

**ESTIMADORES NO  
LINEALES: APLICACIÓN DEL  
FILTRO DE KALMAN A SEÑALES  
BIOMECÁNICAS**



**ESTIMADORES NO  
LINEALES: APLICACIÓN DEL  
FILTRO DE KALMAN A SEÑALES  
BIOMECÁNICAS**

Mauro Callejas Cuervo  
Manuel Andrés Vélez Guerrero  
Andrea Catherine Alarcón Aldana

Estimadores no lineales: Aplicación del Filtro de Kalman a señales biomecánicas/ Callejas Cuervo, Mauro; Vélez Guerrero Manuel Andrés; Alarcón Aldana, Andrea Catherine. Tunja: Editorial UPTC, 2019. 150 p.

ISBN 978-958-660-351-5

1. Filtro de Kalman. 2. Estimadores no lineales. 3. Señales biomecánicas. 4. Tratamiento de señales. 5. Sensores inerciales y magnéticos.

(Dewey 621.3 /21).



#### **Primera Edición, 2019**

300 ejemplares (impresos)

Estimadores no lineales: Aplicación del Filtro de Kalman a señales biomecánicas

ISBN 978-958-660-351-5

#### **Colección de Investigación UPTC No. 134**

© Mauro Callejas Cuervo, 2019

© Manuel Andrés Vélez Guerrero, 2019

© Andrea Catherine Alarcón Aldana, 2019

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2019

#### **Editorial UPTC**

Edificio Administrativo – Piso 4

Avenida Central del Norte N°. 39-115, Tunja, Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

#### **Rector, UPTC**

Oscar Hernán Ramírez

#### **Comité Editorial**

Manuel Humberto Restrepo Domínguez, Ph. D.

Enrique Vera López, Ph. D.

Yolima Bolívar Suárez, Mg.

Sandra Gabriela Numpaque Piracoca, Mg.

Olga Yaneth Acuña Rodríguez, Ph. D.

María Eugenia Morales Puentes, Ph. D.

Édgar Nelson López López, Mg.

Saida Zarely Ojeda Pérez, Ph. D.

Carlos Mauricio Moreno Téllez, Ph. D.

#### **Editora en Jefe**

Lida Esperanza Riscanevo Espitia, Ph. D.

#### **Coordinadora Editorial**

Andrea María Numpaque Acosta, Mg.

#### **Corrección de Estilo**

Liliana Paola Muñoz Gómez

#### **Diseño carátula**

Manuel Andrés Vélez Guerrero

#### **Diseño y diagramación**

Andrés A. López Ramírez

andres.lopez@uptc.edu.co

Libro financiado por la Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 de 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Citación: Callejas-Cuervo, M., Vélez-Guerrero, M. A., & Alarcón-Aldana, A. C. (2019). *Estimadores no lineales: Aplicación del Filtro de Kalman a señales biomecánicas*. Tunja: Editorial UPTC.

# Prólogo

En los proyectos de investigación desarrollados dentro del Grupo de Investigación en Software GIS de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), se hace uso de diversos métodos, técnicas y tecnologías para la captura del movimiento biomecánico, en donde se evidencian problemáticas relacionadas con la contaminación de las señales recolectadas y el análisis de la información. La implementación de un adecuado procesamiento y filtro de las señales se hace necesario para obtener mejores resultados al momento de procesar dicha información.

A partir del desarrollo de dichos proyectos en el grupo de Investigación GIS, surgió la motivación para llevar a cabo una investigación que origina este libro, cuyo objetivo es mostrar los conceptos básicos y los supuestos que subyacen a un filtro de Kalman en un contexto breve, compacto e ilustrativo. Al mismo tiempo, este libro expone el desarrollo metodológico de la investigación que permite utilizar estos filtros de manera práctica.

Es así que el desarrollo de este libro establece un precedente en la investigación de técnicas de procesamiento de señales digitales, ya que reúne los elementos teóricos fundamentales para la construcción y el diseño de filtros adaptativos basados en el filtro de Kalman. Además, este libro evidencia el proceso de una aplicación teórica directamente en el estudio de caso: el tratamiento y la mejora de las señales biomecánicas producidas por el cuerpo humano.

Desde el punto de vista biomecánico, este libro presenta un desarrollo en el que se establece que la implementación de filtros eficientes proporciona mejores resultados en la generación de la información recopilada, lo que minimiza los factores que dificultan el uso adecuado de los datos. Esta mejora permite un mejor uso de las señales provenientes de las Unidades de Procesamiento de Movimiento (MPU, por sus siglas en inglés) y, por lo tanto, abre la posibilidad

del uso masivo de filtros caso de estudio.

La aplicación de estos filtros se puede incluir diversos tipos de dispositivos biomédicos, lo que beneficia a los especialistas de salud al contar con información precisa, a los usuarios en general al conocer con precisión la información recopilada y, finalmente, a cualquiera que necesite información biomédica o biomecánica con una reducción del componente de ruido y errores.

Desde el punto de vista de la ingeniería, el diseño e implementación de filtros digitales abre una amplia gama de líneas de desarrollo donde el primer beneficio directo es la posibilidad de crear sistemas de recopilación de información más eficientes que permitan un rápido avance de la tecnología en la captura de datos. De la misma manera, se genera una profundización en el procesamiento digital de señales y en el desarrollo de mejores algoritmos que hagan más eficiente la implementación de los filtros en diversas plataformas tecnológicas.

Este libro realiza una exploración base en el filtrado por medio de estimadores no lineales, lo cual permite el futuro desarrollo de otras investigaciones destinadas a determinar la calidad de la información, las mejoras en la transmisión de datos, la implementación eficiente de algoritmos en sistemas integrados y el procesamiento adecuado de datos digitales. Se pretende que, a través de la implementación de técnicas basadas en el filtro de Kalman, se realicen procesos de fusión de datos y estimaciones temporales, invitando al lector a investigar la aplicación de estimadores lineales y no lineales para diferentes procesos en los que existen problemas con características similares al estudio de caso propuesto.

# Contenido

|  |            |
|--|------------|
| INTRODUCCIÓN.....  | 13         |
| <b>1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....</b>                   | <b>17</b>  |
| 1.1 Conceptos Matemáticos.....   | 18         |
| 1.2 Estimación.....  | 28         |
| 1.3 Señales.....   | 32         |
| 1.4 Sensores.....  | 40         |
| 1.5 Complejidad Computacional.....   | 58         |
| <b>2. DESCRIPCIÓN ANALÍTICA Y APLICADA DEL FILTRO DE KALMAN.....</b>   | <b>63</b>  |
| 2.1 Modelo del Filtro de Kalman.....   | 64         |
| 2.2 Variantes del filtro de Kalman.....  | 71         |
| 2.3 Filtro de Kalman Extendido.....  | 73         |
| 2.4 Filtro de Kalman <i>Unscented</i> .....  | 79         |
| 2.5 Fusión de Datos.....   | 88         |
| <b>3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE ESTIMADORES NO LINEALES BASADOS EN EL FILTRO DE KALMAN.....</b> | <b>91</b>  |
| 3.1 Tipo de Investigación.....   | 91         |
| 3.2 Método.....  | 92         |
| 3.3 Criterios de Validez y Confiabilidad.....  | 96         |
| 3.4 Variables e Indicadores.....   | 96         |
| 3.5 Protocolos de Prueba.....  | 98         |
| <b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>  | <b>101</b> |
| 4.1 Escenario Basado en una Pluralidad de Sensores.....  | 101        |
| 4.2 Escenario de Referencia para la Comparación de los Filtros.....  | 105        |
| 4.3 Análisis de las muestras recolectadas.....   | 108        |
| 4.4 Simulación y análisis de la actividad biomecánica.....   | 111        |
| 4.5 Captura y Análisis de Datos Biomecánicos Reales.....   | 130        |
| 4.6 Análisis de Complejidad Computacional de los Algoritmos Filtro de Kalman <i>Unscented</i> y Extendido.....         | 134        |
| <b>5. CONCLUSIÓN.....</b>  | <b>141</b> |
| REFERENCIAS.....   | 143        |

## Lista de Siglas

|                  |   |
|------------------|---|
| ADC              | Conversor Analógico-Digital                             |
| DAC              | Conversor Digital-Analógico                             |
| DMP              | Procesador Digital de Movimiento                        |
| DOF              | Grado de Libertad                                       |
| DPS              | Grados por Segundo                                      |
| DSP              | Procesador Digital de Señales                           |
| EKF              | Filtro de Kalman Extendido                              |
| FIFO             | Primera Entrada, Primera Salida                         |
| FPGA             | Arreglo de Compuertas Programables en Campo             |
| GLONASS          | Sistema Global de Navegación por Satélite               |
| GPS              | Sistema de Posicionamiento Global                       |
| IMU              | Unidad de Medición Inercial                             |
| I <sup>2</sup> C | <i>Inter-Integrated Circuit</i>                         |
| INS              | Sistema de Navegación Inercial                          |
| KF               | Filtro de Kalman  |
| LDC              | Número de líneas de código                              |
| LQE              | Estimador Lineal Cuadrático                             |
| LQR              | Regulador Lineal Cuadrático                             |
| LSB              | Bit Menos Significativo                                 |
| MEMS             | Sistemas Microelectromecánicos                          |
| MPC              | Métodos por Clase                                       |
| MPCP             | Promedio de todos los Métodos por Clase                 |
| MPU              | Unidad de Procesamiento de Movimiento                   |
| MSD              | Desviación de Media Cuadrática                          |
| MSE              | Error de Media Cuadrática                               |
| MSR              | Raíz Cuadrada Matricial                                 |
| NASA             | Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio |
| NDC              | Número de Clases  |
| NDD              | Número de Declaraciones                                 |
| NDF              | Número de funciones de cada clase                       |
| NDS              | Número de Saltos/Llamados                               |
| PDR              | Porcentaje de Declaraciones por Rama                    |
| PLCC             | Porcentaje de Líneas de Código Comentadas               |
| PMB              | Profundidad máxima por bloque                           |
| PnP              | <i>Plug and Play</i>                                    |
| PPB              | Profundidad promedio por bloque                         |

|      |   |
|------|---|
| PSD  | Densidad Espectral de Potencia                      |
| RMS  | Raíz Media Cuadrática                               |
| RMSD | Raíz Cuadrada de la Desviación Cuadrática Media     |
| RMSE | Raíz Cuadrada del Error Cuadrático Medio            |
| SiP  | Sistema en Paquete ( <i>System on Packet</i> )      |
| SoC  | Sistema en Chip ( <i>System on Chip</i> )           |
| SUKF | Filtro de Kalman Escalado <i>Unscented</i>          |
| UKF  | Filtro de Kalman <i>Unscented</i>                   |
| USB  | Bus Serie Universal ( <i>Universal Serial Bus</i> ) |
| VDC  | Valor de Complejidad                                |
| VDCM | Valor de Complejidad Máximo                         |

## Lista de Símbolos

|                |   |
|----------------|---|
| $[a \times]$   | Matriz del producto vectorial de un vector: $a \times b = [a \times] b$               |
| $\backslash n$ | Matriz identidad de tamaño $n$  |
| $\sim$         | Expresión de rango  |
| $\times$       | Producto cruz   |
| $\sim$         | Aproximadamente   |
| $\bullet$      | Multiplicación de cuaterniones  |
| $A$            | Amplitud  |
| $F_s$          | Frecuencia de muestreo [Hz]   |
| $g$            | Valor de la aceleración de la gravedad en la Tierra ( $\sim 9,81 \text{ ms}^{-2}$ )   |
| $q$            | Desviación estándar en el proceso   |
| $Q_k$          | Matriz de covarianza de ruido del proceso, o matriz de multiplicación de cuaterniones |
| $R$            | Desviación estándar en la medida  |
| $R_k$          | matriz de covarianza de ruido de medición de salida, o matriz de rotación             |
| $T_c$          | Tiempo de captura [s]   |
| $T_s$          | Período de muestreo [s]   |
| $\bar{x}$      | Promedio o media aritmética   |
| $\bar{x}_q$    | Desviación estándar promedio en el proceso  |
| $\bar{x}_{qe}$ | Desviación estándar promedio en el proceso para el EKF                                |
| $\bar{x}_{qu}$ | Desviación estándar promedio en el proceso para el UKF                                |
| $\bar{x}_r$    | Desviación estándar promedio en la medida   |
| $\bar{x}_{re}$ | Desviación estándar promedio en la medida para el EKF                                 |
| $\bar{x}_{ru}$ | Desviación estándar promedio en la medida para el UKF                                 |
| $\varphi_m$    | Inclinación magnética local del campo magnético de la Tierra                          |

## Lista de Tablas

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| Tabla 1.  | Características principales de la MPU Invensense MPU-9150.....   | 56  |
| Tabla 2.  | Resumen de especificaciones del servomotor TowerPro SG-90.....   | 107 |
| Tabla 3.  | RMSE obtenido con diferentes valores para la desviación estándar en la medida (r) y el proceso (q) a una velocidad angular de 1 rad/s.....             | 112 |
| Tabla 4.  | RMSE obtenido con diferentes valores para la desviación estándar en la medida (r) y el proceso (q) a una velocidad angular de 5 rad/s.....             | 112 |
| Tabla 5.  | RMSE obtenido con diferentes valores para la desviación estándar en la medida (r) y el proceso (q) a una velocidad angular de 10 rad/s.....            | 113 |
| Tabla 6.  | RMSE obtenido con diferentes valores para la desviación estándar en la medida (r) y el proceso (q) a una velocidad angular de 15 rad/s.....            | 113 |
| Tabla 7.  | Parámetros de desviación estándar óptimos para cada velocidad angular específica.....  | 115 |
| Tabla 8.  | Parámetros de desviación estándar promediados.....   | 119 |
| Tabla 9.  | RMSE obtenido con diferentes valores de velocidad angular usando la desviación estándar específicas para cada velocidad en la medida y el proceso..... | 120 |
| Tabla 10. | RMSE obtenido con diferentes valores de velocidad angular usando la desviación estándar promediados en la medida y el proceso...                       | 121 |
| Tabla 11. | Diferencia del RMSE promedio entre ambos escenarios del protocolo 3...   | 123 |
| Tabla 12. | Valor del RMSE obtenido en 1 y 15 rad/s con distintos tiempos de captura.....  | 125 |
| Tabla 13. | Valores estimados para el movimiento biomecánico.....  | 130 |
| Tabla 14. | Valores de máxima flexión y extensión de los datos biomecánicos capturados.....  | 131 |
| Tabla 15. | Diferencia entre los valores máximos y mínimos de las señales biomecánicas versus los valores estimados.....   | 132 |
| Tabla 16. | Parámetros de complejidad computacional medidos en el EKF.....   | 134 |
| Tabla 17. | Parámetros de complejidad computacional medidos en el UKF.....   | 137 |
| Tabla 18. | Parámetros de complejidad computacional conjunta.....  | 139 |

## Lista de Figuras

|            |   |     |
|------------|---|-----|
| Figura 1.  | Movimiento de Flexión y Extensión visto desde un plano parasagital.....   | 38  |
| Figura 2.  | Movimiento de Pronación y Supinación visto desde un plano frontal.....  | 39  |
| Figura 3.  | Movimiento de Abducción y Aducción visto desde un plano coronal.....  | 40  |
| Figura 4.  | Clasificación de las tecnologías para captura de movimiento en biomecánica y otras aplicaciones.....                    | 42  |
| Figura 5.  | Vista de un sistema MEMS microscópicamente.....   | 44  |
| Figura 6.  | Representación de un acelerómetro mecánico.....   | 45  |
| Figura 7.  | Representación de un acelerómetro basado en MEMS.....   | 45  |
| Figura 8.  | Representación de la medida de un giroscopio.....   | 48  |
| Figura 9.  | Representación de un giroscopio de estructura vibrante de dos ejes fabricado por Bosch Corporation.....                 | 49  |
| Figura 10. | Magnetómetro basado en el principio de la fuerza de Lorentz construido con tecnología MEMS.....                         | 52  |
| Figura 11. | Ejes principales de una aeronave.....   | 54  |
| Figura 12. | Ejes principales de una aeronave detectados por una MPU.....  | 55  |
| Figura 13. | Tarjeta de desarrollo para MPU-9150.....  | 57  |
| Figura 14. | Etapas de ejecución del filtro de Kalman.....   | 71  |
| Figura 15. | Variantes del filtro de Kalman.....   | 72  |
| Figura 16. | Etapas de ejecución del filtro de Kalman Extendido.....   | 78  |
| Figura 17. | Etapas de ejecución del filtro de Kalman Unscented.....   | 88  |
| Figura 18. | Distribución de las MPU ubicadas en las extremidades superiores....   | 102 |
| Figura 19. | Interconexión de las MPU.....   | 103 |
| Figura 20. | Sistema de captura de movimiento y procesamiento de señales...104   |     |
| Figura 21. | Plataforma para la experimentación y simulación del movimiento de flexión y extensión....                               | 106 |
| Figura 22. | Diferentes vistas de la plataforma y sus movimientos.....   | 107 |
| Figura 23. | Ejemplo de la información de resumen que el programa de análisis brinda.....  | 111 |
| Figura 24. | Valor del RMSE obtenido con los parámetros de desviación estándar óptimos para cada velocidad angular. Protocolo 1..... | 115 |
| Figura 25. | Visualización de la forma de onda a velocidad angular de 1 rad/s. Protocolo 1.....                                      | 117 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 26. Visualización de la forma de onda a velocidad angular de 10 rad/s. Protocolo 1.....   | 118 |
| Figura 27. RMSE obtenido con diferentes valores de velocidad angular usando la desviación estándar específica para cada velocidad en la medida y el proceso.....           | 120 |
| Figura 28. RMSE obtenido con diferentes valores de velocidad angular usando la desviación estándar promediados en la medida y el proceso.....                              | 122 |
| Figura 29. Visualización de la forma de onda a velocidad angular de 15 rad/s. Protocolo 3 Escenario 2.....   | 124 |
| Figura 30. Valor del RMSE obtenido a diferentes tiempos de captura de las señales a velocidad angular de 15 rad/s.....   | 125 |
| Figura 31. Visualización de la forma de onda a velocidad angular de 1 rad/s y tiempo de captura 3600 s.....  | 126 |
| Figura 32. Detalle de la forma de onda al iniciar la captura, velocidad angular de 1 rad/s y tiempo de captura 3600 s.....   | 127 |
| Figura 33. Detalle de la forma de onda al finalizar la captura, velocidad angular de 1 rad/s y tiempo de captura 3600 s.....   | 128 |
| Figura 34. Visualización de la forma de onda a velocidad angular de 15 rad/s y tiempo de captura 3600 s.....   | 128 |
| Figura 35. Detalle de la forma de onda al iniciar la captura, velocidad angular de 15 rad/s y tiempo de captura 3600 s.....  | 129 |
| Figura 36. Detalle de la forma de onda al finalizar la captura, velocidad angular de 15 rad/s y tiempo de captura 3600 s.....  | 129 |
| Figura 37. Forma de onda al capturar movimiento biomecánico de miembro superior (articulación del codo), velocidad angular aprox. de 6 rad/s y tiempo de captura 10 s..... | 133 |
| Figura 38. Comparación de la forma de onda filtrada frente a la señal estimada, velocidad angular aprox. de 6 rad/s y tiempo de captura 10 s.....                          | 133 |
| Figura 39. Balance computacional del código del filtro de Kalman Extendido.....  | 136 |
| Figura 40. Balance computacional del filtro de Kalman Unscented.....   | 138 |
| Figura 41. Balance computacional de los Filtros de Kalman.....   | 139 |

# Introducción

Hoy en día, el análisis de las señales mecánicas físicas producidas por el cuerpo humano en diversas actividades motrices y cinemáticas son recolectadas por elementos electrónicos, como es el caso de las unidades de medición inercial y las unidades de procesamiento de movimiento. La incursión de los dispositivos electrónicos en este campo hace posible el uso de elementos especializados, cada vez más asequibles para el público en general, en el tratamiento de enfermedades, activación y manipulación de elementos, entre otros usos. El amplio campo de aplicación de los elementos electrónicos está estrechamente relacionado con el tipo de tratamiento dada a las señales, ya que este proceso convierte los datos en información.

En el caso particular de los métodos para la recolección de las señales biomecánicas, se puede afirmar que las Unidades de Medición Inercial (IMU por sus siglas en inglés, *Inertial Measurement Unit*) y las Unidades Procesadoras de Movimiento (MPU por sus siglas en inglés, *Motion Processing Unit*) juegan un papel importante desde el aumento en el desarrollo de los sistemas Microelectromecánicos (MEMS). El uso de estos dispositivos también ha revolucionado otras áreas, como la incorporación de estos sistemas a la electrónica de consumo en el caso de teléfonos móviles, la estabilización de video en cámaras electrónicas, sistemas de navegación computarizados, sistemas de seguridad, entre otros.

Šprdlík [1], en su trabajo sobre sistemas microelectromecánicos MEMS y otras tecnologías, denota que el campo en el que MEMS ha adquirido mayor importancia es en la medicina y ciencias de la salud. Las características más deseables de la tecnología microelectromecánica en este campo de estudio radican en la portabilidad dada por su tamaño reducido, peso ligero y características eléctricas eficientes, donde el bajo consumo de energía, así como la interoperabilidad con varias plataformas es un tema de vital importancia.

Šprdlík añade: “Las IMU pueden complementar o sustituir a otras formas de medición o evaluación para el diagnóstico clínico como de análisis de movimiento basado en video y la evaluación por medio de la observación visual” [1], y esto se debe a que la confiabilidad, precisión y bajo costo en comparación con otros sistemas de captura, hacen de los MEMS una alternativa viable a los desarrollos tecnológicos futuros.

Así como existen tipos de datos o información de diversos orígenes, hay señales que contienen datos de cualquier tipo que va de acuerdo con la aplicación o área de trabajo, en donde se encuentran las señales biomecánicas que se generan a partir de tecnologías como las IMU o MPU basados en MEMS. Este último tipo de señales contienen información acerca de la mecánica de un ser vivo, tratándose en este caso de información biomecánica recolectada directamente del cuerpo humano.

El uso de señales biomecánicas generalmente implica el uso de técnicas de procesamiento de datos, ya que el uso de señales provenientes directamente del proceso de recolección es una mala práctica al eludir el pre-acondicionamiento y procesamiento de la señal. Por este motivo, es necesario someter las señales muestreadas a una transformación o procesamiento específico que proporcione mayor relevancia y confiabilidad de la información según el tipo de aplicación y uso de las mismas.

Cuando se habla de procesamiento de señales, bien sea de forma analógica o digital, se habla de una serie de procedimientos que antecede el análisis y la utilización de las señales, en donde los procesos de transformación se llevan a cabo sometiendo los datos a procesos lógicos, aritméticos y matemáticos realizados directamente por medio de la electrónica, bien sea por computador o mediante dispositivos embebidos. Entre los objetivos más importantes del procesamiento de señales se encuentran las tareas de filtrar, separar, reunir, seleccionar, acondicionar, detectar, clasificar o mejorar la información contenida.

Específicamente hablando de los procesos de filtrado, la eliminación de las perturbaciones que entorpecen el procesamiento de una señal biomecánica supone un desafío en el cual múltiples investigadores, académicos e ingenieros han tratado de resolver mediante diferentes técnicas, encontrando que la mayoría de desarrollos se basan en la electrónica digital y el procesamiento

digital de señales. En el caso particular presentado en este libro, el procesamiento de datos se centrará en el proceso de filtrado, ya que se discriminan rangos de datos definidos en función de las características de la señal y se realizan cambios en la amplitud o fase de la señal procesada.

Dentro de los filtros más destacados para un procesamiento adecuado de señales que involucran movimiento se encuentra el filtro de Kalman. En concreto, el filtro de Kalman es un filtro digital que puede realizarse por medio de un proceso matemático –o algoritmo– dentro de un procesador, y está destinado a la eliminación de ruido blanco por medio de la estimación de estados futuros en un sistema lineal.

Los usos de este filtro son variados, siendo especialmente destacados en el procesamiento de datos georreferenciados (como el caso de los receptores GPS y triangulación satelital), seguimiento de objetos en movimiento, reconocimiento facial y otras aplicaciones de características ópticas, acústicas y de eliminación de interferencias o ruido.

Este libro está estructurado en seis capítulos, en donde se presenta de forma inicial la fundamentación teórica que recae en el uso de conceptos matemáticos, físicos y estadísticos necesarios para desarrollar la temática de investigación, los cuales son expuestos a lo largo del primer capítulo. El capítulo segundo está dedicado plenamente a exponer las características básicas del Filtro de Kalman, pasando por la mención de algunas variantes y el desarrollo teórico del Filtro de Kalman Extendido y Filtro de Kalman *Unscented*. El capítulo tercero expone la metodología planteada para el desarrollo de la investigación; en el capítulo cuarto se registra los resultados de la investigación desarrollada, pasando por la evidencia y discusión de la misma. Finalmente se da paso al capítulo quinto y sexto, en los que se expone las conclusiones y trabajos futuros de esta investigación, respectivamente.

