

# Sistema de navegación para robots móviles utilizando fusión sensorial

## Navigation system for mobile robots using sensor fusion

MARIA T. CHICA R.

Investigadora del grupo de Robótica y Sistemas Inteligentes de la Universidad Del Norte, Barranquilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, . Correo electrónico: mchica@uninorte.edu.co

ANTONIO L. PINEDA

Investigador del grupo de Robótica y Sistemas Inteligentes de la Universidad Del Norte, Barranquilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Correo electrónico: antonio.pineda@ieee.org

MARIO A. ESMERAL P.

Investigador del grupo de Robótica y Sistemas Inteligentes de la Universidad Del Norte, Barranquilla, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Correo electrónico: mesmeral@ieee.org

Clasificación del artículo: investigación (conciencias)

Fecha de recepción: 12 de agosto de 2009

Fecha de aceptación: 26 de noviembre de 2009

**Palabras clave:** CMUcam2, fusión sensorial, KheperaII, lógica difusa.

**Key words:** CMUcam2, sensor fusion, KheperaII, fuzzy logic.

### RESUMEN

Este artículo describe el diseño y construcción de un sistema de navegación para robots móviles implementando fusión sensorial. El sistema utiliza un algoritmo de lógica difusa para realizar la fusión de la información dada por los sensores IR y la cámara, este algoritmo fue orientado para tener una baja complejidad para que pueda ser implementado en sistemas empujados. Fue probado con un robot KheperaII y una cámara CMUCam2. Fue descrito en lenguaje C. Este sistema muestra un mejor comportamiento en la navegación con respecto al vehículo de Braitenberg #3 en cuanto

a la precisión de los giros realizados y la distancia recorrida para encontrar el objeto, pero toma más tiempo para encontrar el objetivo, porque los procesos de visión y locomoción no son simultáneos

### ABSTRACT

This paper describes the design and implementation of a navigation system for mobile robots using sensor integration. The proposed system uses a fuzzy logic algorithm to make the fusion

of the information given by the IR sensors and the camera; this algorithm was oriented to have a low complexity for embedded systems. It was tested with a KheperaII robot and a CMUcam2 camera. It was described in C language. This system shows a better navigation performance than the Braiten-

berg vehicle #3 because has a better precision on the spins and the distance that walked to find the object, but takes more time to find the objective because the vision and motion processes are not simultaneous.

\* \* \*

## 1. Introducción

En las últimas décadas, ha aumentado la utilización de herramientas tecnológicas que le facilitan a los hombres realizar tareas específicas, ya sea porque están imposibilitados de alguna forma para hacerlas, o porque simplemente desean automatizar los procesos.

Unas de estas herramientas son los robots, los cuales son utilizados en múltiples disciplinas, formas y tareas. Según el objetivo son diseñados para que cuenten con los elementos necesarios para realizar la tarea y hacerla de la forma más eficiente.

Como la información entregada por los sensores es imprecisa, en muchos casos, es necesario que se adapte al robot para que tome decisiones confiables, para que se pueda utilizar en un ambiente real, no controlado [7].

Uno de los métodos utilizados para aprovechar al máximo la poca información entregada por los sensores es la fusión sensorial, la cual utiliza la información obtenida por los distintos tipos de sensores, determina cuál es la más relevante, y con base en ésta toma la decisión [3].

En los capítulos siguientes se describen los aspectos importantes para el desarrollo de un sistema de fusión sensorial apto para un robot móvil. Para empezar se presenta una descripción general del funcionamiento del sistema. Luego se muestra una descripción detallada del sistema desarrollado. A continuación, se muestran los resultados de las pruebas realizadas del sistema y se compara su desempeño con vehículo de Braitenberg # 3. Finalmente, se presentan las conclusiones de este

trabajo basándose en los resultados obtenidos y en las comparaciones realizadas. De estas conclusiones se desprenden recomendaciones que se proveen como guía para trabajos futuros.

## 2. Descripción general

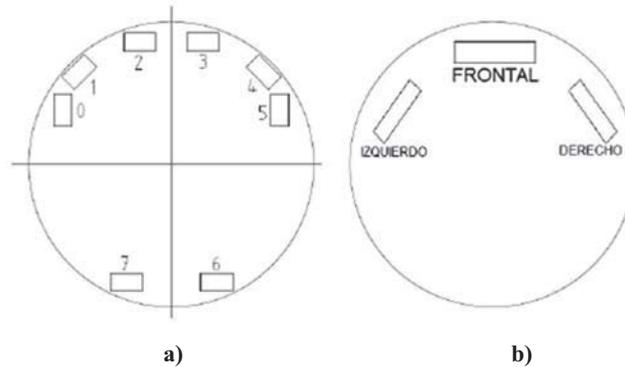
El sistema desarrollado se divide en dos partes principales, la adquisición de la información y el procesamiento de ésta o bloque difuso.

### 2.1. Adquisición de la información

La información obtenida del entorno del robot proviene de los seis sensores infrarrojos considerados y de la cámara instalada sobre éste.

1) El robot KheperaII consta de ocho sensores infrarrojos que muestran cuán cerca se encuentra el robot de algún objeto; el funcionamiento de estos sensores se basa en la reflexión de la luz emitida por éste. La etapa de adecuación de la señal (amplificación) permite un alcance de hasta 7 cm, luego de esto la señal entra a un convertidor análogo-digital de 10 bits, que entrega el dato aproximado de la cercanía de algún objeto [4].

Para efectos del procesamiento de lógica difusa se unificaron los sensores 0 con 1, 2 con 3, y 4 con 5 (figura 1a) para formar los sensores: izquierdo, derecho y frontal (figura 1b). La unificación de los sensores se determina mediante el promedio de la lectura entregada por el convertidor digital-análogo.



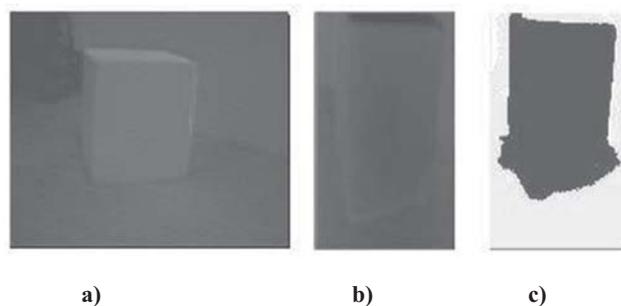
**Figura 1.** Distribución y modelamiento de los sensores infrarrojos sobre el robot. **a)** Ubicación de los sensores originales. **b)** Ubicación de los sensores modelados

Los sensores 6 y 7 que pertenecen a la parte trasera del robot no se tomaron en cuenta, dado que los movimientos del sensor serán sólo hacia adelante y giros sobre su propio eje.

2) La información de la cámara es procesada mediante una modificación al algoritmo de etiquetado para imágenes a color de bajo costo de procesamiento (CCL), el cual se encarga de entregar la ubicación aproximada del objeto en las cercanías del robot mediante el cálculo del centroide o centro de masa del objeto en cuestión, esta ubicación se da en coordenadas car-

tesianas en el marco de la imagen obtenida [2].

El proceso para determinar el centroide del objeto en cuestión inicia con la obtención de la imagen, la cual se realizó con la CMUcam2; la imagen obtenida tiene una resolución de 87x143 en el espacio de color YCbCr (figura 2a), una vez se obtiene la imagen se filtra para eliminar las componentes de ruido (figura 2b). Luego de esto se realiza el proceso de segmentación, el cual consiste en separar la imagen dejando sólo las secciones de interés (figura 2c) [6].



**Figura 2.** Etapas del procesamiento de la imagen. **a)** Imagen original. **b)** Imagen filtrada. **c)** Imagen segmentada

Una vez se tiene la imagen segmentada, se realiza el etiquetado de los objetos en la imagen; en este caso, el objetivo por determinar es un cubo

rojo, una vez se obtiene el objeto etiquetado se procedió a realizar la extracción de características de ese objeto; las características de interés son el

color en este caso rojo, la forma y el centroide. El centroide o centro de masa del objeto se determinó hallando la media de los píxeles de la imagen que tenían la misma etiqueta, esto se realiza en el eje X y en el eje Y de la imagen.

Este bloque toma la información de los sensores y la de la cámara (centroide) y entrega un estimado del paso siguiente que debe dar el robot, este proceso se realiza de manera iterativa hasta que se consigue llegar al objetivo [8].

## 2.2. Bloque difuso

El método difuso implementado fue el de Mamdani el cual se describe en la figura 3.

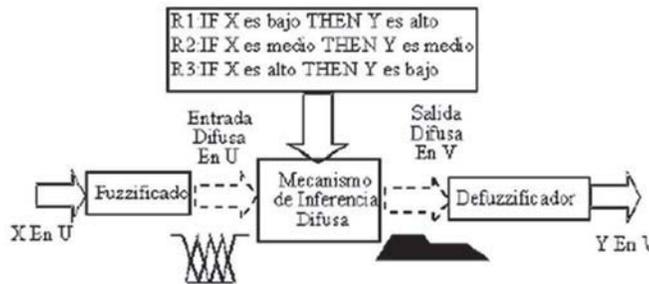


Figura 3. Procesamiento general del sistema difuso Mamdani

En este sistema se realiza el proceso de “fuzificación” de las variables de entrada (sensores y centroide) y luego son procesadas mediante el mecanismo de inferencia difusa, el cual entrega un resultado al cual se le aplica el proceso de “defuzificación” para su uso en el sistema, en este caso es el paso siguiente por realizar por parte del robot [1]. El proceso de “fusificación” y de “defusificación” se realiza mediante conjuntos difusos de entrada y salida previamente definidos, los cuales sirven para clasificar la información de entrada, según su orden de relevancia [5].

Los posibles pasos por seguir del robot dependían de la posición del objetivo en la imagen y de la lectura de los sensores, por ejemplo, si la imagen muestra que el objetivo se encuentra a la izquierda lejos, pero los sensores determinan un obstáculo de ese lado, el bloque difuso deberá entregar como siguiente movimiento esquivar el obstáculo visto por los sensores, para luego llegar al objetivo que vio la cámara; una vez superado el obstáculo se vuelve a tomar información de entrada para determinar la nueva posición del objetivo y la de posibles nuevos obstáculos.

## 3. Descripción detallada del programa de fusión

Las entradas de este programa son los valores de sensorr, sensorf, sensorl y del centroide. Se define un conjunto difuso de entrada y uno de salida.

El conjunto difuso de entrada tiene como universo de discurso las medidas entregadas por los sensores del robot. Los límites de este universo de discurso se hallaron por medio de pruebas realizadas con el robot posicionando objetos a varias distancias y orientados de manera distinta. Este universo de discurso se define entre 0 y 1.020. El grado de pertenencia de este conjunto difuso es entre 0 y 1.

Las variables de entrada difusas sensorr, sensorl y sensorf están representadas por tres conjuntos difusos: VN (muy cerca, por sus siglas en inglés), N (cerca, por sus siglas en inglés) y FA (lejos, por sus siglas en inglés).

Estos conjuntos difusos junto a sus respectivas

funciones de pertenencia se muestran en la figura 4.

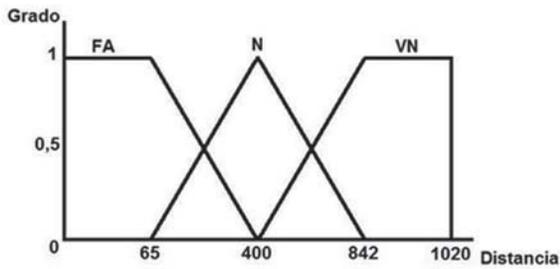


Figura 4. Conjunto difuso de entrada

El conjunto difuso de salida tiene como universo de discurso los ángulos en los que se puede orientar el robot, a fin de alcanzar el objetivo. Los límites de este universo de discurso se hallaron por medio de pruebas realizadas con el robot haciéndolo moverse distintos ángulos para determinar cuáles generarían unos movimientos bruscos y cuáles no.

Se determinó que si se hacía girar 45 grados el movimiento no sería brusco y sería suficiente para ser determinante en la orientación. Este universo de discurso se define entre -45 y 45 grados. El grado de pertenencia de este conjunto difuso es entre 0 y 1.

Las variables de salida son la posición de los “encoders” de los motores y están representadas por tres conjuntos difusos: F (frente, por sus siglas en inglés), L (izquierda, por sus siglas en inglés) y R (derecha, por sus siglas en inglés).

Estos conjuntos difusos junto a sus respectivas funciones de pertenencia se muestran en la figura 5.

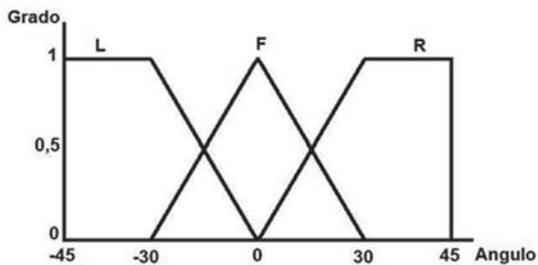


Figura 5. Conjunto difuso de salida

El centroide entregado por el programa de visión está en función de X y Y, donde el máximo valor de Y es 87 y el de X es 144. Dependiendo del valor de Y, se puede saber si el objetivo se encuentra cerca o lejos del robot, ya que, con base en pruebas realizadas con la cámara, si y es mayor o igual a 70 el objetivo se encuentra cerca, y si se encuentra fuera de este rango, por ende, se encuentra lejos.

También se puede saber, con base en el centroide, si el objetivo se encuentra ubicado en el lado derecho, izquierdo o frontal de la imagen.

Con base en las prácticas realizadas con la cámara se definieron los rangos de la imagen mostrados en la siguiente tabla: si X está entre 0 y 48, el objetivo está a la izquierda; si X está entre 49 y 96, se encuentra en la zona frontal y si X está entre 97 y 144, el objetivo se encuentra en el lado derecho. Esto se puede observar en la tabla 1.

Tabla1. Posición del objetivo en la imagen

Zona de decisión	Valores
Izquierda	$0 \leq X \leq 48$
Frente	$49 \leq X \leq 96$
Derecha	$97 \leq X \leq 144$

Si el centroide indica que el objetivo se encuentra lejos, el robot navega. Esta navegación la realiza, primero determinando con base en el centroide la ubicación del objetivo en la imagen se mueve en esa dirección, es decir, si el objetivo está a la izquierda, gira 45 grados en esa dirección, si está a la derecha gira 45 grados en esa dirección y si esta al frente se mantiene orientado hacia allá.

Después de orientarse, halla el grado de pertenencia de los sensores del robot con los conjuntos de entrada y si el grado mayor es VN o N, es decir, si tiene un objeto cerca, gira 90 grados a fin de esquivar el obstáculo. Si el grado mayor es FA, avanza en la orientación que tiene 5 cm. para poder determinar si tiene algún objeto cerca.

Si el centroide indica que el objetivo se encuentra cerca, se realiza el programa de lógica difusa.

En éste se definen las reglas si-entonces que van a determinar la acción por tomar para conseguir la meta u objetivo del sistema.

Las reglas que se definieron son las siguientes:

- (SI SENSORF ES VN Y SENSORR ES N Y SENSORL ES FA) O (SI SENSORF ES VN Y SENSORL ES N Y SENSORR ES FA), ENTONCES ANGULO ES FRENTE
- SI SENSORR ES VN Y SENSORF ES N Y SENSORL ES FA, ENTONCES ANGULO ES DERECHA
- SI SENSORL ES VN Y SENSORF ES N Y SENSORR ES FA, ENTONCES ANGULO ES IZQUIERDA

Estas reglas fueron escogidas, porque se considera son las que mejor rendimiento pueden mostrar, debido a que consideran las tres variables de entrada y utilizan la información brindada por éstas para determinar la posible correcta orientación del robot para encontrar el objeto.

Para aplicar las reglas se utiliza un sistema difuso tipo Mamdani (Ver Figura 3). Esto quiere decir que se realizó el siguiente proceso:

- Se hallaron los grados de pertenencia de cada sensor (sensorr, sensorl y sensorf) a los conjuntos difusos de entrada VN, N y FA.
- Se determina cuál es el mayor para cada sensor.
- Se revisa si se cumplen los tres antecedentes de una de las tres reglas.
- De cumplirse esto en alguna regla se aplica el método del mínimo, es decir, se escoge el grado menor de entre los tres antecedentes y por éste se va a limitar el conjunto difuso de salida correspondiente. Lo que significa que este grado es la entrada del conjunto difuso de salida.

Cuando se cuenta con los tres conjuntos difusos de salida limitados por este grado se realiza el mé-

todo del centroide. Es decir, se realiza la división de la sumatoria del ángulo por el grado correspondiente y la sumatoria de los grados de cada ángulo. Esto entrega un valor que es la salida del programa de fusión y éste es el ángulo en el que se debe orientar el robot para encontrar el objetivo.

Si después de esto no se ha encontrado el objetivo se toma una nueva foto y se realiza todo el proceso de nuevo.

A continuación se muestra el diagrama de flujo del programa principal:

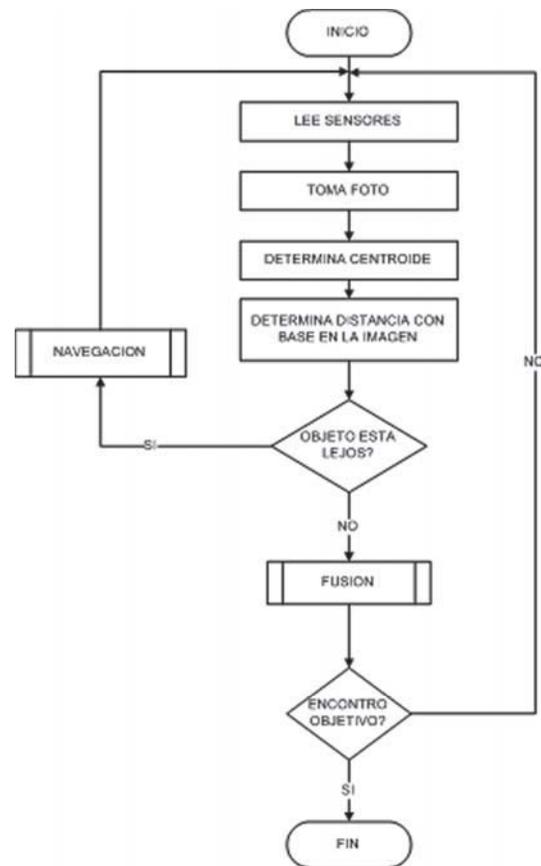
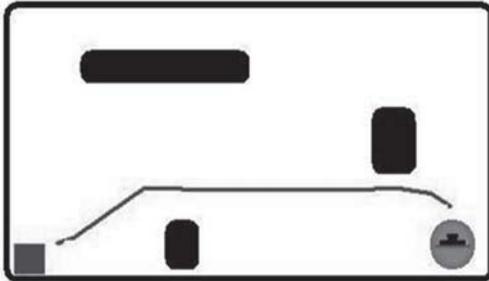


Figura 6. Diagrama de flujo del programa principal

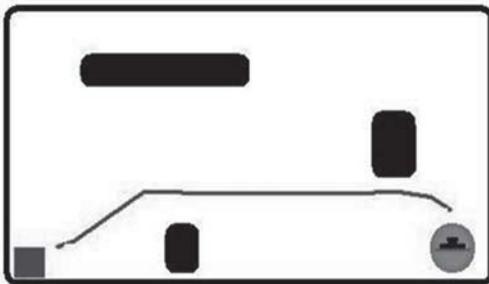
## 4. Pruebas y resultados

El sistema propuesto mostró ser más eficiente

frente a otras soluciones clásicas, como lo es el vehículo de Braitenberg #3 el cual trabaja de manera errática para lograr el objetivo (figura 7), al encontrarlo con un número de pasos reducidos y más precisos (figura 8).



**Figura 7.** Prueba del recorrido con vehículo de Braitenberg #3



**Figura 8.** Prueba del recorrido con algoritmo de navegación por fusión sensorial

Con base en la información que arrojan las tablas 2 y 3 se puede observar que el modelo propuesto realiza menos giros, un 60% menos, para encontrar el objetivo, pero demora más tiempo, 54% más, que el vehículo de Braitenberg #3, dado que el modelo propuesto debe detenerse para tomar la fotografía, lo cual toma aproximadamente 4 segundos y aparte de esto también demora tiempo para la toma de decisiones.

**Tabla 2.** Datos de la máquina de Braitenberg #3

	Tiempo	# de Giros
Prueba 1	24s	8
Prueba 2	32s	12
Prueba 3	137s	32
Prueba 4	39s	12
Prueba 5	27s	9
Prueba 6	26s	10
Prueba 7	18s	7
Prueba 8	32s	8
Prueba 9	35s	9
Prueba 10	35s	12
Prueba 11	33s	10
Prueba 12	36s	8
Promedios	39.5s	11.417

**Tabla 3.** Datos del modelo propuesto

	Tiempo	# de Giros
Prueba 1	82s	5
Prueba 2	76s	6
Prueba 3	93s	6
Prueba 4	88s	5
Prueba 5	90s	5
Prueba 6	91s	4
Prueba 7	90s	5
Prueba 8	83s	4
Prueba 9	89s	5
Prueba 10	91s	4
Prueba 11	90s	3
Prueba 12	71s	5
Promedios	86.17s	4.75

## 5. Conclusiones

Al manejar información de distintos sensores al mismo tiempo para entregar un sólo resultado es posible realizar tareas de navegación básicas de una manera más rápida que implementando la información de los sensores por separado o para objetivos distintos; se logra alcanzar un objetivo de características específicas en un entorno desconocido para el robot.

El sistema propuesto tiende a ser lento, en comparación con el vehículo de Braitenberg #3, dado que requiere de tiempo para procesar la información obtenida de los sensores, pero, resulta más eficiente en cuanto a la navegación, dado que los giros que realiza el sistema propuesto son en el sentido en el que se encuentra el objeto; en cambio, los giros del vehículo de Braitenberg #3 son en el sentido en el cual no encuentra obstáculos.

Al realizar un recorrido mucho menor, en comparación con el vehículo de Braitenberg, en el sistema propuesto ocurre un menor desgaste en sus componentes dinámicos (engranajes, ejes, etc.), lo cual prolonga la vida útil del sistema.

## 6. Recomendaciones futuras

Sería interesante realizarlo en un sistema embebido, como también cómo probar otros conjuntos difusos de entrada y salida, o trabajar con otros métodos distintos a la lógica difusa.

En futuros trabajos es posible adaptar este proyecto a otras plataformas móviles y cámaras simplemente variando algunos parámetros en el software y realizando algunas adaptaciones del hardware.

Además, en futuros trabajos se puede considerar como medida importante la distancia recorrida para encontrar el objeto, ya que en el caso de que el robot deba trabajar de manera continua, entre menos distancia recorra ahorra más recursos.

También sería interesante trabajar para disminuir el tiempo que le toma al robot, utilizando este desarrollo, para encontrar el objeto. Esto se puede hacer realizando el procesamiento en un microprocesador con más capacidades o haciéndolo en tiempo real.

---

## Referencias

---

- [1] A.M. Alimi, N. Derbel y A. Ouezri. *Automatic generation of fuzzy rules for the control of a mobile robot*. Systems Analysis Modeling Simulation. Volumen 42, Issue 7. p. 1081 – 1105.
- [2] M. Esmeral Palacio y D. Gil A. *An alternative labeling algorithm for color images on a low cost microprocessor*. CERMA, 2007.
- [3] P. Kalata, M. Kam y X. Zhu. *Sensor fusion for mobile robot navigation*. 1997, Extraído del World Wide Web:
- [4] SA. K-TEAM. Khepera2 User Manual. K-Team SA., Suiza, 2002.
- [5] R. Langari y J. Yen. *Fuzzy Logic: Intelligence, Control and Information*. Prentice-Hall, 1999.
- [6] SEATTLE ROBOTICS. CMUcam2 Vision System User Guide, 2003.
- [7] K.C. Tan et ál. “*Intelligent Sensor Fusion and Learning for Autonomous Robot Navigation*”. *Applied Artificial Intelligence*, Vol, 19, No. 5, (Mayo-Junio 2005), pp.433-456.
- [8] S.X. Yang y A. ZHU. *A fuzzy logic approach to reactive navigation of behavior-based mobile robots*. 2004. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/9126/28923/01302517.pdf> isnu

mber=28923&prod=CNF&arnumber=1302517&arSt=+5045&ared=+5050+Vol.5&arAuthor=Anmin+Zhu%3B+Yang%2C+S.X.R. W. Lucky, "Automatic equalization for digital communication," Bell Syst. Tech. J., vol. 44, no. 4, pp. 547-588, Apr. 1965. <http://ieeexplore.ieee.org/iel1/5/12063/00554212.pdf?arnumber=554212>