

Collecte de mesures 3D fiables L'approche en matière de métrologie 3D intelligente



**Collecte de mesures
3D fiables | L'approche en
matière de métrologie
3D intelligente**

**Comprendre les bases
d'une MSA**

Définition du système
de mesure

Indices de performance
du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance
du système de mesure

Incertitude élargie

**Choisir la méthodologie
appropriée pour évaluer
l'incertitude de systèmes
de mesure 3D complexes**

**Réaliser des études MSA à
l'aide de la méthodologie
expérimentale et d'un
logiciel de métrologie
3D intelligente**

Études de répétabilité

Études R&R

**Recommandations pour
les métrologues**

Conclusion

Collecte de mesures 3D fiables

L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Les entreprises manufacturières surveillent quotidiennement la qualité des produits en recueillant des données de mesure dimensionnelle. Ces données sont utilisées pour étudier la stabilité d'un processus de fabrication, déterminer la capacité du processus à assurer la qualité et la fonctionnalité des pièces, et établir des indices pour quantifier la capacité du processus à répondre aux exigences dimensionnelles. Tout cela fait partie de leur processus d'amélioration continue.

Lors de l'introduction d'un nouveau processus de fabrication, des problèmes relatifs à la stabilité du processus peuvent être perçus sans pouvoir en déterminer la cause et l'éliminer. Dans certains cas, ces problèmes ne sont pas liés au processus de fabrication, mais plutôt au système de mesure lui-même.

Les métrologues savent qu'une mesure n'est jamais exacte. Une multitude de sources de variation affectent la performance du système de mesure, ce qui engendre une incertitude dans la mesure. En effectuant une analyse du système de mesure (MSA) par le biais d'études de répétabilité et R&R, la variation d'un système de mesure peut être estimée. Ces études permettent aux métrologues d'évaluer la validité du système de mesure et de limiter les facteurs contribuant à la variation totale du processus mesuré qui proviennent réellement du système de mesure. Il peut être assez complexe de mettre en place une étude MSA et de la réaliser – encore plus dans le contexte de la métrologie 3D – et une connaissance approfondie des statistiques est nécessaire pour obtenir des données exploitables.

Ce livre blanc :

- explique les concepts clés de l'analyse des systèmes de mesure et leur application pratique pour les dispositifs de mesure 3D ;
- explore un processus entièrement numérique de la mise en place et l'exécution d'études de répétabilité et R&R à l'obtention de résultats directement dans Excel aux fins d'analyse et de partage ;
- et fournit aux métrologues des recommandations pour analyser les résultats de l'étude.



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

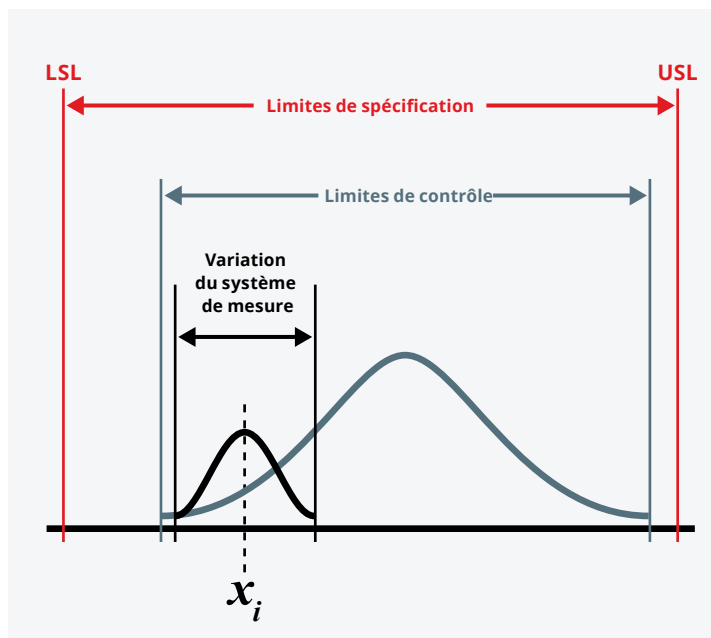
Conclusion

Comprendre les bases d'une MSA

Examinons le rôle crucial d'une MSA dans le contexte du processus global d'inspection des pièces. Au cours de ce processus, les métrologues mesurent les *caractéristiques clés*, telles que la taille, les dimensions, les positions, les profils et les orientations, pour déterminer leur écart par rapport aux spécifications nominales. Ils évaluent le respect des spécifications techniques, telles que définies dans le plan de contrôle, en fonction des tolérances et des exigences. Chaque mesure est caractérisée par deux composantes principales : une représentant l'écart réel (c'est-à-dire la valeur réelle) et une autre reflétant la variabilité du système de mesure. Pour s'assurer que leur système de mesure est fiable et digne de confiance pour accomplir la tâche, les métrologues doivent déterminer l'amplitude de la variation du système de mesure et s'assurer qu'elle représente un maximum de 10 % à 30 % des tolérances. La variabilité ou la performance du système de mesure doit être proportionnellement assez faible pour ne pas contribuer de manière importante à la variation totale du processus mesuré, composé à la fois de la variation du processus de fabrication et de celle du système de mesure, et faire sortir le processus hors des limites de spécifications (LSL, USL) ou des tolérances.

Figure 1
Performance d'un système de mesure par rapport à la variation totale d'un processus

La Figure 1 montre cette interaction, où la performance d'un système de mesure et les valeurs mesurées (x_i) contribuent d'une façon relativement discrète et prévisible à la variation du processus mesuré. Cette variation est obtenue à partir de résultats mesurés sur des pièces provenant de la chaîne de production à l'aide de techniques MSP. Habituellement, les limites de contrôle sont calculées à l'aide de ces données. En d'autres termes, la performance du système de mesure a une incidence sur l'évaluation de la variation totale d'un processus, et l'analyse du système de mesure aide à déterminer cette performance.



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

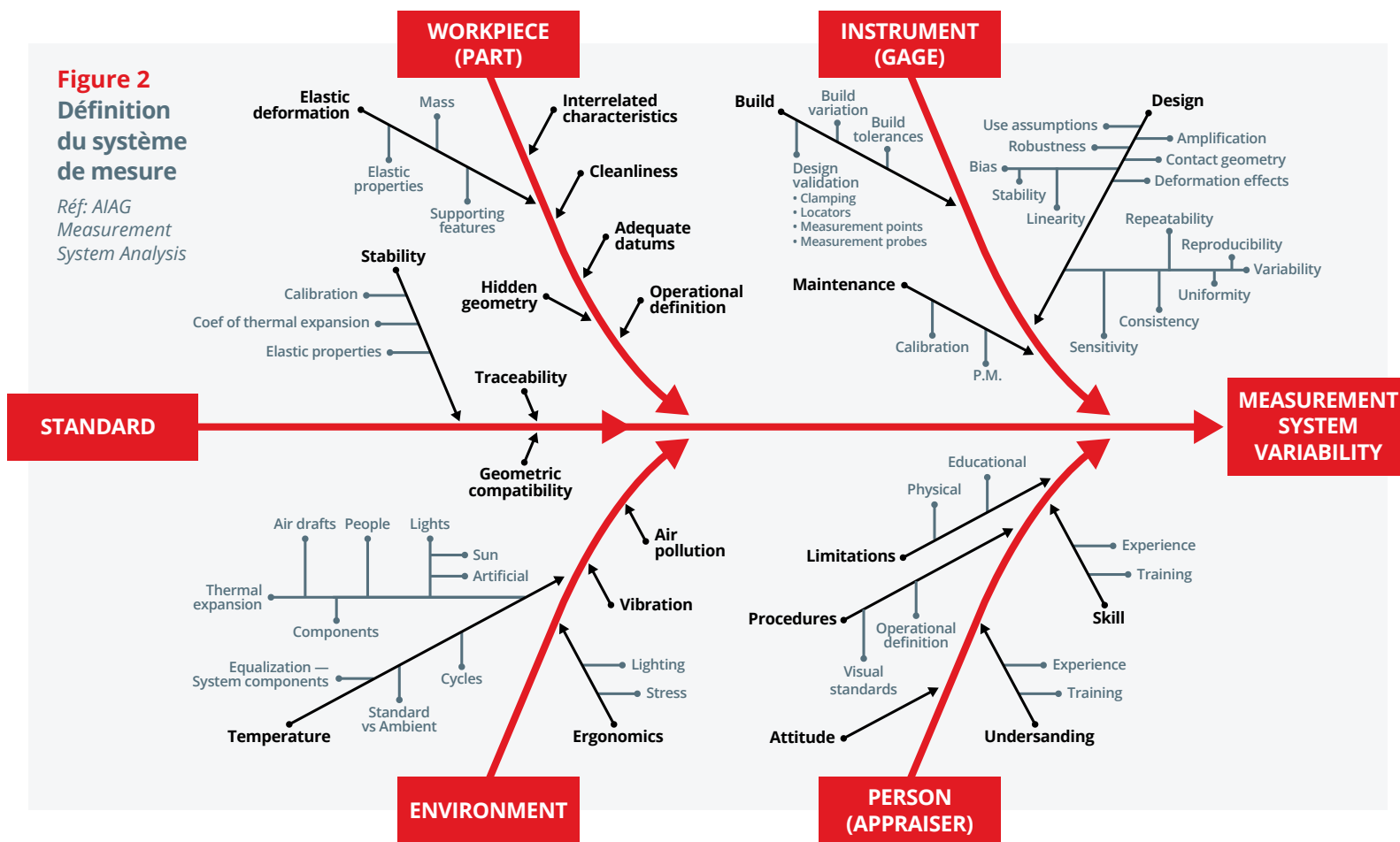
Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Définition du système de mesure

Avant de déterminer la performance du système de mesure, il est essentiel de repérer toutes les sources potentielles de variation susceptibles d'affecter le processus de mesure d'une caractéristique clé. L'[Automotive Industry Action Group \(AIAG\)](#) affirme que le système de mesure se compose de « l'ensemble des instruments ou des jauges, des normes, des opérations, des méthodes, des gabarits, des logiciels, du personnel,

de l'environnement et des hypothèses utilisés pour quantifier une unité de mesure ou évaluer une caractéristique mesurée ; il s'agit du processus complet utilisé pour obtenir des mesures ». La MSA doit prendre en compte tous ces facteurs, comme il est illustré en détail à la Figure 2, car ils influencent l'incertitude globale du système de mesure.



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Indices de performance du système de mesure

La performance d'un système de mesure est déterminée à l'aide d'indices qui catégorisent et quantifient l'incertitude de mesure. En recueillant des données sur le processus, le métrologue peut quantifier la variabilité totale des mesures en déterminant un comportement précis qui lui est associé.

Habituellement, ce comportement est décrit comme une variable aléatoire (RV) avec une distribution gaussienne (normale). La figure 3 illustre ce concept : la courbe noire représente les données recueillies, c'est-à-dire les valeurs mesurées issues du processus de mesure, et sa distribution définie par les paramètres de position (moyenne) et de largeur (écart type).

Les multiples facteurs influençant le processus de mesure représentent plusieurs sources d'incertitude qui sont soit systématiques (p. ex., *une valeur de mesure moyenne par rapport à une valeur réelle*), soit aléatoires (p. ex., *la dispersion des mesures*). Il est possible de catégoriser ces incertitudes en fonction de l'effet qu'elles ont sur les paramètres de distribution déterminés. Comme l'illustre la figure 4, l'incertitude systématique comprend le biais, la linéarité et la stabilité, tandis que l'incertitude aléatoire comprend la répétabilité et la reproductibilité. Chaque catégorie est clairement identifiable par son modèle de distribution unique.

Figure 3
Distribution gaussienne

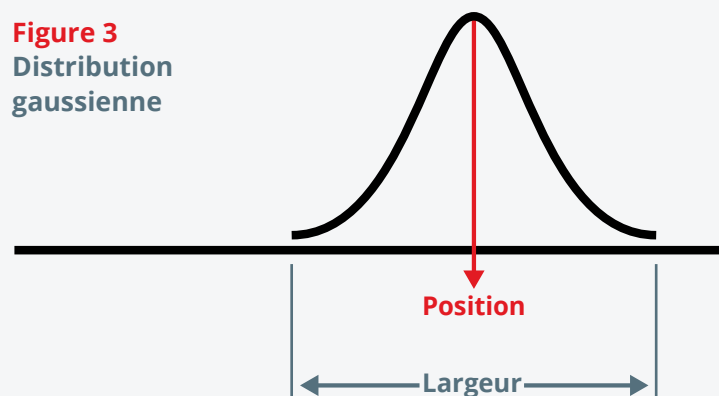
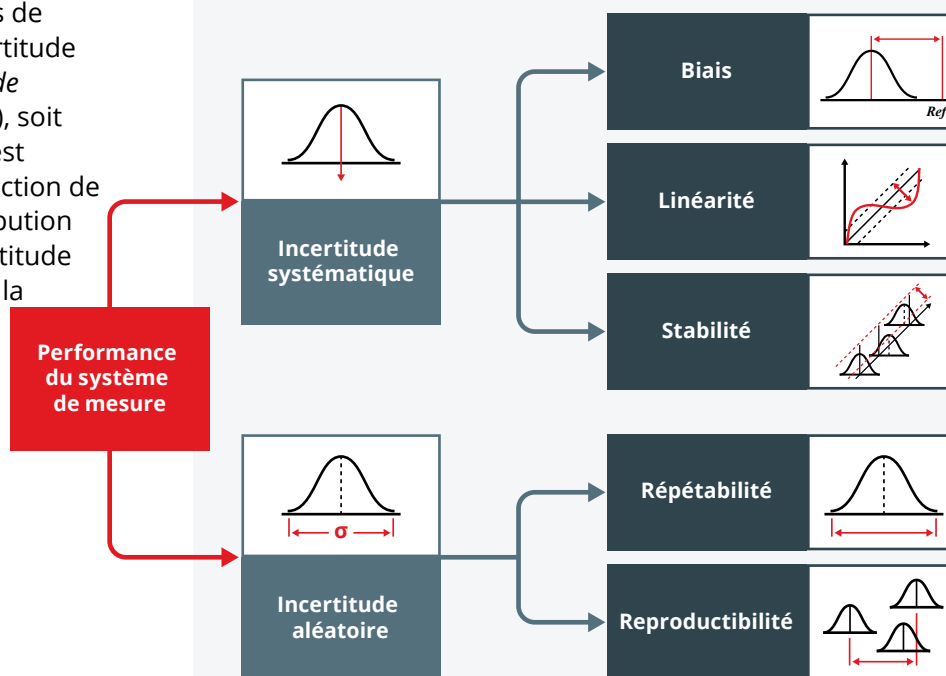


Figure 4
Indices de performance



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

• Incertitude systématique

L'incertitude systématique est l'incertitude de mesure fortement associée à la position de la distribution normale par rapport à une valeur de référence connue. Mathématiquement, elle influence la valeur moyenne des données mesurées. Le terme courant pour ce type d'erreur est erreur de justesse. L'erreur de justesse représente l'exactitude entre la moyenne d'un ou plusieurs résultats mesurés et une valeur de référence. L'erreur de justesse est généralement reproductible et est souvent attribuable à des problèmes qui pourraient être quantifiés et corrigés. Les trois types d'incertitude systématique sont le biais, la linéarité et la stabilité, le biais étant le plus courant. Le biais représente la distance entre la moyenne d'un ou plusieurs résultats mesurés ($\bar{X}$) et une valeur de référence (*Réf*).

Mathématiquement, le biais est estimé par la différence entre la valeur vraie (valeur *Réf*) et la moyenne observée des mesures sur la même caractéristique d'une même pièce. La linéarité, quant à elle, indique dans quelle mesure les données recueillies dans l'étendue de mesure d'un instrument correspondent à la valeur de référence. C'est la différence de biais dans toute l'étendue de mesure prévue de l'équipement. La linéarité représente le changement de biais d'un extrême de l'étendue de mesure à l'autre. Le dernier type d'incertitude systématique est la stabilité. Elle représente la capacité d'un système de mesure à maintenir sa capacité métrologique au fil du temps. La stabilité décrit la variation du biais dans le temps, généralement le temps entre deux calibrations du système.

• Incertitude aléatoire

La source restante d'incertitude de mesure est l'incertitude aléatoire, communément appelée erreur de fidélité. L'erreur de fidélité représente les fluctuations statistiques des données mesurées attribuables aux limites du système de mesure. L'erreur de fidélité décrit la variation prévue des mesures répétées dans l'étendue de mesure. Les deux types d'incertitude aléatoire sont la répétabilité et la reproductibilité. La répétabilité représente la largeur de la dispersion des mesures obtenue dans un ensemble de conditions très contrôlées. Elle décrit la capacité du système à obtenir la même mesure, avec le même équipement, la même pièce, le même modèle et les mêmes conditions environnementales. Une distribution étroite indique une mesure plus reproductible. La reproductibilité représente la variation entre les mesures effectuées par différents opérateurs, avec le même équipement et dans les mêmes conditions. Mathématiquement, c'est la variation de la moyenne des lectures effectuées par chacun des opérateurs.



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Capabilité et performance du système de mesure

La capabilité d'un système de mesure ($\sigma_{\text{capabilité}}$), également appelée incertitude type totale, est la combinaison de toutes les incertitudes systématiques et aléatoires. Elle quantifie le doute associé à une mesure dans des conditions connues et elle est utilisée pour déterminer l'incertitude totale du système de mesure sur une courte période de temps. La capabilité peut être calculée à l'aide de la formule :

$$\sigma_{\text{capabilité}}^2 = \sigma_{\text{Biais (linéarité)}}^2 + \sigma_{\text{R\&R}}^2$$

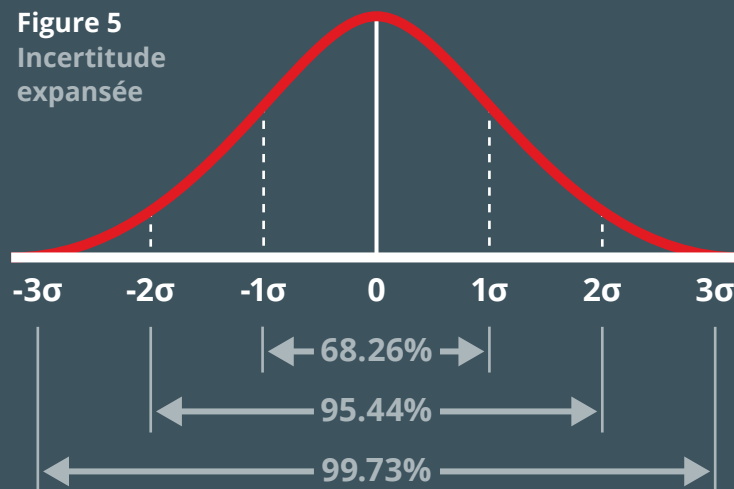
La performance, en revanche, considère non seulement les sources de variations systématiques et aléatoires, mais également les sources de dérive qui se produisent au fil du temps. Elle est calculée selon la formule :

$$\sigma_{\text{performance}}^2 = \sigma_{\text{capabilité}}^2 + \sigma_{\text{stabilité}}^2$$

Incertitude élargie

La dernière étape du processus d'analyse du système de mesure détermine l'incertitude élargie (U) associée au système de mesure. L'incertitude élargie représente la valeur totale de l'incertitude de mesure qui décrit, selon un niveau de confiance spécifique, l'étendue qui devrait contenir le résultat de mesure réel obtenu par un système. Elle peut être exprimée comme suit : $U = \pm K \sigma_{\text{tot}}$ où U est l'incertitude élargie, K est le facteur de couverture qui représente l'aire sous la courbe normale pour un niveau de confiance souhaité (par exemple, $K = 3$ pour un niveau de confiance de 99,73 %), et σ_{tot} est l'incertitude type totale du système de mesure qui correspond habituellement à sa performance. Les facteurs de confiance les plus couramment utilisés lors de l'analyse du système de mesure se trouvent dans la figure ci-dessous.

Figure 5
Incertitude élargie



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

- Études de répétabilité
- Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Pour évaluer l'incertitude de mesure d'un système, il faut d'abord définir sa fonction de mesure. Cette fonction est une représentation mathématique de la relation entre une quantité physique finale obtenue par un système de mesure et l'ensemble des quantités physiques devant être mesurées lors du processus de mesure. On retrouve deux types de mesures, soit les mesures directe et indirecte. Cela affectera la façon dont la fonction est définie. Une mesure directe est prise lorsqu'un dispositif de mesure fournit directement une quantité physique. Par exemple, un diamètre extérieur (Y) est mesuré à l'aide d'un micromètre, qui fournit directement la valeur physique X . Dans ce cas, la fonction de mesure est identifiée comme $Y=X$. Cependant, la plupart des dispositifs de mesure 3D effectuent des mesures indirectes. Ils ne peuvent pas fournir directement la valeur (Y). Ils considèrent plutôt une fonction de plusieurs quantités physiques (n) (X_i), $Y=f(X_1,...,(X_n)$. Par exemple, une MMT portable utilise la position et l'orientation de plusieurs encodeurs pour obtenir une valeur finale précise. Les quantités physiques, dans cet exemple la position et l'orientation des encodeurs utilisées pour calculer la valeur finale, sont toutes affectées par une incertitude de mesure spécifique (u_{x_i}). Par conséquent, le résultat mesuré par le bras (Y) dépend de l'ensemble des valeurs (X_i) et des incertitudes associées (u_{x_i}) utilisées pour son estimation. En définitive, la valeur mesurée (Y) a également une incertitude totale (u_y).

Si la fonction représentant le système de mesure est explicitement formulée, elle pourra être utilisée pour propager les incertitudes, des quantités physiques d'entrées à la quantité de sortie, au moyen de deux stratégies : une série de Taylor ou une méthode de Monte Carlo. Ces stratégies sont abordées en profondeur dans des publications telles que le [Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure](#) (GUM) . En revanche, **si la fonction est trop complexe pour être formulée explicitement ou lorsque les paramètres sont inconnus, une stratégie expérimentale doit être utilisée**. En analysant la quantité physique de sortie à l'aide d'outils statistiques, il est possible d'estimer l'incertitude totale du système de mesure. Par exemple, dans une situation où un métrologue utilise une MMT portable avec un scanner pour mesurer un profil de surface, la fonction de mesure est beaucoup plus complexe à déterminer. Dans ce cas, il faut avoir recours à une analyse expérimentale. Comme cela se fait directement sur les résultats de mesure, le métrologue n'a pas à décomposer le système de mesure complet, ce qui le rend plus simple, plus direct et plus facile à comprendre.

¹ Évaluation des données de mesure, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (JCGM 100:2008) publié par le Bureau international des poids et mesures

Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Pour effectuer une analyse expérimentale visant à déterminer l'incertitude élargie de systèmes de mesure 3D complexes, il faut d'abord réaliser une étude de répétabilité suivie d'une étude R&R complète. En recueillant des données sur les résultats de mesure du système à l'aide de différentes configurations et essais, le métrologue peut estimer la variation totale à l'aide des indices de performance décrits précédemment. Mais ces études sont traditionnellement complexes à réaliser et nécessitent une connaissance approfondie des statistiques pour générer des résultats appropriés.



Figure 6
PolyWorks MSA bar d'outils

PolyWorks® propose une solution logicielle de métrologie 3D intelligente MSA intégrée pour la réalisation d'études de systèmes de mesure 3D complexes dans le cadre d'un processus entièrement numérique. Elle permet aux utilisateurs de :

- 1 Spécifier les principales caractéristiques requises par le plan de contrôle ;
- 2 Créer l'étude en sélectionnant son type et en définissant les paramètres clés, éléments indispensables pour le contrôle de la qualité et la traçabilité ;
- 3 Réaliser l'étude en effectuant l'acquisition de données pour toutes les configurations de dispositif de mesure 3D et tous les contextes de mesure, au sein d'une seule plate-forme logicielle universelle ;
- 4 Produire des rapports riches en données publiés directement dans Microsoft Excel avec des feuilles de calcul préformatées liées à des données d'inspection 3D intelligente ; et
- 5 Effectuer des analyses sophistiquées dans Excel sans avoir besoin d'une expertise avancée dans les applications logicielles statistiques.

De la mise en place des études à l'acquisition des mesures et aux résultats autogénérés, tels que les indices et les graphiques, la solution PolyWorks MSA fait en sorte que tous les calculs sont effectués dans un seul écosystème logiciel, et la chaîne entièrement numérique assure l'intégrité des données et des résultats fiables.

Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Études de répétabilité



La première étape de la réalisation d'une analyse de système de mesure est une étude de répétabilité. Elle évalue la variabilité des systèmes de mesure (variation des équipements) lorsqu'ils sont affectés par un nombre minimum de sources de variation. Elle est utilisée lors

de l'évaluation initiale d'un système de mesure pour comparer rapidement différentes configurations du système, comme les emplacements de serrage des gabarits ou les paramètres du matériel de métrologie.

Voici les étapes d'une étude de répétabilité :

- 1 - Placer une pièce dans un gabarit (le cas échéant) ;
- 2 - Mesurer la pièce à l'aide d'un dispositif de mesure 3D ;
- 3 - Retirer la pièce du gabarit ; et
- 4 - Répéter ces étapes une à trois fois, en utilisant toujours la même pièce, le même gabarit et le même dispositif de mesure.

À l'aide du plan de contrôle, le métrologue identifie les caractéristiques clés sur lesquelles une analyse statistique doit être effectuée. La pièce est mesurée au minimum 10 fois, mais généralement au moins 30 fois, afin d'obtenir une bonne estimation de la variation de l'équipement. Ce type d'étude est généralement mené par un métrologue expérimenté qui possède l'expérience nécessaire pour détecter rapidement les problèmes dans le processus de mesure et les résoudre facilement.

Il existe deux types d'études de répétabilité :

Étude de l'instrumentation de type 1² :

- Évalue l'effet du biais et de la répétabilité sur la mesure
- Nécessite une référence certifiée de dimensions connues
- Génère deux métriques : Cg et Cgk
- S'applique lorsqu'une référence certifiée est disponible et que la stabilité du système de mesure n'est pas un problème

Étude de répétabilité³ :

- Évalue la répétabilité et la stabilité du système de mesure
- Ne nécessite aucune référence certifiée
- Utilise une carte I-EM comme base pour l'évaluation de la variabilité et de la stabilité

La principale différence entre ces deux études est que l'étude de type 1 a besoin d'une référence certifiée pour aider à détecter un éventuel biais et n'évalue pas la stabilité du système de mesure.

Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

² Measurement System Analysis Requirements for the Aero Engine Supply Chain (AS13003), norme publiée par SAE International..

³ Measurement System Analysis (MSA) publiée par l'Automotive Industry Action Group (AIAG).

Les deux études de répétabilité sont facilitées par la solution PolyWorks MSA :

- 1 - Le métrologue est guidé pas à pas dans les étapes nécessaires de l'étude avec la création d'un projet d'inspection complet comptant toutes les mesures requises, leurs caractéristiques, contrôles et métriques de sortie, ainsi que le nombre d'items à mesurer, ce qui assure un modèle de mesure robuste.
- 2 - Ensuite, les opérateurs sont guidés par des instructions à l'écran et des affichages 3D tout au long de l'acquisition des mesures.
- 3 - Une fois le processus d'acquisition des mesures terminé, les résultats d'inspection sont automatiquement publiés sur des feuilles de calcul Excel préformatées qui sont dynamiquement liées aux données d'inspection 3D du projet d'inspection.
- 4 - Les feuilles de calcul préformatées fournissent automatiquement au métrologue la variation de l'équipement pour l'analyse, c'est-à-dire la répétabilité, les indices de performance et les graphiques.
- 5 - Pour effectuer cette analyse et optimiser rapidement le processus de mesure, le métrologue peut ajuster les paramètres de mesure dans le projet d'inspection et voir leur influence directe sur la variation de l'équipement, puisque PolyWorks met automatiquement à jour l'index de la feuille de calcul et les valeurs du graphique.

Études R&R

Alors que les études de répétabilité vous permettent d'analyser et d'optimiser la variation de l'équipement de mesure, les études de répétabilité et de reproductibilité, ou étude R&R, sont nécessaires pour effectuer la validation finale d'un système de mesure.

Les études R&R sont généralement exécutées après les études de répétabilité, car elles exigent plus de ressources et de pièces et entraînent des coûts plus élevés. De plus, en effectuant d'abord une étude de répétabilité, le métrologue peut corriger la variation de l'équipement avant d'analyser et de corriger sa reproductibilité. Il existe plusieurs méthodes empiriques acceptées pour estimer l'incertitude de la répétabilité et de la reproductibilité d'un système de mesure. Les deux méthodes les plus courantes sont la *méthode de la moyenne et de l'étendue* (X-barre R) et la méthode d'analyse de la *variance* (ANOVA). Dans les deux cas, la collecte des données suit des règles strictes pour assurer des résultats crédibles :

- **Nombre d'opérateurs** : un minimum de trois opérateurs est requis, et ils doivent utiliser le système de mesure dans un contexte de production.
- **Nombre de pièces** : un minimum de deux pièces, représentatives des variations constatées dans le processus de fabrication, doit être sélectionné. Si possible, le nombre à privilégier serait de dix. Plus le nombre de pièces est grand, meilleure est l'estimation du comportement du processus.
- **Nombre de répétitions** : chaque opérateur doit mesurer toutes les pièces plus d'une fois. Habituellement, deux ou trois répétitions sont effectuées.
- **Ordre aléatoire des mesures** : pour s'assurer que l'ordre de mesure n'influence pas les résultats, chaque opérateur doit mesurer les pièces dans un ordre aléatoire.

Collecte de mesures
3D fiables | L'approche en
matière de métrologie
3D intelligente

Comprendre les bases
d'une MSA

Définition du système
de mesure

Indices de performance
du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance
du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie
appropriée pour évaluer
l'incertitude de systèmes
de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à
l'aide de la méthodologie
expérimentale et d'un
logiciel de métrologie
3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour
les métrologues

Conclusion

La solution Polyworks MSA permet aux utilisateurs de créer et d'exécuter une étude R&R complète en utilisant ces deux méthodes standards :

- 1 - Le métrologue sélectionne rapidement la méthode d'analyse et spécifie des paramètres tels que le nombre d'opérateurs, de répétitions et de pièces.
- 2- Ensuite, PolyWorks crée le projet d'inspection avec tous les items nécessaires dans un ordre d'exécution précis.
- 3 - Une feuille d'ordre d'exécution est ensuite automatiquement exportée vers une feuille de calcul Excel, qui guide les opérateurs lors du processus de collecte des mesures, ce qui assure un ordre de mesure aléatoire.
- 4 - Une barre d'outils guide les opérateurs tout au long du processus d'inspection, assurant que toutes les caractéristiques clés sont mesurées et qu'un nombre suffisant de données palpées et scannées est acquis pour obtenir des extractions de mesure fiables.
- 5 - À la fin de la mesure, le métrologue utilise le projet d'inspection pour estimer la variabilité du système de mesure.

La principale différence entre les méthodologies X-barre R et ANOVA réside dans l'analyse des résultats. La méthode X-barre R permet de quantifier la répétabilité et la reproductibilité à l'aide de calculs de la carte de contrôle. Le guide d'analyse des systèmes de mesure de l'AIAG présente la méthodologie en détail. L'étude R&R avec la méthodologie ANOVA fournit plus de données et est donc plus complet.

L'analyse de la variance (ANOVA) est une analyse statistique qui décompose les sources de variations d'un système de mesure comme suit :

- **Répétabilité** : la variation par rapport au système de mesure qui n'est pas attribuable à d'autres sources de variation.
- **Opérateur** : la variation entre opérateurs.
- **Interaction pièce/opérateur** : la variation découlant de l'interaction entre des opérateurs et des pièces (lorsqu'un opérateur mesure diverses pièces différemment).
- **De pièce à pièce** : la variation provenant des pièces faisant partie de l'étude. Elle représente la variation du processus de fabrication.

Quelle que soit la méthode utilisée, les sources de variation sont considérées comme statistiquement indépendantes. Elles sont donc réunies de manière aléatoire (somme des variances) pour exprimer l'incertitude totale.

Premièrement, la méthodologie détermine si la variation découlant de l'interaction entre les pièces et les opérateurs est importante. Si c'est le cas, elle doit être prise en considération dans la reproductibilité totale du système ($\sigma_{reproductibilité}$) comme suit :

$$\sigma_{reproductibilité}^2 = \sigma_{opérateur}^2 + \sigma_{interaction}^2$$

La répétabilité ($\sigma_{répétabilité}$) ayant été directement déterminée lors de l'étude, il est possible de déterminer la répétabilité et la reproductibilité ($\sigma_{R\&R}$) du système de mesure comme suit :

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{reproductibilité}^2 + \sigma_{répétabilité}^2$$

Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Enfin, la variation totale du processus mesuré (σ_{total}) est obtenue en ajoutant la répétabilité et la reproductibilité du système de mesure à la variation estimée du processus de fabrication ($\sigma_{de\text{ pièce à pièce}}$) comme suit :

$$\sigma_{total}^2 = \sigma_{R\&R}^2 + \sigma_{de\text{ pièce à pièce}}^2$$

L'analyse des résultats de l'étude consiste à :

- Veiller à ce que l'incertitude du système de mesure ($\sigma_{R\&R}$) ait une petite contribution à la variation totale du processus mesuré. La variation estimée du processus de fabrication (de pièce à pièce) devrait représenter la majeure partie de la variabilité. Lorsque la contribution de la variation de pièce à pièce est relativement plus élevée que le reste de l'incertitude, cela signifie que le système de mesure peut distinguer de manière fiable les erreurs de fabrication.

- Comparer la variation du système de mesure avec les limites de spécification (tolérances) pour s'assurer que la variation représente un maximum de 30 % des limites.

L'étape de publication de la solution PolyWorks MSA convertit les données de l'étude MSA en résultats interprétables et en données exploitables, grâce à des tableaux, des résumés et des graphiques faciles à lire, comme le montre la figure 7. Il s'agit d'une partie importante et très utile du processus d'étude numérique, car elle facilite grandement l'interprétation des résultats de l'étude et la résolution des problèmes connexes. Elle permet aux utilisateurs de publier les résultats dans le modèle Excel X-Barre R ou ANOVA sélectionné et d'analyser rapidement l'erreur de mesure et d'autres sources de variabilité. Lors d'une étude ANOVA par exemple, le métrologue peut décomposer la variance en quatre catégories : pièces, opérateurs, interaction entre les pièces et les opérateurs et erreur de répétition attribuable au système.

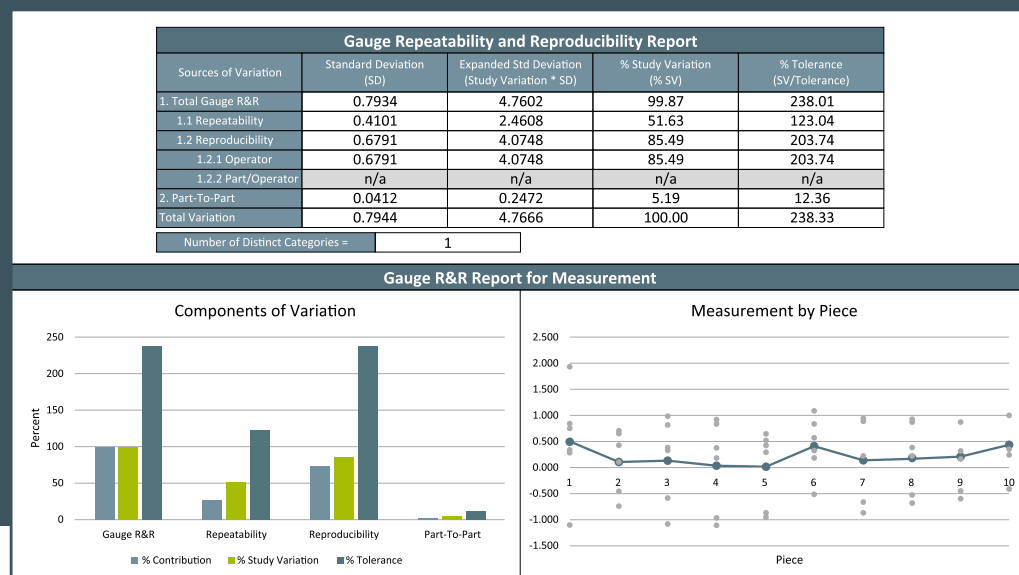


Figure 7
Étude R&R

Collecte de mesures
3D fiables | L'approche en
matière de métrologie
3D intelligente

Comprendre les bases
d'une MSA

Définition du système
de mesure

Indices de performance
du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance
du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie
appropriée pour évaluer
l'incertitude de systèmes
de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à
l'aide de la méthodologie
expérimentale et d'un
logiciel de métrologie
3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour
les métrologues

Conclusion

Recommandations pour les métrologues

Les données recueillies dans les résultats de mesure du système fournissent des informations sur l'effet des incertitudes de mesure. À l'aide des indices de performance (page 5), le métrologue peut apporter des corrections pour optimiser son processus de mesure. Prenons un exemple concret : une cible et un nuage de points des valeurs d'erreur, comme il est illustré à la figure 8.

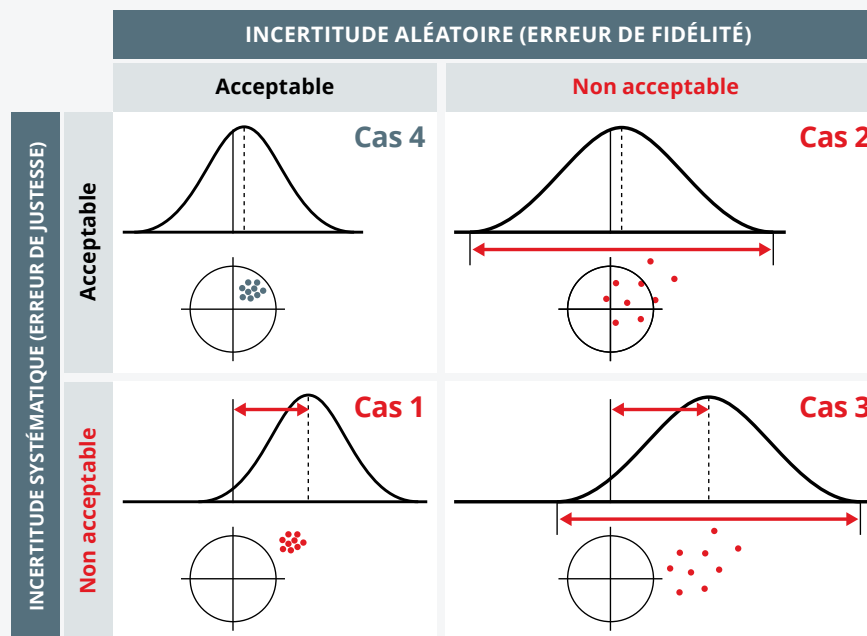


Figure 8 Erreurs de justesse et de fidélité

Le premier problème (cas 1) qu'un métrologue peut repérer est la présence d'une erreur de justesse. Elle peut provenir du biais ou de la linéarité du système, mais dans les deux cas, cette erreur peut être facilement corrigée. Voici les causes possibles d'une erreur de justesse⁴ :

- Le dispositif de métrologie doit être calibré
- L'usure d'un capteur, d'un gabarit ou d'un équipement
- Une erreur dans la valeur de référence utilisée dans le processus d'analyse
- La méthode de mesure (p. ex., la technique de serrage)

Le deuxième problème auquel un métrologue peut être confronté est l'erreur de fidélité (cas 2). Cette erreur peut être liée au système de mesure lui-même (répétabilité) ou être causée par les opérateurs (reproductibilité).

Voici les causes possibles d'une erreur de fidélité⁴ :

- Erreur liée à la pièce : forme, position, état de surface, inclinaison, uniformité des échantillons
- Erreur liée à l'instrument : réparation, usure, défaillance de l'équipement ou du gabarit, mauvaise qualité ou mauvais entretien
- Erreur liée à la méthodologie : variation de la configuration, de la technique, du positionnement, du serrage
- Erreur liée à l'opérateur : technique, position, manque d'expérience, de compétences pour la manipulation ou de formation, fatigue

Si toutes les sources d'erreur sont présentes (cas 3), le métrologue doit décomposer la performance du système de mesure à l'aide des indices et corriger un type d'erreur à la fois pour que le système de mesure soit acceptable (cas 4).

⁴ Measurement System Analysis (MSA) publiée par l'Automotive Industry Action Group (AIAG)

Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion

Conclusion

Un processus d'analyse efficace du système de mesure fait en sorte que vous recueilliez des mesures 3D fiables. Aujourd'hui, il n'est plus nécessaire de subir des processus complexes et obsolètes qui nécessitent l'utilisation de plusieurs solutions logicielles tierces et une expertise avancée dans les applications logicielles statistiques.

La solution logicielle de métrologie 3D intelligente PolyWorks® MSA simplifie grandement la mise en place et l'exécution des études MSA pour les environnements comptant des dispositifs de mesure 3D, ce qui permet de fournir une analyse fiable des variations du système de mesure. Elle offre une méthodologie de travail entièrement numérique facile à utiliser qui assure l'intégrité des données de mesure et permet aux fabricants d'effectuer en toute confiance des études MSA pour chaque nouvelle pièce, permettant ainsi un meilleur contrôle de la qualité.

Laurent Édmond-Girard, ing., M.Sc.A.
Ingénieur en processus de fabrication, InnovMetric

innovmetric

Pour en savoir plus

Contactez-nous : 1 418 688-2061 | Info@innovmetric.com

Visitez notre site Web : www.innovmetric.com



Collecte de mesures 3D fiables | L'approche en matière de métrologie 3D intelligente

Comprendre les bases d'une MSA

Définition du système de mesure

Indices de performance du système de mesure

- Incertitude systématique
- Incertitude aléatoire

Capabilité et performance du système de mesure

Incertitude élargie

Choisir la méthodologie appropriée pour évaluer l'incertitude de systèmes de mesure 3D complexes

Réaliser des études MSA à l'aide de la méthodologie expérimentale et d'un logiciel de métrologie 3D intelligente

Études de répétabilité

Études R&R

Recommandations pour les métrologues

Conclusion