

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D Koncepcja inteligentnej metrologii 3D



Gromadzenie wiarygodnych
pomiarów 3D | Koncepcja
inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu
pomiarowego

Wskaźniki wydajności
systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność
systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej
metodologii do oceny
niepewności złożonych
systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z
wykorzystaniem
eksperymentalnej
metodologii oraz
oprogramowania do
inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D

Koncepcja inteligentnej metrologii 3D

Firmy produkcyjne codziennie kontrolują jakość produktów, gromadząc dane dotyczące pomiarów charakterystyk. Dane te są wykorzystywane do badania stabilności procesu produkcyjnego, określenia możliwości procesu w zakresie zapewnienia jakości i funkcjonalności produktu oraz ustanowienia wskaźników stałych do ilościowego określenia możliwości procesu w zakresie spełnienia wymogów wymiarowych. Wszystko to jest częścią ich ciągłego procesu doskonalenia.

Podczas wdrażania nowego procesu produkcyjnego można dostrzec problemy z jego stabilnością, w przypadku których nie ma możliwości zidentyfikowania przyczyny oraz jej wyeliminowania. W niektórych przypadkach problemy te nie mają związku z procesem produkcyjnym, a raczej z samym systemem pomiarowym.

Metrologicy wiedzą, że pomiar nigdy nie będzie dokładny. Wiele źródeł zmienności wpływa na wydajność systemu pomiarowego, prowadząc do niepewności pomiaru. Zmienność systemu pomiarowego można wyznaczyć, dokonując analizy systemu pomiarowego (Measurement System Analysis – MSA) poprzez przeprowadzanie oceny powtarzalności i odtwarzalności przyrządu (Gauge R&R). Analizy te pozwalają metrologom ocenić prawidłowość działania systemu pomiarowego oraz ograniczyć do minimum czynniki, które przyczyniają się do wyznaczonej całkowitej zmienności procesu i w rzeczywistości pochodzą z systemu pomiarowego.

Analiza MSA może być dość złożona z punktu widzenia konfiguracji i wykonania, tym bardziej w kontekście metrologii 3D, a uzyskanie praktycznych danych wymaga szerokiej wiedzy z zakresu statystyki.

Ta biała księga zawiera:

- Wyjaśnienie najważniejszych koncepcji analizy systemu pomiarowego oraz ich praktycznego zastosowania dla urządzeń pomiarowych 3D,
- Analizę w pełni cyfrowego procesu od konfiguracji i przeprowadzenia analiz powtarzalności i odtwarzalności przyrządu Gauge R&R do uzyskania wyników bezpośrednio w formacie programu Excel na potrzeby analizy i udostępniania, oraz
- Zalecenia dla metrologów w zakresie analizy wyników badań



Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Koncepcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

• Niepewność systematyczna

• Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

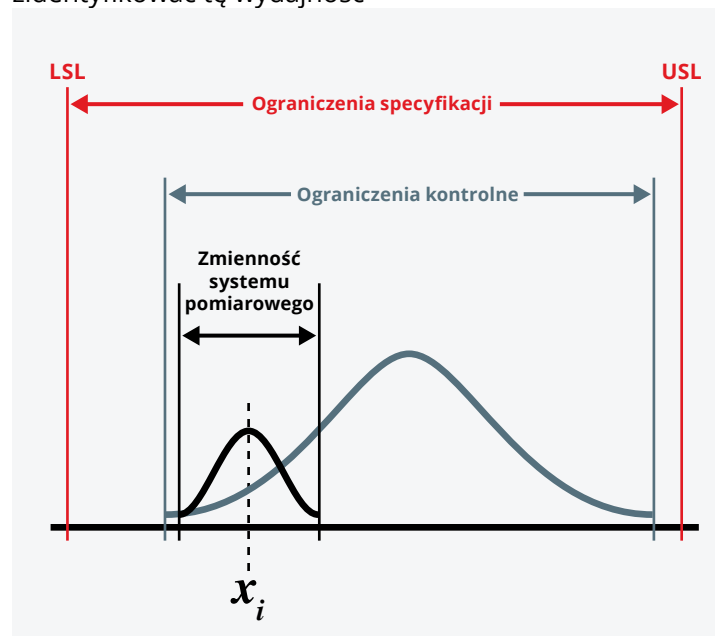
Wniosek

Podstawy analizy MSA

Przeanalizujmy kluczową rolę analizy MSA w kontekście ogólnego procesu kontroli części. W trakcie tego procesu metrologdy mierzą kluczowe charakterystyki, takie jak rozmiar, wymiary, pozycje, profile i orientacje, w celu ustalenia ich odchylenia od specyfikacji nominalnych. Oceniają oni zgodność ze specyfikacjami technicznymi, jak określono w planie kontrolnym w ramach tolerancji i wymogów. Dla każdego pomiaru charakterystyczne są dwa główne składniki: jeden przedstawiający rzeczywiste odchylenie (tj. wartość rzeczywistą), a drugi zmienność systemu pomiarowego. Aby zagwarantować, że system pomiarowy będzie na potrzeby tego zadania wiarygodny i niezawodny, metrologdy muszą zidentyfikować amplitudę zmienności systemu pomiarowego i zadbać o to, by odzwierciedlała maksymalnie od 10% do 30% ograniczeń wynikających ze specyfikacji. Zmienność lub wydajność systemu pomiarowego musi być proporcjonalnie na tyle mała, aby w sposób istotny nie przyczyniała się do wyznaczonej całkowitej zmienności procesu, biorąc pod uwagę zarówno zmienność procesu produkcyjnego jak i systemu pomiarowego, i nie powodowała wykroczenia procesu poza ograniczenia specyfikacji (LSL, USL) lub tolerancje.

Rysunek 1
Wydajność systemu pomiarowego z uwzględnieniem całkowitej zmienności procesu

Na Rysunku 1 widoczna jest interakcja, w której wydajność systemu pomiarowego i zmierzone wartości (x_i) przyczyniają się w sposób relatywnie dyskretny i przewidywalny do zmierzonej zmienności procesu. Zmienność uzyskuje się na podstawie zmierzonych wyników dotyczących części pochodzących z linii produkcyjnej za pomocą technik SPC. Zwykle przy użyciu tych danych oblicza się ograniczenia kontrolne. Innymi słowy, wydajność systemu pomiarowego ma wpływ na wyniki zmierzonej całkowitej zmienności procesu, a przepływ pracy analizy systemu pomiarowego pomaga zidentyfikować tę wydajność



Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

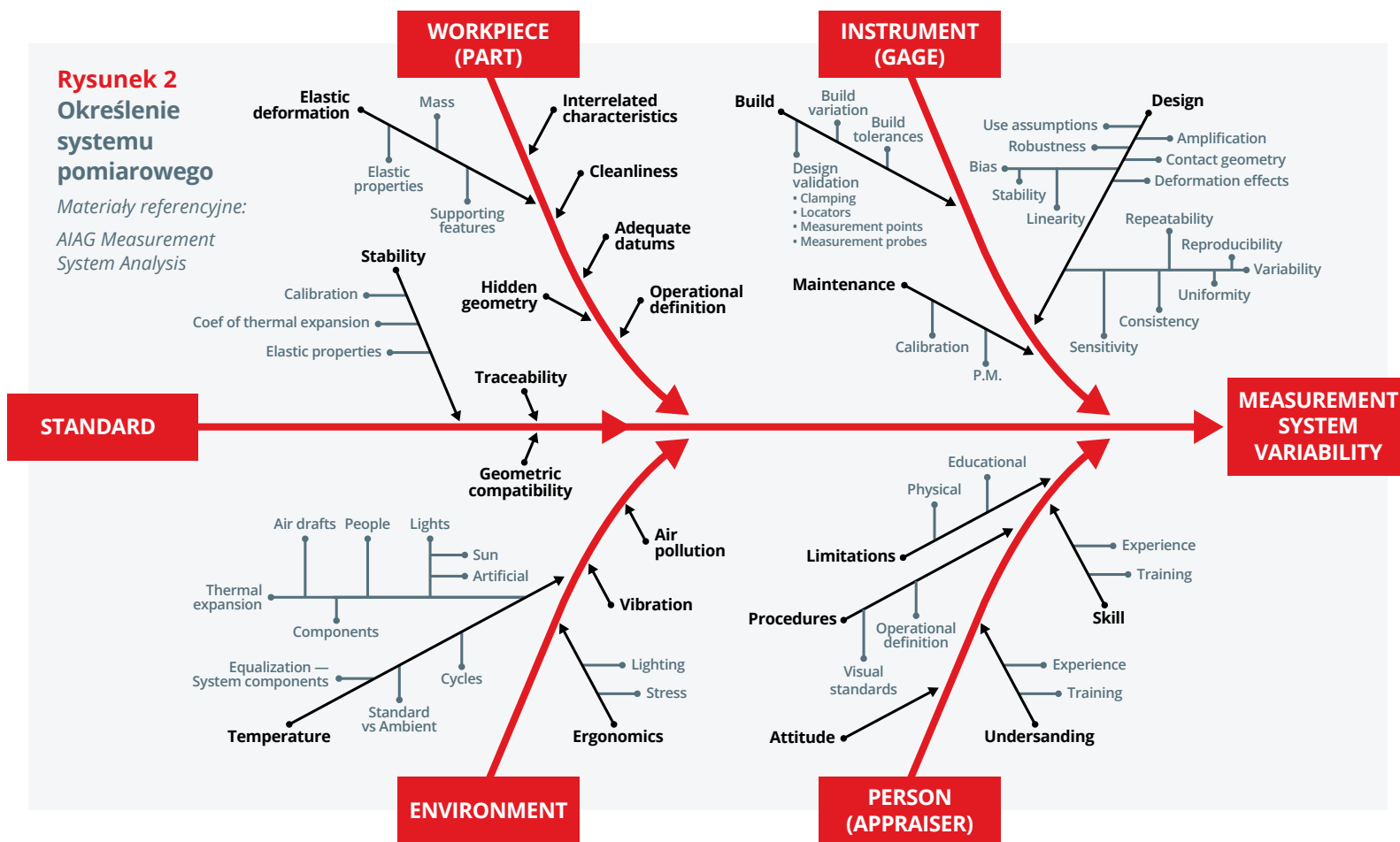
Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Określenie systemu pomiarowego

Przed określeniem wydajności systemu pomiarowego niezwykle istotna jest identyfikacja wszystkich potencjalnych źródeł zmienności, które mogą wpłynąć na proces pomiarowy kluczowej charakterystyki. Według [Automotive Industry Action Group \(AIAG\)](#) system pomiarowy to „zbiór urządzeń lub mierników, standardów, operacji, metod, oprzyrządowania,

oprogramowania, personelu, środowiska i założeń wykorzystywanych do określenia ilościowej jednostki miary lub ustalenia oceny mierzonej charakterystyki; pełnego procesu mającego na celu uzyskanie pomiarów.” Analiza MSA musi uwzględniać wszystkie te czynniki, jak szczegółowo przedstawiono na Rysunku 2, ponieważ mają one wpływ na ogólną niepewność systemu pomiarowego.



Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

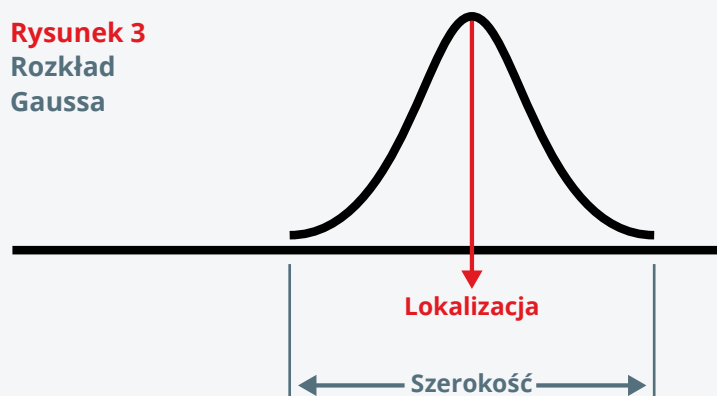
Wniosek

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

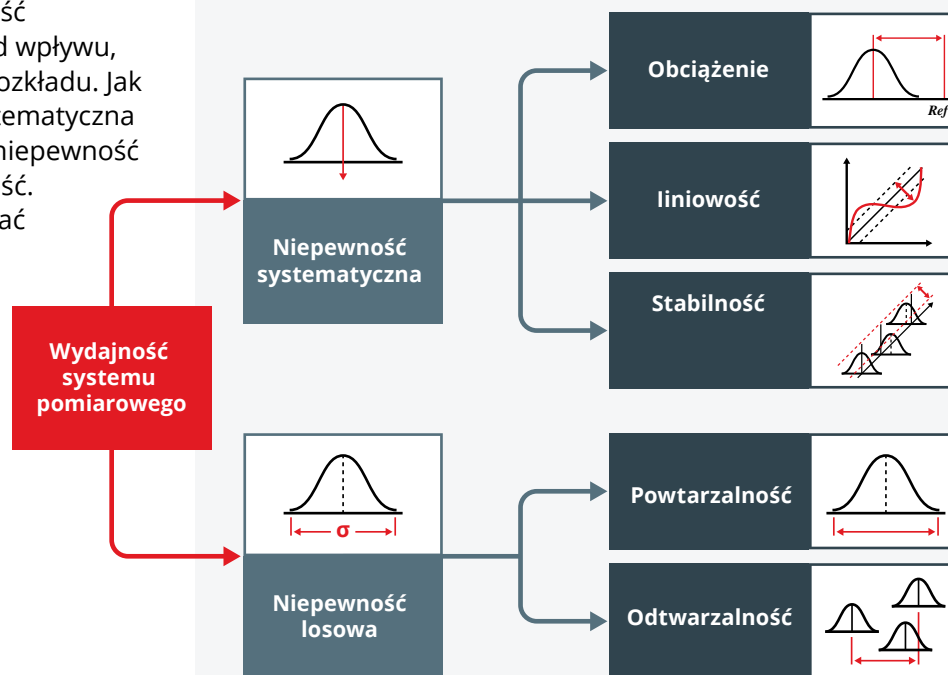
Wydajność systemu pomiarowego określa się przy użyciu wskaźników kategoryzujących i określających ilościowo niepewność pomiaru. Przez gromadzenie danych dotyczących procesu metrolog może określić ilościowo całkowitą zmienność pomiaru, ustalając związane z nim specyficzne zachowanie. Zwykle zachowanie to nazywamy zmienną losową z rozkładem Gaussa (normalnym). Koncepcję tę przedstawiono na Rysunku 3. Czarna krzywa ilustruje zgromadzone dane, tj. zmierzone wartości z procesu pomiaru oraz ich rozkład na podstawie lokalizacji (*średnia*) i parametrów szerokości (*odchylenie standardowe*).

Wiele czynników mających wpływ na proces pomiaru stanowi wiele źródeł niepewności, które są systematyczne (np. *średnia wartość pomiaru a wartość rzeczywista*) lub losowe (np. *zakres pomiarów*). Istnieje możliwość kategoryzacji tych niepewności w zależności od wpływu, jaki mają one na zidentyfikowane parametry rozkładu. Jak przedstawiono na Rysunku 4, niepewność systematyczna obejmuje obciążenie, liniowość i stabilność, a niepewność losowa obejmuje powtarzalność i odtwarzalność. Każdą kategorię można wyraźnie zidentyfikować według unikatowego wzorca.

Rysunek 3
Rozkład
Gaussa



Rysunek 4
Wskaźniki
wydajności



Gromadzenie wiarygodnych
pomiarów 3D | Koncepcja
inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu
pomiarowego

Wskaźniki wydajności
systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna

- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność
systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej
metodologii do oceny
niepewności złożonych
systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z
wykorzystaniem
eksperymentalnej
metodologii oraz
oprogramowania do
inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

• Niepewność systematyczna

Niepewność systematyczna jest niepewnością pomiaru ściśle związaną z pozycją rozkładu normalnego względem znanego wzorca. Z matematycznego punktu widzenia ma ona wpływ na wartość średnią zmierzonych danych. Powszechnie określa się to terminem błąd dokładności. Błąd dokładności dotyczy dokładności między średnią co najmniej jednego zmierzonego wyniku a wartością referencyjną. Błąd dokładności można generalnie odtworzyć i jest on często spowodowany problemami, które można określić ilościowo i wyeliminować. Trzy typy niepewności systematycznej to obciążenie, liniowość i stabilność, gdzie obciążenie występuje najczęściej. Obciążenie określa odległość między średnią co najmniej jednego zmierzonego wyniku ($\bar{x}$) a wartością referencyjną (**Ref**). Z matematycznego punktu widzenia obciążenie oblicza się na podstawie różnicy między wartością rzeczywistą (wartość **Ref**) a obserwowaną średnią pomiarów tej samej właściwości tej samej części. Liniowość, z kolei, wskazuje, na ile dane zgromadzone w zakresie pomiaru urządzenia odpowiadają wartości referencyjnej. Jest to różnica w obciążeniu w całym zamierzonym zakresie pomiaru urządzenia pomiarowego. *Liniowość* przedstawia zmianę obciążenia z jednej maksymalnej wartości zakresu pomiaru na drugą. Ostatnim typem niepewności systematycznej jest *stabilność*. Przedstawia możliwości systemu pomiarowego w zakresie utrzymania sprawności metrologicznej w czasie. Stabilność przedstawia zmienność obciążenia w czasie, zwykle czasie między dwoma kalibracjami systemu.



• Niepewność losowa

Pozostałe źródło niepewności pomiaru stanowi niepewność losowa, zwykle nazywana *marginiesem błędu*. Błąd precyzji wyraża wahania statystyczne w mierzonych danych spowodowane ograniczeniami systemu pomiarowego. Błąd precyzji przedstawia spodziewaną zmienność powtórzonych pomiarów w zakresie pomiarowym. Istnieją dwa typy niepewności losowej: powtarzalność i odtwarzalność. *Powtarzalność* przedstawia szerokość rozproszenia pomiarów uzyskanych w ramach zbioru ściśle kontrolowanych warunków. Opisuje możliwości systemu w zakresie uzyskania takiego samego pomiaru w przypadku użycia tego samego sprzętu, części, szablonu oraz w tych samych warunkach środowiskowych. Zawężona dystrybucja wskazuje na bardziej powtarzalny pomiar. *Odtwarzalność* wyraża zmienność między pomiarami dokonanymi przez różnych operatorów za pomocą tego samego sprzętu i w tych samych warunkach. Z matematycznego punktu widzenia jest to zmienność w średniej odczytów dokonanych przez poszczególnych operatorów.

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Sprawność systemu pomiarowego ($\sigma_{\text{sprawność}}$), nazywana również całkowitą standardową niepewnością, stanowi połączenie wszystkich niepewności systematycznych i losowych. Określa ilościowo wątpliwość związaną z pomiarem w znanych warunkach i służy do identyfikacji całkowitej niepewności systemu pomiarowego w krótkim czasie. Sprawność można obliczyć za pomocą wzoru:

$$\sigma_{\text{sprawność}}^2 = \sigma_{\text{Obciążenie (liniowość)}}^2 + \sigma_{R\&R}^2$$

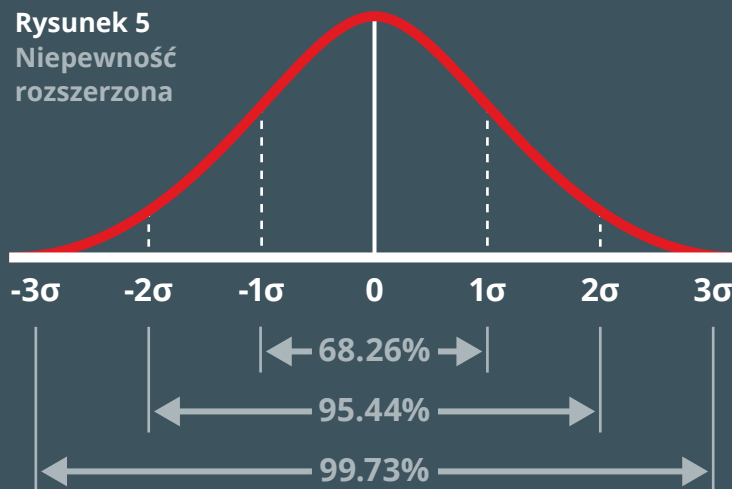
W wydajności z kolei uwzględnia się nie tylko źródła zmienności systemicznych i losowych, ale również źródła dryftu, które z czasem się pojawiają. Oblicza się ją za pomocą wzoru:

$$\sigma_{\text{wydajność}}^2 = \sigma_{\text{sprawność}}^2 + \sigma_{\text{stabilność}}^2$$

Niepewność rozszerzona

Ostatni etap procesu analizy systemów pomiarowych określa niepewność rozszerzoną (U) związaną z systemem pomiarowym. Niepewność rozszerzona przedstawia całkowitą wartość niepewności pomiaru wyrażającą, w ramach określonego poziomu ufności, zakres, który według przewidywań będzie zawierać rzeczywisty wynik pomiaru uzyskany przez system. Można ją wyrazić za pomocą wzoru: $U = \pm K \sigma_{\text{tot}}$ gdzie U to niepewność rozszerzona, K jto współczynnik rozszerzenia przedstawiający obszar pod zwykłą krzywą dla wybranego poziomu ufności (np., $K=3$ dla poziomu ufności 99,73%), i σ_{tot} jstanowi całkowitą niepewność standardową systemu pomiarowego, która zwykle odpowiada jego wydajności. Najczęściej stosowane czynniki ufności podczas analizy systemu pomiarowego znajdują się na rysunku poniżej.

Rysunek 5
Niepewność rozszerzona



Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Aby ocenić niepewność pomiaru danego systemu, trzeba najpierw zdefiniować model pomiaru. Model ten stanowi matematyczne przedstawienie relacji między ilością wyjściową systemu pomiarowego oraz ilościami wejściowymi, o których wiadomo, że zostały uwzględnione w procesie pomiaru. Istnieją dwa typy pomiaru: bezpośredni i pośredni. Będzie to miało wpływ na sposób określenia modelu. Pomiar bezpośredni ma miejsce, gdy przyrząd pomiarowy bezpośrednio pozwala uzyskać informacje dotyczące ilości wyjściowej. Na przykład średnica zewnętrzna (Y) jest mierzona za pomocą mikrometru, który pozwala bezpośrednio uzyskać informacje dotyczące wartości fizycznej X . W tym przypadku model pomiarowy (tj. funkcję) wyraża się za pomocą wzoru $Y=X$. Jednak większość przyrządów pomiarowych 3D służy do pomiarów pośrednich. Za ich pomocą nie można bezpośrednio uzyskać wartości (Y), Uwzględniają one raczej funkcję kilku (n) wartości fizycznych (X_i), $Y=f(X_1,...,(X_n))$. Na przykład w przypadku przenośnych maszyn współrzędnościowych wykorzystywana jest pozycja i orientacja wielu enkoderów do uzyskania specyficznych danych wyjściowych. Na wszystkie te wartości fizyczne, w tym przykładzie pozycję i orientację enkodera, wykorzystywane do obliczania ilości wyjściowej ma wpływ specyficzna niepewność pomiaru (u_{x_i}). Zatem zmierzony wynik uzyskany przez ramię (Y) jest uzależniony od zbioru wartości (Y) jest uzależniony od zbioru wartości (X_i) oraz powiązanych niepewności (u_{x_i}) wykorzystanych w tej estymacji. Ostatecznie, zmierzona wartość (Y) ma również niepewność całkowitą (u_y).

Jeśli model przedstawiający system pomiarowy zostanie jednoznacznie określony, można go użyć do propagacji niepewności z ilości wejściowych do ilości wyjściowych za pomocą dwóch strategii: szeregu Taylora lub symulacji Monte Carlo. Strategie te opisano szczegółowo w takich publikacjach jak [*Guide to the expression of uncertainty in measurement \(GUM\)*](#). [Wyrażanie niepewności w pomiarze – Przewodnik (GUM)] . Z drugiej strony, **jeśli model jest zbyt złożony, aby można go było jednoznacznie wyrazić lub gdy parametry są nieznane, należy zastosować strategię eksperymentalną**. Analiza ilości wyjściowej za pomocą narzędzi statystycznych pozwala na obliczenie całkowitej niepewności systemu pomiarowego. Na przykład w sytuacji, w której metrolog używa przenośnej maszyny współrzędnościowej ze skanerem do zmierzenia profilu powierzchni, o wiele trudniej jest zidentyfikować funkcję pomiaru. W tym przypadku trzeba zastosować analizę eksperymentalną. Ze względu na to, że dokonuje się jej bezpośrednio na wynikach pomiaru, metrolog nie musi dzielić całego systemu pomiarowego, co sprawia, że jest ona prostsza, bardziej przejrzysta i bardziej zrozumiała.

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Koncepcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

¹ Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)

[Ocena danych pomiarowych – Wyrażanie niepewności w pomiarze – Przewodnik (JCGM 100:2008)], wydanie Bureau International des Poids et Mesures

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Dokonanie eksperymentalnej analizy w celu określenia niepewności rozszerzonej złożonych systemów pomiarowych 3D wymaga przeprowadzenia w pierwszej kolejności analizy powtarzalności, po której następuje pełna analiza R&R. Przez zgromadzenie danych dotyczących wyników pomiarowych systemu przy użyciu różnych konfiguracji i prób metrolog może oszacować całkowitą zmienność przy użyciu opisanych wcześniej wskaźników wydajności. Zwykle jednak takie analizy trudno jest przeprowadzić i, aby uzyskać odpowiednie wyniki, trzeba mieć rozległą wiedzę z zakresu statystyki.

Rysunek 6
PolyWorks MSA pasek narzędzi



PolyWorks® oferuje zintegrowane rozwiązanie oprogramowania inteligentnej metrologii 3D do przeprowadzania analiz kompleksowych systemów pomiarowych 3D (MSA) w ramach całkowicie cyfrowego procesu. Możliwości:

- 1 Określenie kluczowych charakterystyk wymaganych w planie kontrolnym;
- 2 Tworzenie analizy przez wybranie jej typu i określenie kluczowych parametrów, które są niezbędne do kontroli jakości i śledzenia;
- 3 Wykonanie analizy przez pobieranie danych dla wszystkich konfiguracji przyrządów pomiarowych 3D i kontekstów pomiarowych, w ramach tylko jednej uniwersalnej platformy oprogramowania;
- 4 Tworzenie raportów zawierających wiele informacji publikowanych bezpośrednio w programie Microsoft Excel ze wstępnie sformatowanymi arkuszami kalkulacyjnymi powiązanymi z danymi z inteligentnej kontroli 3D oraz
- 5 Wykonywanie skomplikowanych analiz w programie Excel bez potrzeby posiadania fachowej wiedzy z zakresu zastosowania oprogramowania statystycznego.

Począwszy od konfiguracji analiz, a skończywszy na pobraniu pomiarów i automatycznie wygenerowanych wyników, np. wskaźników i wykresów, rozwiązanie PolyWorks MSA gwarantuje, że wszystkie obliczenia odbywają się w jednym ekosystemie oprogramowania, a w pełni cyfrowy łańcuch zapewnia integralne i wiarygodne dane.

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna

- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Analizy powtarzalności



Pierwszym etapem analizy systemu pomiarowego jest analiza powtarzalności. Pozwala ona ocenić zmienność systemu pomiarowego (zmienność dotyczącą urządzenia), gdy ma na nie wpływ minimalna liczba źródeł zmienności. Stosuje się ją podczas

wstępnej oceny systemu pomiarowego w celu szybkiego porównania różnych konfiguracji systemu, np. miejsc mocowania oprzyrządowania lub parametrów sprzętu metrologicznego.

Analiza powtarzalności obejmuje:

- 1 - Umieszczenie części w oprzyrządowaniu (jeśli dotyczy);
- 2 - Zmierzenie części przy użyciu przyrządu pomiarowego 3D;
- 3 - Usunięcie części z oprzyrządowania; i
- 4 - Powtórzenie tych czynności maksymalnie trzy razy, zawsze korzystając z tej samej części, oprzyrządowania i przyrządu pomiarowego.

Używając planu kontroli, metrolog identyfikuje kluczowe charakterystyki, na podstawie których należy dokonać analizy statystycznej. Aby uzyskać dobry wynik zmienności urządzenia, część mierzy się co najmniej 10 razy, ale zwykle przynajmniej 30 razy. Analiza tego typu jest zwykle przeprowadzana przez starszego metrologa, który ma doświadczenie niezbędne do szybkiego wykrywania problemów w procesie pomiaru i łatwego ich rozwiązywania.

Istnieją dwa typy analiz powtarzalności:

Typ 1 – analiza Gauge² :

- Służy do oceny wpływu obciążenia i powtarzalności na pomiar.
- Wymaga certyfikowanego wzorca znanych wymiarów.
- Pozwala uzyskać dwa wskaźniki: Cg i Cgk.
- Ma zastosowanie, gdy jest dostępny certyfikowany wzorec, a stabilność systemu pomiarowego nie stanowi problemu.

Analiza Gauge R³ :

- Służy do oceny powtarzalności i stabilności systemu pomiarowego.
- Nie wymaga certyfikowanego wzorca.
- Wykorzystuje wykres I-MR jako podstawę do oceny zmienności i stabilności.

Główna różnica między nimi polega na tym, że analiza typu 1 wymaga certyfikowanego wzorca, który pomoże zidentyfikować możliwe obciążenie, i nie ocenia ona stabilności systemu pomiarowego.

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Koncepcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

² Measurement System Analysis Requirements for the Aero Engine Supply Chain (AS13003) [Wymogi analizy systemów pomiarowych w przypadku łańcucha dostaw silników lotniczych (AS13003)], wydanie SAE International.

³ Measurement System Analysis (MSA) [Analiza systemu pomiarowego (MSA)], wydanie Automotive Industry Action Group (AIAG).

Obie analizy powtarzalności można ułatwić, używając rozwiązania PolyWorks MSA:

- 1 - Metrolog zostaje przeprowadzony przez poszczególne etapy niezbędnych czynności analizy obejmujące utworzenie projektu inspekcji zawierającego wszystkie wymagane pomiary, ich charakterystyki, kontrolki i wskaźniki wyjściowe oraz pewną liczbę elementów do zmierzenia, zapewniając niezawodny szablon pomiarowy.
- 2 - Następnie podczas przeprowadzania pomiarów operatorzy mogą korzystać z wyświetlanych na ekranie instrukcji oraz z widoku 3D.
- 3 - Po zakończeniu procesu pomiarów wyniki kontroli zostają automatycznie opublikowane we wstępnie sformatowanych arkuszach kalkulacyjnych programu Excel, które są dynamicznie powiązane z danymi 3D projektu inspekcji.
- 4 - Dzięki wstępnie sformatowanym arkuszom kalkulacyjnym metrolog ma dostęp do automatycznie obliczonej i przeanalizowanej zmienności dotyczącej urządzenia, tj. powtarzalności, wskaźników wydajności i wykresów.
- 5 - Aby ukończyć tę analizę i szybko zoptymalizować proces pomiaru, metrolog może dostosować parametry pomiaru w projekcie kontroli i sprawdzić ich bezpośredni wpływ na zmienność urządzenia, gdyż PolyWorks automatycznie aktualizuje wskaźnik arkusza kalkulacyjnego i wartości wykresu.

Analizy Gauge R&R

Analizy powtarzalności pozwalają na analizę i optymalizację zmienności urządzenia w systemie pomiarowym. Do ukończenia ostatecznego sprawdzenia systemu pomiarowego wymagane są analizy powtarzalności i odtwarzalności urządzenia, czyli analizy Gauge R&R.

Analizy R&R urządzenia są zwykle przeprowadzane po analizach powtarzalności, ponieważ wymagają one więcej zasobów, części i większych kosztów. Poza tym w przypadku przeprowadzenia w pierwszej kolejności analizy powtarzalności metrolog może skorygować zmienność urządzenia przed przeanalizowaniem i skorygowaniem jego odtwarzalności. Istnieje kilka przyjętych metod empirycznych do obliczania niepewności powtarzalności i odtwarzalności systemu pomiarowego. Dwoma najczęściej stosowanymi metodami są X-bar R (Average and Range Method) oraz ANOVA (Analysis of Variance). W obu przypadkach zbieranie danych opiera się na ścisłych zasadach, które gwarantują wiarygodne wyniki:

- **Liczba operatorów:** potrzebni są co najmniej trzej operatorzy, którzy muszą korzystać z systemu pomiarowego w kontekście produkcyjnym.
- **Liczba części:** należy wybrać co najmniej 2 części reprezentatywne dla wariantów występujących w procesie produkcyjnym. W miarę możliwości, najlepiej 10. Im będzie więcej części, tym dokładniejszy będzie wynik obliczenia zachowania procesu.
- **Liczba powtórzeń:** wszyscy operatorzy muszą zmierzyć wszystkie części więcej niż jeden raz. Zwykle, 2 lub 3 razy.
- **Losowa kolejność pomiarów:** aby dopilnować, że kolejność pomiarów nie wpłynie na wyniki, każdy operator musi mierzyć części w przypadkowej kolejności.

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Rozwiązanie PolyWorks MSA pozwala użytkownikom na tworzenie i przeprowadzanie pełnej analizy Gauge R&R za pomocą tych dwóch standardowych metod:

- 1 - Metrolog szybko wybiera metodę analizy i określa parametry takie jak liczba operatorów, powtórzeń i części.
- 2 - Następnie, PolyWorks tworzy projekt kontroli, w którym wszystkie niezbędne elementy są w określonej kolejności wykonywania.
- 3 - Lista kolejności wykonywania zostaje następnie automatycznie wyeksportowany do arkusza kalkulacyjnego programu Excel, który pomaga operatorom w procesie zbierania pomiarów, zapewniając losową kolejność pomiarów.
- 4 - W procesie kontroli operatorzy postępują zgodnie z instrukcjami na pasku narzędzi, co gwarantuje zmierzenie wszystkich kluczowych charakterystyk oraz pobranie wystarczającej ilości pomierzonych i zeskanowanych danych w celu uzyskania niezawodnych pomiarów.
- 5 - Po zakończeniu pomiaru metrolog wykorzystuje projekt inspekcji do obliczenia zmienności systemu pomiarowego.

Główna różnica między metodologią X-bar R i ANOVA wiąże się z analizą wyników. Metoda X-bar R pozwala na określanie ilościowe powtarzalności i odtwarzalności przy użyciu obliczeń z wykresu kontrolnego. Przewodnik „Measurement System Analysis” („Analiza systemów pomiarowych”) AIAG szczegółowo przedstawia metodologię. Analiza R&R mierników z metodologią ANOVA pozwala uzyskać więcej informacji, a zatem jest bardziej kompleksowa.

Analiza wariancji (ANOVA) to analiza statystyczna, na podstawie której można podzielić źródła zmienności w systemie pomiarowym w następujący sposób:

- **Powtarzalność:** zmienność z systemu pomiarowego, którego nie można przypisać do innych źródeł zmienności.
- **Operator:** zmienność w zależności od operatorów.
- **Zależność operatora i części:** Zmienność wynikająca z zależności operatorów i części (gdy operator mierzy różne części w różny sposób).
- **Część do części:** zmienność związana z częściami, które obejmuje analiza. Przedstawia zmienność procesu produkcyjnego.

Niezależnie od zastosowanej metody źródła zmienności uważa się za niezależne statystycznie. Są zatem gromadzone losowo (suma wariancji), aby wyrazić całkowitą niepewność.

Najpierw metodologia określa, czy zmienność wynikająca z zależności między częściami i operatorami jest znaczna. Jeśli tak, należy je uwzględnić w całkowitej odtwarzalności systemu ($\sigma_{\text{odtwarzalność}}$) w następujący sposób:

$$\sigma_{\text{odtwarzalność}}^2 = \sigma_{\text{operator}}^2 + \sigma_{\text{zależność}}^2$$

W przypadku bezpośredniej identyfikacji powtarzalności ($\sigma_{\text{powtarzalność}}$) podczas analizy istnieje możliwość określenia powtarzalności i odtwarzalności ($\sigma_{R\&R}$) systemu pomiarowego w następujący sposób:

$$\sigma_{R\&R}^2 = \sigma_{\text{odtwarzalność}}^2 + \sigma_{\text{powtarzalność}}^2$$

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

• Niepewność systematyczna

• Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Wreszcie, całkowita zmierzona zmienność procesu ($\sigma_{\text{całościowo}}$) uzyskuje się, dodając powtarzalność i odtwarzalność systemu pomiarowego do obliczonej zmienności procesu produkcyjnego ($\sigma_{\text{część do części}}$) w następujący sposób:

$$\sigma_{\text{całościowo}}^2 = \sigma_{R\&R}^2 + \sigma_{\text{część do części}}^2$$

Analiza wyników badania obejmuje:

- Zadbanie o to, by niepewność systemu pomiarowego ($\sigma_{R\&R}$) w pewnym stopniu przyczyniła się do całkowitej zmierzonej zmienności procesu. Obliczona zmienność procesu produkcyjnego (część do części) powinno uzasadniać większość zmienności. Gdy wkład zmienności „część do części” jest relatywnie większa niż reszta niepewności, oznacza to, że system pomiarowy może w sposób niezawodny rozróżniać błędy produkcyjne.

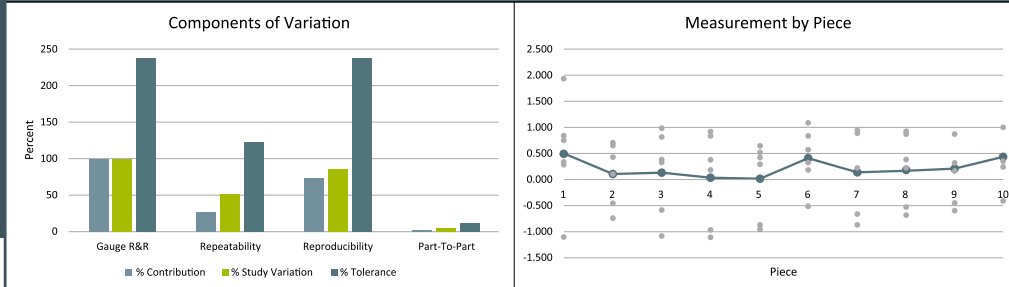
- Porównanie zmienności systemu pomiarowego do ograniczeń specyfikacji (tolerancji), aby dopilnować, by zmienność stanowi maksymalnie 30% ograniczeń.

Na etapie publikacji rozwiązania PolyWorks MSA ma miejsce konwersja danych analizy MSA w nadające się do interpretacji wyniki i umożliwiające odpowiednie działania dzięki łatwym do odczytania tabelom, podsumowaniom i wykresom, jak przedstawiono na Rysunku 8. Jest to istotna i ważna część procesu analizy cyfrowej, ponieważ w dużym stopniu ułatwia interpretację oraz rozwiązywanie problemów związanych z wynikami analizy. Pozwala użytkownikom publikować wyniki w wybranym szablonie X-bar R lub ANOVA programu Excel i szybko analizować błąd pomiaru i pozostałe źródła zmienności. Na przykład w przypadku przeprowadzania analizy ANOVA metrolog może podzielić wariancję na cztery kategorie: części, rzeczoznawców, zależność między częściami i rzeczoznawcami oraz błąd replikacji spowodowany urządzeniem.

Sources of Variation	Standard Deviation (SD)	Expanded Std Deviation (Study Variation * SD)	% Study Variation (% SV)	% Tolerance (SV/Tolerance)
1. Total Gauge R&R	0.7934	4.7602	99.87	238.01
1.1 Repeatability	0.4101	2.4608	51.63	123.04
1.2 Reproducibility	0.6791	4.0748	85.49	203.74
1.2.1 Operator	0.6791	4.0748	85.49	203.74
1.2.2 Part/Operator	n/a	n/a	n/a	n/a
2. Part-To-Part	0.0412	0.2472	5.19	12.36
Total Variation	0.7944	4.7666	100.00	238.33

Number of Distinct Categories = 1

Gauge R&R Report for Measurement



Rysunek 7
Analiza
Gauge R&R

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

• Niepewność systematyczna

• Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

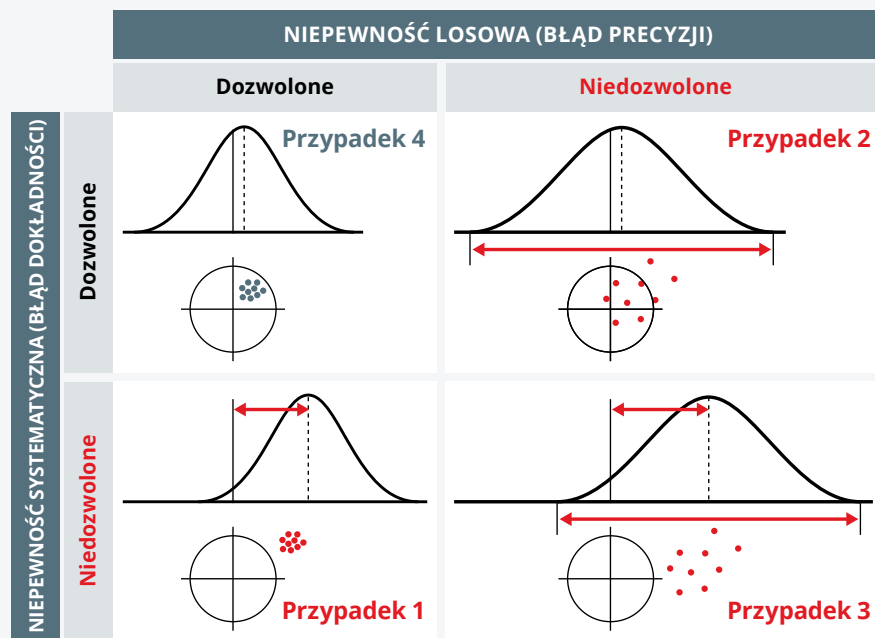
Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

Zalecenia dla metrologów

Dane zebrane na temat wyników systemu pomiarowego dają informację zwrotną na temat wpływu niepewności pomiaru. Korzystając ze wskaźników wydajności przedstawionych na [stronie 5](#), metrolog może podjąć działania korygujące w celu optymalizacji procesu pomiarowego. Użyjmy konkretnego przykładu — wykresu docelowego i punktowego wartości błędów, jak pokazano na rysunku 8.



Rysunek 8 Błędy dokładności i precyzji

Pierwszy problem (przypadek 1), który może zidentyfikować metrolog, polega na sprawdzeniu, czy występuje błąd dokładności – może wynikać z obciążenia liniowości systemu, ale w obu przypadkach można ten błąd łatwo skorygować. Możliwe przyczyny błędu dokładności⁴:

- przyrząd pomiarowy wymaga kalibracji;
- zużyte urządzenie, sprzęt lub oprzyrządowanie;
- błąd wzorca użytego w procesie analizy;
- metoda pomiarowa (np. technika mocowania).

Drugi problem, z którym może zetknąć się metrolog, występuje, gdy pojawia się problem precyzji (przypadek 2). Może to mieć związek z samym systemem pomiarowym (powtarzalność) lub być spowodowane przez operatora (odtwarzalność).

Możliwe przyczyny błędu precyzji⁴:

- mające związek z częścią: forma, pozycja, wykończenie powierzchni, zbieżność, konsystencja próbki;
- mające związek z urządzeniem: naprawa, zużycie, awaria sprzętu lub oprzyrządowania, zła jakość lub nieprawidłowa konserwacja;
- mające związek z metodologią: zmienność konfiguracji, techniki, trzymania, mocowania;
- mające związek z operatorem: technika, pozycja, brak doświadczenia, umiejętności manipulacji lub przeszkolenia, odczuwanie zmęczenia.

Jeśli występują wszystkie źródła błędu (przypadek 3) i system pomiarowy ma zostać zaakceptowany, metrolog powinien podzielić wydajność systemu pomiarowego przy użyciu wskaźników i korygować po jednym typie błędu (przypadek 4).

Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek

⁴ Measurement System Analysis (MSA)

[Analiza systemu pomiarowego (MSA)], wydanie Automotive Industry Action Group (AIAG)

Wniosek

Skuteczny proces analizy systemu pomiarowego pozwala zagwarantować zebranie wiarygodnych pomiarów 3D. Obecnie nie trzeba męczyć się z przestarzałymi, skomplikowanymi procesami, które wymagają wielu rozwiązań programistycznych innych firm i fachowej wiedzy z zakresu zastosowania oprogramowania statystycznego.

Rozwiązanie programistyczne inteligentnej metrologii 3D PolyWorks® MSA pozwala świetnie uprościć konfigurację i wykonanie analiz MSA dla środowisk za pomocą przyrządów pomiarowych 3D, zapewniając niezawodną analizę zmienności systemów pomiarowych. Zapewnia łatwy w obsłudze, w pełni cyfrowy przepływ pracy gwarantujący integralność danych pomiarowych i pozwalający producentom zdecydowanie przeprowadzać analizy MSA w odniesieniu do każdej nowej części, zapewniając lepszą kontrolę jakości.

Laurent Émond-Girard, P.Eng., M.A.Sc.
Inżynier procesów produkcyjnych, InnovMetric

innovmetric

Aby uzyskać więcej informacji

Skontaktuj się z nami: 1-418-688-2061 | info@innovmetric.com

Odwiedź naszą witrynę internetową: www.innovmetric.com/pl



Gromadzenie wiarygodnych pomiarów 3D | Konceptcja inteligentnej metrologii 3D

Podstawy analizy MSA

Określenie systemu pomiarowego

Wskaźniki wydajności systemu pomiarowego

- Niepewność systematyczna
- Niepewność losowa

Sprawność i wydajność systemu pomiarowego

Niepewność rozszerzona

Wybór odpowiedniej metodologii do oceny niepewności złożonych systemów pomiarowych 3D

Prowadzenie analiz MSA z wykorzystaniem eksperymentalnej metodologii oraz oprogramowania do inteligentnej metrologii 3D

Analizy powtarzalności

Analizy Gauge R&R

Zalecenia dla metrologów

Wniosek