

ANÁLISIS DEL ESTADO ACTUAL DE LAS TÉCNICAS EN INSTRUMENTOS INTELIGENTES

Andrés J. Piñón Pazos
Universidad de A Coruña. Dep. Ingeniería Industrial
EUP.Ferrol Avda. 19 Febrero s/n 15405 A Coruña, andrespp@cdf.udc.es

Ramón Ferreiro García, José Luís Calvo Rolle, Francisco Javier Perez Castelo
Universidad de A Coruña. Dep. Ingeniería Industrial)

Resumen

Este artículo presenta el estado actual de las distintas técnicas adoptadas en la instrumentación inteligente. Se presentan los principales métodos de corrección de errores, las técnicas de detección y aislamiento de fallos, tanto los tradicionales como los nuevos métodos y por último se mencionan las tendencias en cuanto a capacidad de comunicación.

Palabras Clave: Instrumentos Inteligentes, sensores inteligentes, detección y aislamiento de fallos.

1 INTRODUCCIÓN

La Inteligencia es una característica humana que se atribuye habitualmente a máquinas y dispositivos que muestran ciertas capacidades de reaccionar ante ciertos eventos. Si se observa el estado actual de los sensores inteligentes, se ha pasado de la incredulidad y recelo a la aceptación en apenas dos décadas. La evolución tecnológica, y la incorporación de tecnologías como los microcontroladores, redes neuronales, sofisticadas funciones de procesamiento de señal y funciones de comunicación han favorecido el progreso enormemente. Cada día la diferencia entre sensores inteligentes e instrumentos inteligentes se vuelve más difusa. A lo largo de este documento se tratarán las características principales de los instrumentos inteligentes y su evolución. En este caso nos referiremos a los instrumentos inteligentes como un sistema más general.

2 INSTRUMENTOS INTELIGENTES

Una definición de un sensor inteligente, es aquel que modifica su comportamiento interno para optimizar los datos del mundo físico y los envía hacia un host [8]. Una configuración hardware genérica de un instrumento inteligente ha sido presentada en [19]. Hay muchas formas distintas de hacer instrumentos de campo inteligentes [20]. A continuación vamos a

mencionar algunas razones generales para dotar de inteligencia a los instrumentos de campo.

Mejora en la precisión de medida:

- Linealización de la relación de entrada salida.
- Calibración automática del cero.
- Compensación automática de errores causados por interferencias ambientales, por ejemplo la temperatura ambiente.
- Compensación automática de errores causados por variaciones en las condiciones del proceso tal como la temperatura o presión de un fluido en la medida de un flujo.

Mejoras en la capacidad operacional y posibilidades de mantenimiento:

- Operaciones de mantenimiento utilizando funciones de comunicación digital.
- Integración de sensores de distintos rangos permitiendo reprogramar el rango.
- Almacenar y leer los datos del sensor y los datos de control de proceso.
- Funciones de auto-chequeo y auto-aprendizaje.
- Detección de Fallos y alarmas.

Mejoras en las funciones de comunicación y reducción de fallos en el sistema:

- Monitorizado de los datos importantes.
- Comunicación con sistemas de jerarquías superiores, y con sistemas vecinos.
- Funciones de detección y predicción de fallos.

Hoy en día la tendencia en sensores/ instrumentos inteligentes es hacia la integración del elemento sensor, los circuitos electrónicos y funciones de tratamiento de la señal para el procesamiento de la misma y de la circuitería necesaria para la comunicación hacia un bus de los datos medidos y del estado del sensor/instrumento.

Un esquema básico para un sensor/instrumento inteligente se muestra en la figura 1.

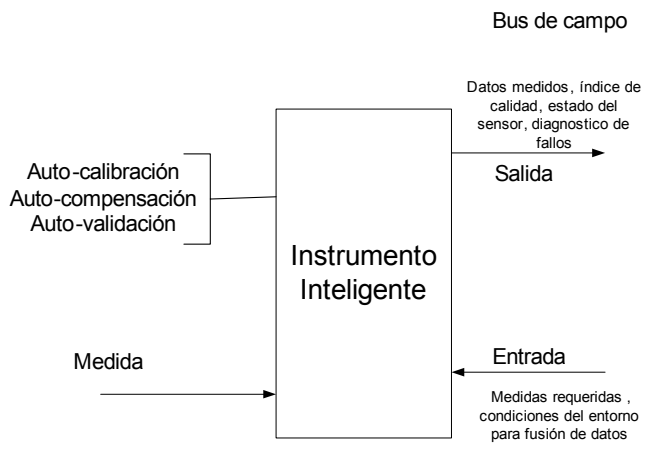


Figura 1 Esquema de instrumento inteligente.

3 COMPENSACIÓN DE ERRORES DEL SENSOR Y FUNCIONES INTELIGENTES

3.1 METODOS DE COMPENSACIÓN DE DEFECTOS EN SENSORES

El concepto de defecto en el sensor se define en [27]. Hay dos métodos originales de compensación de defectos del sensor: Calibración y Predicción.

3.1.1 Método de Calibración.

Desde el punto de vista de la precisión alcanzable esencialmente, este método se puede considerar el más efectivo.

La auto-calibración significa que el sensor puede monitorizar la condición de medida mediante un test para decidir si una nueva calibración es necesaria o no. Más detalles sobre compensación de sensores mediante calibración se describen en [28].

3.1.2 Método de Predicción.

En el método de Calibración se necesita desconectar el elemento de medida durante la calibración. Esto es un grave problema en aquellos casos en los que no se puede parar el proceso. En estos casos el método de Predicción se puede usar para predecir las derivas del sensor. Estas derivas son cambios en la señal de salida del sensor durante su funcionamiento.

Los algoritmos de predicción incluyen:

- Una prueba del mismo tipo de sensores en las condiciones de explotación, donde se

puede obtener el modelo matemático de las variaciones del sensor;

- Medida de la influencia de los factores reales en condiciones de funcionamiento y ajuste del modelo;
- Cálculo de la predicción de la deriva en función de las derivas del modelo y aplicar la compensación.

3.2 PRINCIPALES FUNCIONES INTELIGENTES

Teniendo en cuenta lo mencionado en los apartados anteriores, las funciones inteligentes básicas encaminadas a dar soporte a las características metrológicas (precisión) en los instrumentos de medida son: elección automática de los modos de operación, elección de los algoritmos de funcionamiento, corrección de errores, adaptación a las condiciones de funcionamiento,... Además otras funciones inteligentes que incorporan son: predicción de las derivas, corrección de errores aditivos utilizando algoritmos de corrección adaptativos y auto-aprendizaje.

4 DETECCIÓN Y AISLAMIENTO DE FALLOS EN INSTRUMENTOS.

Un sistema de medida automático se puede definir como "inteligente" si tiene capacidades para detección y aislamiento de fallos (IFDI). El objetivo de IFDI es desarrollar esquemas y técnicas para la detección y aislamiento de fallos que se podrían dar en sensores o instrumentos usados en sistemas automáticos de control o medida. Los fallos en los instrumentos podrían dar lugar a fallos de operación lo cual puede provocar fallos de seguridad, sobretodo en instalaciones críticas.

Los sistemas de diagnóstico on-line deberían tener características IFDI, ya que un fallo en los instrumentos puede causar falsas alarmas y fallos en los sistemas de diagnóstico y supervisión. Asimismo, en los controles automáticos en lazo cerrado un fallo en la medida tomado por un instrumento puede dar lugar a daños cuya extensión dependerá de la sensibilidad del sistema de control a datos incorrectos.

Todas estas razones han dado lugar a la propuesta de muchos esquemas y técnicas IFDI. El principio básico del diagnóstico está basado en residuos, que son funciones analíticas que crecen en caso de fallo. La generación de residuos se complica cuando el sistema a muestrear es un sensor. Las técnicas propuestas en la literatura se basan bien en la redundancia física, bien en la redundancia analítica.

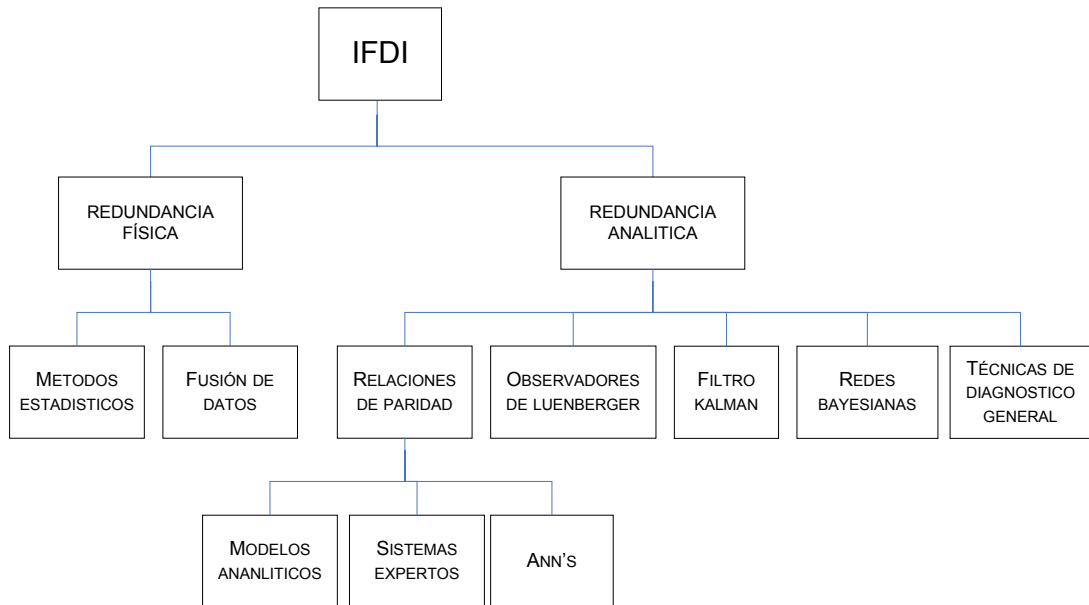


Figura 2. Técnicas de generación de residuos

En la redundancia física es necesario aumentar el número de instrumentos con respecto al mínimo necesario para la aplicación en función de si se desean o no capacidades de aislamiento del fallo. Si estas capacidades son deseadas, se necesitaría un mínimo de tres instrumentos.

En el caso de la redundancia analítica no es necesario incrementar el número de sensores pero requiere el desarrollo expreso de modelos de fallo y de residuos. En los últimos años se han propuesto varias técnicas IFDI implementadas mediante sistemas expertos [2][3][4], ANN's [1][5][6] y controladores Fuzzy [7].

En la figura 2 se muestra una clasificación de las distintas técnicas de generación de residuos.

4.1 REDUNDANCIA FÍSICA

4.1.1 Métodos Estadísticos.

La generación de residuos desde un conjunto de sensores/instrumentos redundantes consiste en comparar cada medida con el verdadero valor estimado obtenido por medio de una combinación de medidas dadas por sensores redundantes [13].

Por ejemplo, para un conjunto de N sensores midiendo la misma cantidad x_j :

- Suponiendo que la salida de cada instrumento y_{ji} se caracteriza por una incertidumbre u_{ji} [21];
- Considerando que todas las salidas y_i están tomadas de forma determinista en el mismo instante de tiempo t para las entradas $x_j(t)$;

Tenemos: $y_{ji} = y_j(t) \pm u_{ji}$ para $i=1, \dots, N$.

Entonces se puede definir un vector de residuos

$$r_{ji} = y_i - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N y_k / (N-1) \quad (1)$$

En ausencia de fallos y suponiendo idénticos todos los u_i , cada componente de r_j es una variable con media cero y varianza $\text{var}(r_{ji}) = (N/N-1)u^2$. En presencia de un fallo en el i th sensor:

- Todas las componentes r_{ji} , aunque mantienen la misma varianza, tienen una media distinta de cero cuyo valor depende de la entidad del fallo.
- El máximo es alcanzado siempre en el componente i th que es el más sensible a los fallos en el sensor i th.

4.1.2 Fusión de datos.

Los residuos basados en redundancia física pueden ser generados también mediante métodos basados en lógica fuzzy. Concretamente, en el rango de valores de residuos como los de la ecuación (1), se pueden definir funciones propias y reglas fuzzy en base a factores de estabilidad e incertidumbre, para evitar el uso de umbrales fijos.

Esquemas basados en técnicas de fusión de datos se proponen en [24], donde una diagnosis y detección de fallos basada en fusión se aplica a un conjunto de sensores redundantes. El método opera con reglas fuzzy describiendo las diferencias entre valores medios y entre incertidumbres, y detecta un fallo cuando la incertidumbre del proceso de fusión llega a ser mayor que la mínima incertidumbre de salida del

sensor. Posteriormente un proceso de fusión es llevado a cabo sobre los datos adquiridos en instantes posteriores de tiempo para excluir derivas debidas a parámetros influyentes. Finalmente, la identificación entre conflictos originados en ambas fusiones permite que los fallos sean aislados y clasificados.

4.2 REDUNDANCIA ANALITICA

Las técnicas de generación de residuos basados en la redundancia analítica para esquemas IFDI son métodos que pueden aplicarse a instrumentos.

Primero fueron las Relaciones de Paridad, observadores de Luemberger y filtros de Kalman, mientras que las redes artificiales de neuronas (ANN's), los algoritmos genéticos (GA) y las redes Bayesianas aparecieron posteriormente.

4.2.1 Relaciones de Paridad

Tienen sus orígenes en [22][14] y se usan principalmente para sistemas de medida que forman parte de lazos de control formados por: controlador, actuadores, dispositivo bajo control e instrumentos[14].

Es necesario identificar dos clases de relaciones basadas en ecuaciones matemáticas del sistema: redundancia directa y redundancia temporal.

Las primeras relaciones se pueden identificar entre salidas de distintos instrumentos cuando:

- Un instrumento mide directamente una cantidad que podría ser determinada de forma indirecta a través de la salida de otros instrumentos.
- Cuando una cantidad puede ser indirectamente determinada mediante el uso de dos juegos distintos de medidas realizadas directamente.

Las siguientes relaciones están basadas en ecuaciones diferenciales y relacionan las entradas de dispositivos o actuadores con la salida de los sensores.

La aplicación rigurosa de las relaciones de paridad solo es posible cuando

- 1) Podemos modelizar matemáticamente y de forma precisa los actuadores y el sistema bajo control.
- 2) Se permita una cierta redundancia de instrumentos, permitiendo solape entre relaciones.
- 3) Todas las cantidades que forman parte de las relaciones son conocidas y/o se pueden medir con baja incertidumbre.
- 4) El número de instrumentos es de tamaño medio

- 5) Se usan máquinas potentes para cálculo en tiempo real.

Cuando las condiciones 3) y 5) no se pueden satisfacer y/o los modelos matemáticos no son precisos, en [14] se sugiere una aproximación basada en el conocimiento.

Si la condición 1) no se cumple, las relaciones de paridad entre las salidas de los instrumentos pueden ser deducidas e implementadas mediante una ANN debidamente entrenada.

4.2.2 Observadores de Luemberger y Filtros de Kalman.

Los observadores de Luemberger y los filtros de Kalman son estimadores de estado usados para resolver problemas de detección y aislamiento de fallos [14]. En [9] [10][11][12][14][15][25][26] se han propuesto esquemas IFDI eficientes basados en observadores o filtros.

Los observadores de Luemberger en casos deterministas, o los filtros de Kalman en casos estocásticos, reconstruyen las salidas del sistema bajo control desde las medidas o desde un subconjunto de estas. El esquema IFDI más sencillo basado en observadores requiere un simple estimador manejado por la salida más fiable del sensor. La salida global es entonces reconstruida y la comparación entre las salidas reales y las estimadas realizadas mediante circuitería lógica permite la detección y aislamiento de cualquier fallo del sensor, utilizando umbrales convenientes [12].

Para el trabajo con observadores, la fase de diseño requiere un conocimiento analítico amplio del sistema bajo control y en el caso de alto número de sensores el esfuerzo computacional es elevado. Por otro lado, el procedimiento de diseño es sistemático, está definido un procedimiento para el manejo del ruido, se pueden tratar sistemas no lineales y se pueden obtener altas sensibilidades a los fallos de los instrumentos.

4.2.3 Redes Bayesianas.

Una red bayesiana es un grafo acíclico dirigido en el que cada nodo representa una variable y cada arco una dependencia probabilística, en la cual se especifica la probabilidad condicional de cada variable dados sus padres. La variable a la que apunta el arco es dependiente (causa-efecto) de la que está en el origen de éste. La topología o estructura de la red nos da información sobre las dependencias probabilísticas entre las variables y sus dependencias condicionales dada otra(s) variable(s). Dichas dependencias, simplifican la representación del

	Relaciones de paridad	Observadores Luenberger	Redes bayesianas	Técnicas generales de diagnostico
Restricciones	Sis. De medida incluido en el lazo de control	Sis. De medida incluido en el lazo de control	Estado del sistema basado en eventos discretos	No
Conocimiento requerido	Conocimiento profundo del sistema bajo control	Conocimiento profundo del sistema bajo control	Conocimiento estadístico del sistema	Conocimiento profundo del sistema bajo control
Costo computacional	Medio	Alto	Medio	Bajo-Medio
Procedimiento de diseño	No sistemático	Sistemático	Sistemático	No sistemático
Sensibilidad al fallo del instrumento	Media+Alta	Media	Baja	Media
Selectividad del fallo del instrumento	Alta	Alta	Alta	Media

Tabla 1. Comparativa de los distintos métodos de IFDI

conocimiento (menos parámetros) y el razonamiento (propagación de las probabilidades).

El obtener una red bayesiana a partir de datos, es un proceso de aprendizaje que se divide en dos etapas: el aprendizaje estructural y el aprendizaje paramétrico. La primera de ellas, consiste en obtener la estructura de la red bayesiana, es decir, las relaciones de dependencia e independencia entre las variables involucradas. La segunda etapa, tiene como finalidad obtener las probabilidades a priori y condicionales requeridas a partir de una estructura dada.

En la práctica, las redes Bayesianas, al estar basadas en el análisis de la sucesión de eventos probables, representan un modelo probabilístico de la evolución del sistema, en vez de un modelo funcional analítico del sistema. Por ello, pueden ser consideradas como una forma particular de redundancia analítica donde los residuos están basados en la comparación de la secuencia medida de eventos con todas las posibles secuencias en ausencia de fallos en el sensor. Trabajos en IFDI con redes bayesianas se encuentran en [16][17][23]

4.2.4 Técnicas de diagnostico general.

Las tareas de detección y aislamiento de fallos en instrumentos se puede incluir como una de las tareas que debe de realizar un sistema diseñado para la detección de fallos en un sistema global donde los instrumentos son considerados una fuente adicional de fallo. Por lo tanto, hay que adoptar un modelo analítico del sistema completo lo que no requiere la exactitud de todos los datos medidos.

En [18] se presenta la generación de residuos en línea mediante la comparación de las salidas reales del proceso y las de una ANN entrenada para modelar el

proceso. Existen otras aproximaciones donde se utilizan algoritmos genéticos para la obtención de generadores de residuos.

5 CAPACIDAD DE COMUNICACIÓN.

Una parte importante de los instrumentos inteligentes es la capacidad de comunicación. Hoy en día los llamados instrumentos inteligentes incorporan capacidad de comunicación bajo protocolos estandarizados que sirven para enlazar los sensores distribuidos de una forma coherente.

Dependiendo de los distintos buses de comunicación y de los protocolos usados las capacidades de los instrumentos varían enormemente. En algunos casos, como en Foundation Fieldbus, además de dotarse de capacidad de comunicación al instrumento son los propios instrumentos de campo los que pueden realizar la propia tarea de control incluyendo los lazos de regulación y control, todo ello distribuido sobre el propio campo, formado así un verdadero sistema de control multi-agente con inteligencia distribuida.

La tendencia en sistemas modernos de medida y control es tener conectividad a un ordenador en red de área local. Estos sistemas tienen una estructura de red jerárquica con capacidades de computación distribuida y pueden proporcionar grandes mejoras en funcionamiento y efectividad en instrumentación mediante la óptima distribución de sus recursos. Los módulos de bajo nivel de estos sistemas usualmente tienen capacidades de cálculo y procesamiento de datos. En estos sistemas los componentes de alto nivel pueden tener acceso directo y control remoto a estos módulos. A través de una red, estos módulos se

pueden acceder vía Internet. Estos componentes y módulos forman la base de un sistema de medida y control distribuido. El desarrollo de tales sistemas de control y de adquisición de datos distribuidos se puede aplicar siguiendo el estándar IEEE 1451. Este estándar especifica los requisitos de comunicación para un Smart Transducer Interface Module (STIM), módulo de control y medida Network Capable Application Processor (NCAP), y un nodo de red con capacidad de cálculo.

6 CONCLUSIONES.

El presente artículo presenta la descripción de las principales técnicas dentro del desarrollo de la instrumentación inteligente. Se han comentado las técnicas de corrección de errores, así como los principales métodos de detección y aislamiento de fallos cuyo resumen se muestra en la Tabla 1, y por último se ha visto una breve pincelada a las capacidades de comunicación.

Dentro de las técnicas IFDI se tiene a mejorar las técnicas basadas en la redundancia analítica, ya que las técnicas de redundancia hardware solo son de aplicación en aquellas instalaciones que no tienen restricciones de coste y espacio y donde la seguridad es un factor primordial.

Otro campo de trabajo dentro de los instrumentos inteligentes está en las capacidades de comunicación que gracias a la velocidad de evolución de la tecnología cada vez se puede dotar de mayores capacidades a los instrumentos incluso utilizando tecnologías wireless.

Agradecimientos

Los autores desean mostrar su agradecimiento por el soporte financiero asignado al proyecto español DPI2003-00512 desde el MCYT y FEDER.

Referencias

[1] Bernieri A, Betta G., Pietrosanto A., and Sansone C., "A neural network approach to instrument fault detection and isolation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, pp. 747–750, June 1995

[2] Betta G., Pietrosanto A., and Polese N., "Fault source detection and isolation in automatic measurement stations," in *Proc. XII IMEKO World Congr.*, Beijing, China, Sept. 1991, pp. 1377–1382.

[3] Betta G., D'Apuzzo M., and Pietrosanto A., "A knowledge-based approach to instrument fault detection and isolation," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 44, pp. 1009–1016, Dec. 1995.

[4] Betta G., Dell'Isola M., Liguori C., and Pietrosanto A., "Expert systems for the detection and isolation of faults on low-accuracy sensor systems," in *Proc. IEEE Workshop ET&VS-IM/97*, Niagara Falls, Ont., Canada, May 1997, pp. 39–48.

[5] Betta G., Liguori C., and Pietrosanto A., "The use of genetic algorithms for advanced instrument fault detection and isolation schemes," in *Proc. XIII IEEE IMTC/96*, Brussels, Belgium, June 1996, pp. 1129–1134.

[6] Betta G., Dell'Isola M., Liguori C., and Pietrosanto A., "An artificial intelligence-based instrument fault detection and isolation scheme for air conditioning systems," in *Proc. XIV IMEKO World Congr.*, vol. VII, Tampere, Finland, June 1997, pp. 88–95.

[7] G. Boccignone, M. De Santo, C. Liguori, and A. Pietrosanto, "Using fuzzy logic and genetic algorithms for the design of hybrid soft controllers with instrument fault detection and isolation capability," in *Proc. VIII IMEKO TC-4*, Budapest, Hungary, Sept. 1996, pp. 334–337.

[8] Brignell J., "The future of intelligent sensors: A problem of technology or ethics?," *Sen. Actuators A*, vol. 56, no. 1-2, pp. 11-15

[9] Chen J., Patton R. J., and Liu J. P., "Detecting incipient sensor faults in flight control systems," in *Proc. Third IEEE Conf. Control Applications*, Glasgow, U.K., Aug. 1994, pp. 871–876.

[10] Clark R. N., Fosth D. C., and Walton V. M., "Detecting instrument malfunctions in control systems," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 11, no. 4, pp. 465–473, 1975.

[11] Clark R. N., "Instrument fault detection," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-14, no. 3, pp. 456–465, 1978.

[12] Clark R. N., "A simplified instrument failure scheme," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-14, no. 4, pp. 558–563, 1978.

[13] Dorr R., Kratz F., Ragot J., Loisy F., and Germain J. L., "Detection isolation and identification of sensor faults in nuclear power plants," *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.*, vol. 5, no. 1, pp. 42–60, 1997.

[14] Frank P. M., "Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy—A survey and some new results," *Automatica*, vol. 22, pp. 333–344, 1986.

[15] Frank P. M., Keller L., "Sensitivity discriminating observer design for instrument failure detection," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-16, no. 4, pp. 456–465, 1980.

[16] Heger S. and Aradhye H., "Sensor fault detection and accommodation using causal probabilistic networks for autonomous control systems [Online]. Available http://ace.unm.edu/documents/sensor_fdi.

- [17] [Kirsch H. and Kroschel K., "Applying Bayesian networks to fault diagnosis," in Proc. Third IEEE Conf. Control Applications, Glasgow, U.K., Aug. 1994, pp. 895–900.](#)
- [18] [Koppen-Seliger B. and Frank P. M., "Fault detection and isolation in technical processes with neural networks," in Proc. 34th IEEE Conf. Decision and Control, New Orleans, LA, 1995, pp. 2414–2419.](#)
- [19] [Meijer G.C.M., "Concepts and focus point for intelligent sensor systems" Sen. Actuators A, vol. 41-42, pp 183-191, 1994.](#)
- [20] [Harada K., "Intelligent Sensors in Process Instrumentation" Intelligent sensors. Elsevier Science B.V.](#)
- [21] [ISO Guide to the expression of uncertainty in measurement, 1993.](#)
- [22] [Lou X. C., Willsky A. S., and Verghese G. L., "Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems," Automatica, vol. 22, pp. 333–344, 1986.](#)
- [23] [A. E. Nicholson and J. M. Brady, "Dynamic belief networks for discrete monitoring," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., vol. 24, pp. 1593–1610, Nov. 1994.](#)
- [24] [Park S. W. and Lee C. S. J., "Fusion-based sensor fault detection," in Proc. IEEE Int. Symp. Intelligent Control, 1993, pp. 156–161.](#)
- [25] [Patton R. J. and Chen J., "Advances in fault diagnosis using analytical redundancy," IEE Colloq. Plant Optimisation for Profit \(Integrated Management and Control\), pp. 1–12, 1993.](#)
- [26] [Patton R. J., Chen J., and Nielsen S. B., "Model-based methods for fault diagnostic: Some guidelines," Trans. Instrum. Meas. Contr., vol. 17, no. 2, pp. 73–83, 1995.](#)
- [27] [Sachenko A., "Application of the Simulation for Accuracy Improvement in the Measurements of Nonelectrical Quantities", First International Conference "Modelling in Measurement Processes", Wroclaw, Poland, pp. 148-151, 1993.](#)
- [28] [Sachenko A, Maslyjak B, Kochan V, "Design of Measurement Instruments on the Basis of Transducers with Self-Calibration", Proceedings of the Third IFAC-Symposium on the Low Cost Automotion., \(Vienna, Austria\), 1992, pp. 139-141.](#)