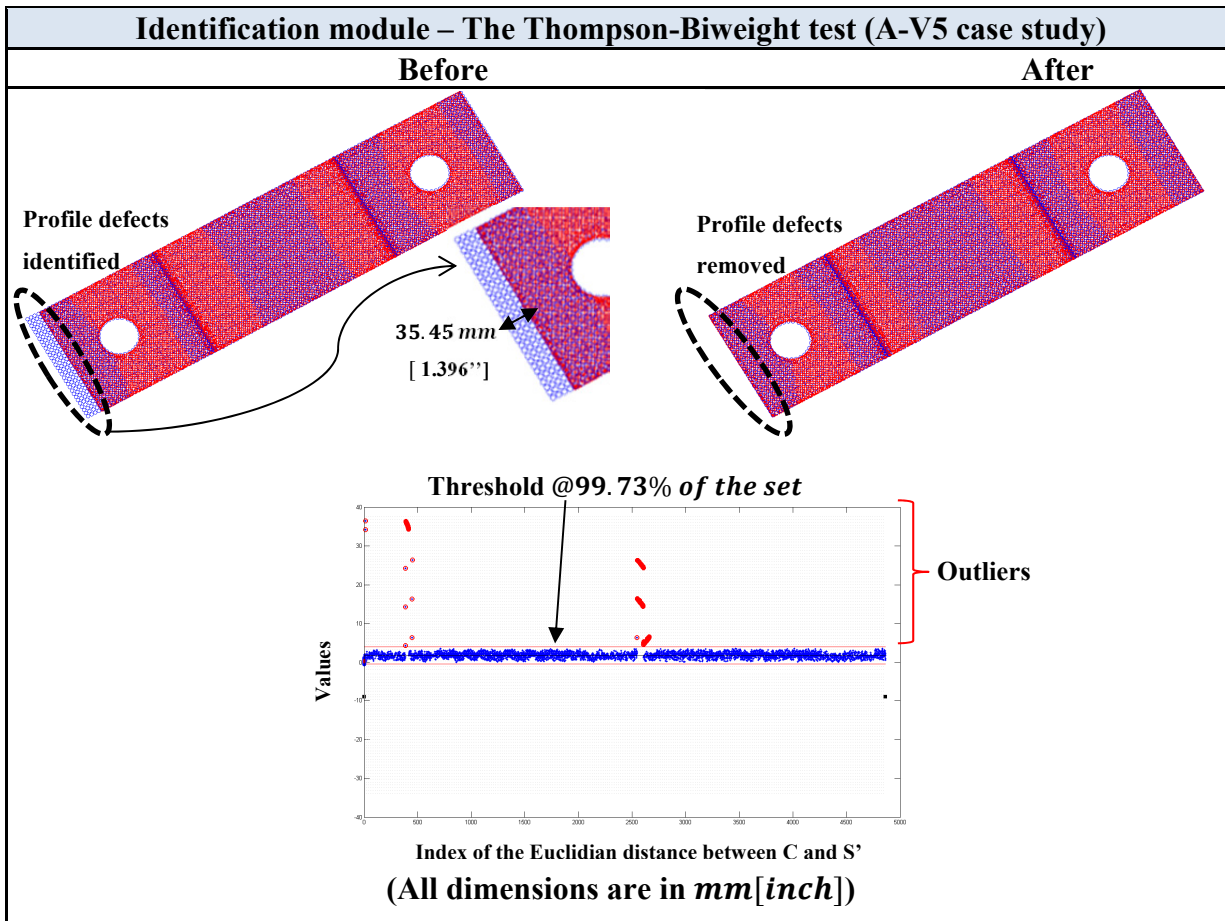


Figure 3.7 Results of the identification module

Tableau 3.2 Table of results of the proposed method

(All dimensions are in $mm[inch]$)									
Case	$(\beta \lambda)$	Nominal value			Estimated value				
		Defect 1	Defect 2	Defect 3	Defect 1	Defect 2	Defect 3		
V0	(4.5 11)	0[0]	0[0]	0[0]	0[0]	0[0]	0[0]		
A	V1	(9.75 50)	3.5[0.1377]	0[0]	0[0]	3.567[0.14]	$\approx 0[0]$	$\approx 0[0]$	
	V2	(8.1 49)	7[0.275]			7.218[0.284]			
	V3	(8.25 49.3)	17.5[0.689]			17.93[0.7]			
	V4	(8.25 49.2)	28[1.1]			28.226[1.11]			
	V5	(10 50)	35[1.378]			35.45[1.396]			
B	V1	(8 10)	0[0]	0[0]	$\approx 0[0]$	1.9[0.075]	$\approx 0[0]$		
	V2	(8.1 9.9)				3.6[0.14]		3.607[0.142]	
	V3	(4.95 5.1)				9[0.354]		8.8[0.346]	
	V4	(4.95 5.1)				14.4[0.56]		14.26[0.56]	
	V5	(10.2 50)				18[0.7]		17.37[0.684]	
C	V1	(19.5 98)	3.5[0.1377]	1.8[0.07]	0[0]	3.458[0.136]	1.168[0.046]	$\approx 0[0]$	
	V2		7[0.275]	3.6[0.14]		7.22[0.284]	3.186[0.125]		
	V3		17.5[0.689]	9[0.354]		17.59[0.69]	8.37[0.33]		
	V4		28[1.1]	14.4[0.56]		28.14[1.1]	13.82[0.544]		
	V5		35[1.378]	18[0.7]		34.58[1.36]	17.13[0.67]		
D	V1	(13.9 86)	0[0]	0[0]	$\approx 0[0]$	$\approx 0[0]$	4[0.157]	$\approx 0[0]$	
	V2						10[0.393]		9.32[0.36]
	V3						25[0.984]		25.86[1]
	V4						40[1.575]		39.12[1.5]
	V5						50[1.97]		48.6[1.91]
E	V1	(12.9 74)	3.5[0.1377]	1.8[0.07]	5[0.197]	3.3[0.13]	1.51[0.06]	4.12[0.16]	
	V2		7[0.275]	3.6[0.14]	10[0.393]	7.12[0.28]	3.23[0.127]	9.26[0.36]	
	V3		17.5[0.689]	9[0.354]	25[0.984]	17.6[0.693]	8.35[0.328]	24.27[0.9]	
	V4		28[1.1]	14.4[0.56]	40[1.575]	27.84[1.09]	13.94[0.548]	38.9[1.53]	
	V5		35[1.378]	18[0.7]	50[1.97]	34.47[1.357]	18.61[0.73]	48.73[1.9]	

Table 3.2 shows that the estimated values of the defects are much closer to the reference ones in all cases. This proves that the proposed approach achieves excellent results in the detection of the **value** of the manufacturing defects.

3.6 Conclusion

This paper proposed a new method for the fixtureless quality control of compliant parts. The proposed approach dealt with parts presenting profile and localization process manufacturing defects. This method consists of an optimization of the famous coherent point drift non-rigid

alignment in order to adapt it to the problem of relatively compliant parts. A CAD model is smoothly aligned to the scanned part by the CPD algorithm. Two criteria belonging to relatively compliant parts are introduced: the Stretch criterion between the original CAD model and the aligned one and the Euclidian distance criterion between the aligned CAD model and its corresponding scanned part. The method proposed to automatically estimate the regularization parameters λ and β of the CPD algorithm in order to minimize the proposed objective function that combines these two criteria. This process is followed by the Thompson statistical test, and the biweight mean and standard deviation estimator in order to distinguish deformations due to the flexibility and the positioning of parts from deviations due to the manufacturing process. The identification module considers the ‘outliers’ as defects having the same order of magnitude than the assigned part’s tolerance. The profile and localization defects estimated results in twenty six different industrial case studies present closer values to the reference ones, thus reflecting the effectiveness of the proposed approach. This work will result in future gains for the industry by anticipating economic savings and productivity improvement due to the elimination of the conformation jigs and the reduction of inspection cycle time. This method would efficiently manage deformable bodies at a lower cost thus providing a manufacturing competitive advantage to the global economy.

3.7 Acknowledgments

The authors would like to thank the National Sciences and Engineering Research Council (NSERC), Bombardier Aerospace Inc. and the École de Technologie Supérieure (ÉTS) for their support and financial contribution.

CONCLUSION

Dans le cadre de cette thèse, la problématique industrielle de l'inspection des pièces mécaniques souples (non rigides) sans recours à des gabarits de conformation a été exposée. Plusieurs approches ont été développées et présentées pour répondre aux deux questions fondamentales :

- Comment peut-on s'assurer de la conformité géométrique des pièces souples (non rigides) sans le recours à un gabarit spécialisé pour les conformer ?
- À partir d'un nuage de points capté à l'état libre dans une condition arbitraire mais connue, comment peut-on identifier les défauts de fabrication sur une pièce souple ? En d'autres termes, comment peut-on distinguer, avec un niveau de confiance acceptable, les défauts qui sont dus au processus de fabrication et les déformations qui sont dues à la flexibilité de la pièce ?

Ces deux questions trouvent un intérêt très élevé dans le secteur du transport en général et, plus spécifiquement, dans le secteur aérospatial. En effets, les gabarits de conformation (ou encore les montages dédiés à l'inspection d'une seule pièce) sont très couteux à fabriquer et à maintenir (étalonnage). Une réponse robuste et fiable aux deux questions précédentes aura comme implication directe une amélioration de la compétitivité de l'industrie.

Dans un premier temps, nous avons présenté dans le Chapitre 1 une amélioration substantielle du module d'identification d'un algorithme existant, le « IDI : *Iterative Displacement Inspection* », qui a été développée par Abenhaim *et al.* (2011). Les résultats obtenus au niveau des erreurs de Type I et de Type II prouvent le degré d'amélioration que nous avons apportée à l'algorithme IDI. Également, avec l'automatisation du seuil d'identification, nous croyons que l'algorithme IDI est plus robuste et surtout, plus apte à un usage industriel. Cette partie de notre recherche a fait l'objet d'une publication dans une revue ainsi que deux exposés dans des conférences.

Dans le Chapitre 2 de cette thèse, une approche analytique qui vise à quantifier la flexibilité/rigidité a été présentée et adoptée pour le reste de notre recherche. En effet, la flexibilité peut être subjective, nous avons proposé une « échelle » afin de comparer les composants entre eux. Suite à cette méthode, trois zones ont été bien établies permettant à l'industrie manufacturière de bien classer leurs composants mécaniques sur l'échelle de la flexibilité. Nous nous sommes concentrés dans cette thèse à l'inspection des pièces mécaniques relativement flexibles qui sont situées dans la zone B et qui représentent la vaste majorité des applications industrielles dans le domaine du transport.

Par la suite, deux méthodes originales et complémentaires ont été développées dans le deuxième et le troisième chapitre de cette thèse.

La première approche, développée dans le Chapitre 2, vise à détecter les défauts localisés de profil géométriques de surface. En tirant avantage de l'estimation de la courbure gaussienne qui représente l'une des propriétés intrinsèques de la géométrie, et en la combinant avec la méthode statistique *Thompson-Biweight*, nous avons réussi à développer un module d'identification qui détecte les défauts localisés de profils et de les séparer des déformations dues à la flexibilité de la pièce (effets de gravité et contraintes résiduelles). Les performances métrologiques de cette méthode sont limitées à la détection des défauts de profils d'ordre 1 à condition qu'ils soient spatialement localisés (comme les bosses) et d'ordre 2 (comme les ondulations, collines et vallées successives, inscrites dans le profil). Cette méthode ne peut pas détecter les autres types de défauts de profil tels que le mauvais pliage, ni les défauts de localisation (un trou qui n'est pas à sa bonne position). Cette partie de notre recherche a fait l'objet d'une publication dans une revue ainsi que deux exposés dans des conférences.

La deuxième méthode, présentée dans le Chapitre 3 de la thèse, se veut une nouvelle approche pour remédier aux limites de l'approche basée sur les courbures gaussiennes. Notre objectif consiste à détecter les autres types de défauts de fabrication comme les défauts sur les périphéries, les défauts de localisation ou du pliage. Le point de départ de cette approche a été les caractéristiques intrinsèques à un calage « flexible ». En effet, le calage non rigide

ne peut être adapté dans notre cas, car il ne conserve pas la transformation isométrique. Par conséquent, nous avons introduit dans cette approche deux critères qui correspondent aux spécificités des composantes mécaniques souples ; la conservation de la distance curviligne (géodésique) et la minimisation de la distance de Hausdorff propre à n'importe quel calage. Nous avons adapté l'algorithme CPD (*Coherent Point Drift*), algorithme de recalage non rigide basée sur une approche probabiliste, afin qu'il satisfasse ces deux critères à travers l'optimisation des paramètres de régularisation λ et β . On réussit avec cette méthode à atteindre notre objectif. Par contre, la limitation se présente au niveau de la section d'optimisation qui exige un temps de calcul assez long. Cette partie de notre recherche a fait l'objet d'une soumission dans une revue ainsi d'une participation à une conférence prévue en 2014.

Pour terminer, le défi scientifique et technique de la problématique soulevée nous ont permis de publier deux articles de revues (et de soumettre un troisième qui est en cours de révision). Chaque article constitue un des trois chapitres de cette thèse. En plus, cinq publications ont été achevées à travers la participation à plusieurs conférences internationales. Un récapitulatif des références des cinq articles a été présenté dans le tableau 0.2. Les propositions pour de futures recherches liées à ce domaine sont présentées dans la partie suivante « Recommandations ».

RECOMMANDATIONS

Aujourd'hui, il est admis que, dès les premières phases de développement d'un nouveau produit, l'optimisation des opérations de fabrication et d'assemblage requiert la prise en compte des variations inhérentes aux procédés. Cette question pertinente trouve un intérêt immédiat dans l'industrie manufacturière en général et, plus spécifiquement, dans le secteur aérospatial. Le problème du tolérancement et du contrôle de la qualité des pièces mécaniques est décisif pour cette industrie. Chaque amélioration dans ce processus se traduit par une amélioration du niveau de compétitivité. Ces incidences économiques sont importantes pour un secteur qui subit des transformations profondes imposées par la globalisation et la pression des marchés et par l'évolution technologique.

Le présent projet a pour objectif de faciliter l'inspection dimensionnelle et géométrique des composantes souples. Actuellement, l'analyse de conformité de telles pièces est réalisée avec des gabarits spécialisés et dédiés à cette tâche. Cela se traduit par des coûts supplémentaires et des carences de reproductibilité. Dans le cadre de cette thèse, on a proposé d'une manière spécifique, le développement d'une méthodologie pour manipuler un nuage de points, capté dans une condition arbitraire et sans recours à un gabarit, dans le but d'analyser la conformité géométrique d'une pièce souple. Comme résultats de nos travaux, nous avons amélioré une approche existante et nous avons proposé deux nouvelles approches complémentaires. Nous avons obtenu des résultats satisfaisants au niveau de la détection des défauts de fabrication (profil et localisation).

Nous espérons que les travaux présentés dans cette thèse permettront dans un proche avenir de stimuler la recherche dans ce domaine d'application. Nous proposons dans cette section quelques recommandations pour de futures pistes de recherche que nous jugeons comme utiles aux personnes qui travaillent sur la même problématique et surtout fertiles d'idées et d'innovation.

1. Nous suggérons de développer une approche globale et généralisée basée sur les deux méthodes complémentaires qui ont été développées dans le cadre de cette thèse. Dans ce cas, nous devons développer une méthodologie qui permet de regrouper les pièces mécaniques souples selon le type de défauts géométriques présent. En plus, cette approche doit être capable d'identifier et de classifier les défauts géométriques sur les limites de la pièce (les défauts de contour).
2. Les approches développées au cours de cette thèse ne tiennent pas en compte du comportement réel des composantes mécaniques souples lors de l'assemblage. En d'autres termes, nos méthodes ont surtout servi à vérifier l'état de conformité et d'estimer la position et l'amplitude du défaut. Par contre, lors de l'assemblage, les souplesses (ou la flexibilité) d'un composant peut « corriger » ou « tolérer » plus de défauts qu'un composant rigide. Notre première recommandation vise le développement d'une procédure pour évaluer les niveaux des forces nécessaires à l'assemblage ainsi que les contraintes induites/résiduelles afin d'assurer le respect de tous les requis de la pièce à l'assemblage après que celle-ci a été qualifiée comme non conforme à l'inspection. Ainsi, cette piste ouvre la possibilité du « tolérancement pour pièces souples ».
3. Une autre recommandation se traduit par la généralisation des approches développées pour qu'elles tiennent en compte des pièces souples plus complexes avec un matériau non isotrope comme les composites. Dans ce cas, nous parlons de l'introduction d'un facteur qui contrôle la rigidité locale. En effet, nos méthodes sont basées sur des hyper paramètres qui représentent en quelque sorte le degré de flexibilité globale d'un composant. Par contre, on peut avoir des pièces dont la rigidité locale varie grandement (ex. la pièce étude de cas no 1). Nous jugeons qu'il sera opportun de tenir en compte non pas d'un seul paramètre, mais peut-être d'une pondération locale qui traduit le comportement de la rigidité en fonction de la localisation de la pièce.

4. Dans le travail du Chapitre 1, nous avons proposé de remplacer le module d'identification initial de l'algorithme IDI par un nouveau qui est basé sur les statistiques extrêmes (*Grubbs test*). Pour faciliter la comparaison, nous avons utilisé les mêmes études de cas simulés développés par Abenahim *et al.* et nous avons obtenu de résultats très satisfaisants au niveau de la réduction des erreurs de types I et II. Par contre, aucune validation sur des cas industriels réels n'a été effectuée. Nous suggérons de valider l'amélioration de l'IDI sur les études de cas expérimentales qui ont été développées lors du stage effectué chez Bombardier Aéronautique (voir Annexe I). Dans la même perspective, nous proposons une validation expérimentale des performances métrologiques des deux nouvelles approches développées (IDB-CTB et Optimisation du CPD).
5. La méthode IDB-CTB a été présentée et vérifiée dans le Chapitre 2 de cette thèse en utilisant des études de cas tirées des applications d'ingénierie réelles. Les travaux futurs devraient développer une estimation plus précise de la courbure gaussienne en améliorant la qualité de génération de maillages 3D des composantes mécaniques souples (par exemple, appliquer un raffinement local). Une autre amélioration de la méthode IDB-CTB se situe au niveau de la correspondance. Trouver la meilleure correspondance garantira une meilleure comparaison entre les courbures gaussiennes estimées du modèle nominal et de la pièce numérisée. Enfin, nous proposons d'évaluer les indices de performance de l'approche IDB-CTB.
6. Par la suite, nous allons présenter des recommandations qui sont spécifiques pour le travail présenté dans le Chapitre 3 de cette thèse :
 - a. Deux critères ont été proposés pour répondre aux spécificités des pièces mécaniques souples. Un facteur alpha (α) a été affecté au critère de « la conservation de la distance curviligne » dans la formulation de la fonction objective pour rapporter la comparaison avec le critère de « la minimisation de la distance de *Hausdorff* » à la même échelle (voir équation 3.5). Ce paramètre, présentement déterminé par essai-erreur, a été estimé après avoir examiné les ordres de grandeur de ces deux critères. L'amélioration de

l'estimation de ce paramètre pourra augmenter significativement la performance de la section d'optimisation de l'algorithme proposé. On propose de calculer ce paramètre alpha en considérant le calcul de résistance de matériaux à travers l'estimation des contraintes et déformations relatives au cas des composantes souples avec différents types de matériaux (pas seulement les matériaux isotropes). Ce calcul peut nous donner une reformulation plus précise de la fonction objective et par la suite une meilleure optimisation des paramètres de régularisation λ et β ainsi qu'une réduction du temps de calcul.

- b. Proposer une méthode plus performante pour trouver la correspondance entre le CAD modifié et la pièce numérisée. Réussir à chercher la vraie correspondance et non le plus proche point correspondant réduira l'erreur moyenne quadratique au niveau de la distance de *Hausdorff*.
- c. Évaluer les performances métrologiques de la méthode proposée.

ANNEXE I

STAGE BOMBARDIER AÉRONAUTIQUE : DÉVELOPPEMENT DE LA BANQUE DES ÉTUDES DE CAS ET DE DEUX INTERFACES DYNAMIQUES (GUI)

La préparation de la base d'études de cas industriels est cruciale pour l'avancement du projet CRIAQ MANU501. Elle permet des validations exhaustives des méthodologies et algorithmes proposés par l'équipe (ex. IDI, GNIF, IDB-CTB, Optimisation du CPD, etc.). Le but ultime du projet est de développer une méthode de synthèse qui permettrait, dans un environnement d'ingénierie simultanée, de gérer efficacement les tolérances et les opérations d'inspection des pièces souples au coût minimum, connaissant les exigences fonctionnelles et les moyens de production. Dans le cas de l'organisme partenaire (Bombardier Aéro.), ceci se traduira par des économies tangibles améliorant sa productivité. Typiquement, on parle d'environ 30 % des composants d'un avion, et à titre d'exemple, le temps requis actuellement pour préparer l'inspection d'une pièce flexible (gabarit, montage, etc.) est d'environ 50-60 heures-personnes.

La session d'hiver de l'année 2013, un stage industriel a été effectué au sein de la compagnie Bombardier Aéronautique (Plan-1, St-Laurent, QC). Ce stage a été divisé en deux principales parties, l'une consacrée à la conception de la base de données sur les pièces flexibles, la seconde axée sur le développement d'une interface graphique et d'une méthodologie pour manipuler les bases de données. Le développement de la banque d'études de cas inclut des cas tirés d'applications industrielles concrètes chez Bombardier Aéronautique. Ces données seront disponibles pour la communauté scientifique dans un but de partage et de comparaison (Benchmarking). En plus, ces données servent à valider les différentes méthodes développées dans le cadre du projet CRIAQ-MANU501 sur l'inspection des pièces flexibles sans gabarits de conformation. Tous les objectifs du stage ont été atteints.

Dans l'ensemble, le stage a été une expérience très enrichissante du point de vue technique et humain. En effet, outre l'avantage d'avoir pu me permettre d'approfondir mes connaissances dans le domaine de métrologie dimensionnelle et géométrique (conception et fabrication

mécanique), il m'a également permis de prendre pleinement conscience de la difficulté et des critères importants à prendre en compte quand on travaille au sein d'un groupe de projet (travail d'équipe multidisciplinaire). Ce stage m'a donc permis d'acquérir une expérience professionnelle très importante sur le marché de l'emploi.

Les résultats du stage:

1. Une banque des études de cas expérimentales sur les pièces flexibles a été développée. La Figure-A I-1 montre les 9 études de cas développées.
2. Deux interfaces graphiques dynamiques ont été développées en utilisant le Platform GUI de Matlab R2012b. La première pour manipuler les études de cas expérimentales (Figure-A I-2) et la deuxième pour représenter les approches développées dans le cadre du projet CRIAQ MANU-501 (Figure-A I-3).



Figure-A I-1 Les études de cas expérimentales - Bombardier Aéronautique

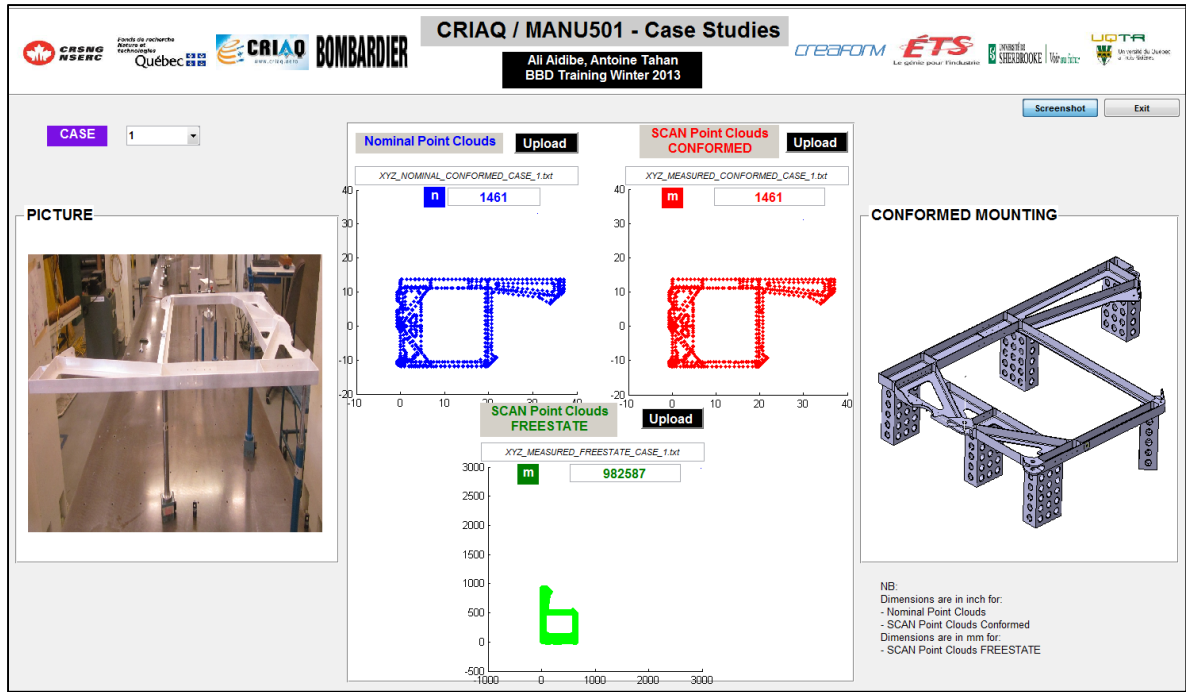


Figure-A I-2 Interface graphique (GUI) – La banque des études de cas expérimentales

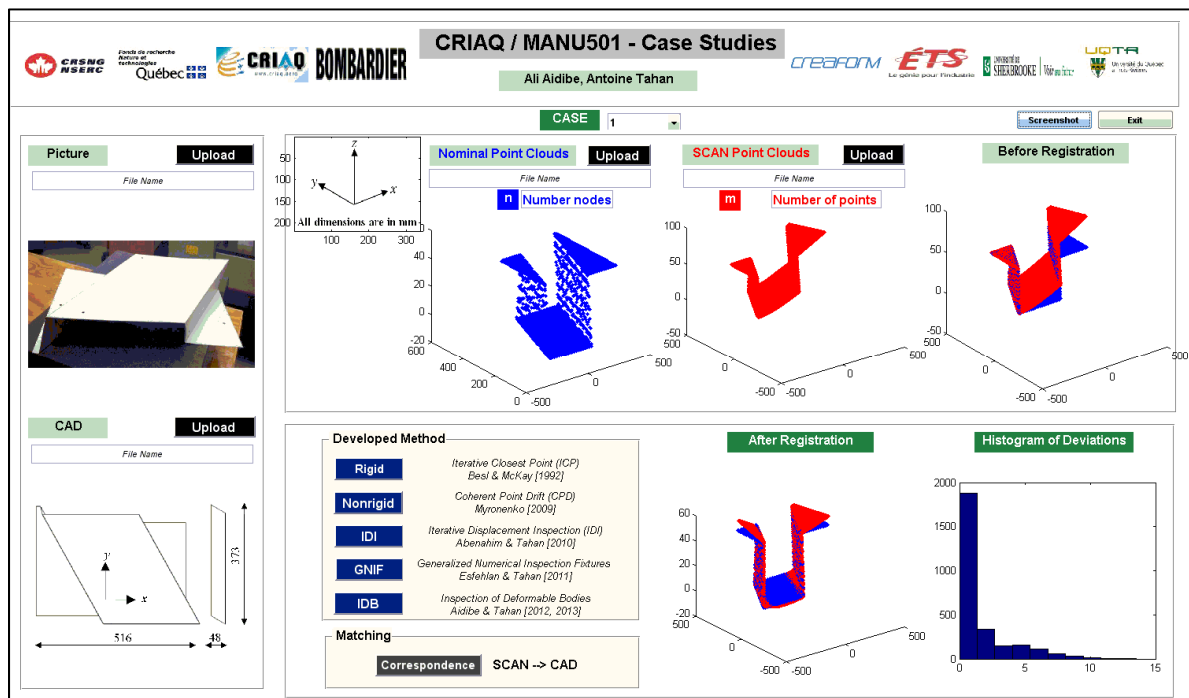


Figure-A I-3 Interface graphique (GUI) – Les approches développées dans le cadre du projet CRIAQ MANU-501

BIBLIOGRAPHIE

- Abenahim, G., S.-A. Tahan, A. Desrochers, et R. Maranzana. 2011. « A Novel Approach for the Inspection of Flexible Parts Without the Use of Special Fixtures ». *Journal of Manufacturing Science and Engineering ASME*, Vol.133, n° 1, p. 1-11.
- Abenahim, G., A. Desrochers, and A. Tahan. 2012. « Nonrigid parts' Specification and Inspection Methods: Notions, Challenges, and Recent Advancements ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1-12.
- Aggarwal, C. C. et S. Y. Philip. 2005. « An effective and efficient algorithm for high-dimensional outlier detection ». *The International Journal on Very Large Data Bases*, vol. 14, n° 2, p. 211-21.
- AIAG. 2002. *Measurement Systems Analysis. Reference Manual. 3rd Edition*. Automotive Industry Action Group.
- Aidibe, A., S.-A. Tahan, et G. N. Abenahim. 2012. « Distinguishing Profile Deviations from a Part's Deformation using the Maximum Normed Residual Test ». *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, vol. 7, p. 18-28.
- Aidibe, A., S.-A. Tahan, 2014. « The Inspection of Deformable Bodies using Curvature Estimation and Thompson-Biweight Test ». *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 71, n° 9-12, p. 1733-1747.
- Angiulli, F. et F. Fasseti. 2010. « Distance-based outlier queries in data streams: the novel task and algorithms ». *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 20, n° 2, p. 290-324.
- Ascione, R. et W. Polini. 2010. « Measurement of nonrigid freeform surfaces by coordinate measuring machine ». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 51, n° 9-12, p. 1055-1067.
- ASME Y14.5-2009. 2009. *Dimensioning and Tolerancing. The American Society of Mechanical Engineers National Standard*. The American Society of Mechanical Engineers,
- Barber, C. B., D. P. Dobkin, et H. Huhdanpaa. 1996. « The Quickhull Algorithm for Convex Hulls ». *ACM Trans. Math. Softw.*, vol. 22, p. 469-483.

- Besl, P. J. et H. D. McKay. 1992. « A Method for Registration of 3-D Shapes ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 14, p. 239-256.
- Breunig, M., H.-P. Kriegel, R. T. Ng, et J. Sander. 2000. « LOF: Identifying Density-Based Local Outliers ». *Proc. ACM SIGMOD 2000 Int. Conf. On Management of Data*, vol. 29, n° 2, p. 93-104.
- Caulier, Y. et S. Bourennane. 2008. « Fourier-based inspection of freeform reflective surfaces ». *Advanced Concept for Intelligent Vision Systems Proceedings*, vol. 5259, p. 125-136.
- Caulier, Y., 2010. « Inspection of Complex Surfaces by Means of Structured Light Patterns ». *Optics Express*, vol. 18, n° 7, p. 6642-6660.
- Chui, H. et A. Rangarajan. 2003. « A New Point Matching Algorithm for Non-Rigid Registration ». *Computer Vision and Image Understanding*, vol. 89, p. 114–141.
- Cristea, L. et M. Manescu. 2008. « Intelligent Modular Design of Automatic Dimensional Inspection Systems ». *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*, vol. 3, n° 7, p. 739-748.
- Fagarasan, I. et S. S. Iliescu. 2008. « Applications of Fault Detection Methods to Industrial Processes ». *WSEAS Transactions on Systems*, vol. 7, n° 6, p. 812-821.
- Gold, S., A. Rangarajan, C. P. Lu, P. Suguna, et E. Mjolsness. 1998. « New Algorithms for 2d and 3d Point Matching: Pose Estimation and Correspondence ». *Pattern Recognition*, vol. 38, p. 1019–1031.
- Grubbs, F. E., 1969. « Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples ». *Technometrics*, vol. 11, n° 1, p. 1-21.
- Hawkins, D., 1980. *Identification of Outliers*, Chapman and Hall: London.
- Hoaglin D. C., F. Mosteller, et J. W. Tukey. 1983. *Understanding Robust and Exploratory Data Analysis*. The Wiley Classic Library.
- Hsiao, C.-A., H. Chen, K. Furuse, et N. Ohbo. 2009. « Figure and Ground: A Complete Approach to Outlier Detection ». *IAENG Transactions on Engineering Technologies Volume I: Special Edition of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, vol. 1089, p. 70-81.

- Hu, Y., E. J. Rijkhorst, R. Manber, D. Hawkes, et D. Barratt. 2010. « Deformable Vessel-Based Registration Using Landmark-Guided Coherent Point Drift ». *Medical Imaging and Augmented Reality*, vol. 6326, p. 60-69.
- ISO 10579. 2010. *Geometrical product specifications (GPS) — dimensioning and tolerancing — non rigid parts*. International Organization for Standardization (ISO), Geneva.
- Jaramillo, A. E., P. Boulanger, et F. Prieto. 2009. « On- line 3- D Inspection of Deformable Parts Using FEM Trained Radial Basis Functions ». *IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops*, p. 1733-1739.
- Kase, K., A. Makinouchi, T. Nakagawa, H. Suzuki, et. F. Kimura. 1999. « Shape Error Evaluation Method of Free-Form Surfaces ». *Computer-Aided Design*, vol. 31, p. 495-505.
- Knorr, E. M. et R. T. Ng. 1999. « Finding Intensional Knowledge of Distance- Based Outliers », *Proceedings of the Twenty-Fifth International Conference on Very Large Data Bases*, p. 211-222.
- Knorr, E. M., R. T. Ng, and R. H. Zamar. 2001. « Robust Space Transformations for Distance-based Operations ». *Proceedings of the Seventh ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, p. 126-135.
- Koch, M., S. Bauer, J. Hornegger, et N. Strobel. 2013. « Towards Deformable Shape Modeling of the Left Atrium Using Non-Rigid Coherent Point Drift Registration ». *Bildverarbeitung für die Medizin*, p. 332-337.
- Koufakou, A. et M. Georgiopoulos. 2010. « A Fast Outlier Detection Strategy for Distributed High-dimensional Data Sets with Mixed Attributes ». *Data mining and Knowledge Discovery*, vol. 20, n° 2, p. 259- 289.
- Latecki, L. J., A. Lazarevic, et D. Pokrajac. 2007. « Outlier Detection with Kernel Density Functions ». *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*, vol. 4571, p. 61-75.
- Li, Y. et H. Kitagawa. 2008. « Example-Based Robust DB- Outlier Detection for High Dimensional Data ». *Database Systems for Advanced Applications Lecture Notes in Computer Science*, vol. 4947, p. 330-347.

- Limas, M. C., J. Ordieres Meré, F. J. M. de Pisón Ascacibar, et E. P. V. González. 2004. « Outlier Detection and Data Cleaning in Multivariate Non-Normal Samples: The PAELLA Algorithm ». *Data Mining and Knowledge Discovery*, vol. 9, n° 2, p. 171-87.
- Lin, H.-D., C.-Y. Chung, et W.-T. Lin. 2008. « Principal Component Analysis Based on Wavelet Characteristics Applied to Automated Surface Defect Inspection ». *WSEAS Transactions on Computers Research*, vol. 3, n° 4, p. 193-202.
- Malamas, E. N., E. G. M. Petrakis, M. Zervakis, L. Petit et J.-D. Legat. 2003. « A Survey on Industrial Vision Systems, Applications and Tools ». *Image and Vision Computing*, vol. 21, n° 2, p. 171-188.
- Mingxi, W. et J. Chris. 2009. « Guessing the Extreme Values in a Data Set: a Bayesian Method and its Applications ». *The International Journal on Very Large Data Bases*, vol. 18, n° 2, p. 571-597.
- Myronenko, A. et X. Song. 2010. « Point Set Registration: Coherent Point drift ». *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 32, p. 2262–2275.
- Peng, J., Q. Li, C.-C. Jay Kuo, et M. Zhou. 2003. « Estimating Gaussian Curvatures From 3D Meshes ». *Proc. SPIE 5007, Human Vision and Electronic Imaging VIII*, vol. 5007, p. 270-280.
- Peng, W., W. Ping, Q. ZhiGuo, G. YingHui, et S. ZhenKang. 2011. « A Refined Coherent Point Drift (CPD) Algorithm for Point Set Registration » *Science China Information Sciences*, vol. 54, p. 2639-2646.
- Radvar-Esfahlan, H. et S.-A. Tahan. 2012. « Nonrigid Geometric Metrology Using Generalized Numerical Inspection Fixtures ». *Precision Engineering*, vol. 36, p. 1-9.
- Rehm, F., F. Klawonn, et R. Kruse. 2007. « A Novel Approach to Noise Clustering for Outlier Detection ». *Soft Computing*, vol. 11, n° 5, p. 489-494.
- Sarker, B. K. et H. Kitagawa. 2005. « A Distributed Algorithm for Outlier Detection in a Large Database ». *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 3433, p. 300-309.
- Thompson, R. 1985. « A Note on Restricted Maximum Likelihood Estimation with an Alternative Outlier Model ». *Journal of the Royal Statistical Society. Series B. Methodological*, vol. 47, p. 53-55.

- Weckenmann, A. et J. Weickmann. 2006. « Optical Inspection of Formed Sheet Metal Parts Applying Fringe Projection Systems and Virtual Fixation ». *Metrology and Measurement Systems*, vol. 13, n° 4 p. 321-334.
- Yuille, A. L. et N. M. Grzywacz. 1989. « A Mathematical Analysis of the Motion Coherence Theory ». *International Journal of Computer Vision*, vol. 3, p. 155-175.
- Zhang, J., Q. Gao, H. Wang, Q. Liu, et K. Xu. 2009. « Detecting Projected Outliers in High-Dimensional Data Streams ». *Database and Expert Systems Applications*, vol. 5690, p. 629-644.

