

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

Gijón · Palacio de Congresos · 6, 7 y 8 de Septiembre de 2017



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
Comité Español
de Automática

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo
Campus de Humanidades. Edificio de Servicios. 33011 Oviedo (Asturias)
Tel. 985 10 95 03 Fax 985 10 95 07
[http: www.uniovi.es/publicaciones](http://www.uniovi.es/publicaciones)
servipub@uniovi.es

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

Todos los derechos reservados. De conformidad con lo dispuesto en la legislación vigente, podrán ser castigados con penas de multa y privación de libertad quienes reproduzcan o plagien, en todo o en parte, una obra literaria, artística o científica, fijada en cualquier tipo y soporte, sin la preceptiva autorización.

Prefacio

Las *Jornadas de Automática* se celebran desde hace **40 años** en una universidad nacional facilitando el encuentro entre expertos en esta área en un foro que permite la puesta en común de las nuevas ideas y proyectos en desarrollo. Al mismo tiempo, propician la siempre necesaria colaboración entre investigadores del ámbito de la Ingeniería de Control y Automática, así como de campos afines, a la hora de abordar complejos proyectos de investigación multidisciplinares.

En esta ocasión, las Jornadas estarán organizadas por la Universidad de Oviedo y se han celebrado del 6 al 8 de septiembre de 2017 en el Palacio de Congresos de Gijón, colaborando tanto la Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón (EPI) como el Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica de Computadores y de Sistemas del que depende el Área de Ingeniería de Sistemas y Automática.

Además de las habituales actividades científicas y culturales, esta edición es muy especial al celebrarse el **50 aniversario de la creación de CEA**, Comité Español de Automática. Igualmente este año se conmemora el 60 aniversario de la Federación Internacional del Control Automático de la que depende CEA. Así se ha llevado a cabo la presentación del libro que se ha realizado bajo la coordinación de D. Sebastián Dormido, sobre la historia de la Automática en España en una sesión en la que han participado todos los ex-presidentes de CEA conjuntamente con el actual, D. Joseba Quevedo.

Igualmente hemos contado con la presencia de conferenciantes de prestigio para las sesiones plenarias, comunicaciones y ponencias orales en las reuniones de los 9 grupos temáticos, contribuciones en formato póster. Se ha celebrado también el concurso de CEABOT, así como una nueva Competición de Drones, con el ánimo de involucrar a más estudiantes de últimos cursos de Grado/Máster.

En el marco de las actividades culturales programadas se ha podido efectuar un recorrido en el casco antiguo situado en torno al Cerro de Santa Catalina y visitar la Laboral.

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

Antonio Agudo	Institut de Robòtica i Informàtica Industrial
Rosa M Aguilar	University of La Laguna.
Luciano Alonso	University of Cantabria
Ignacio Álvarez García	Universidad de Oviedo
Antonio Javier Artuñedo García	Centre for Automation and Robotics (CSIC-UPM)
José M. Azorín	Miguel Hernandez University of Elche
Pedro Balaguer	Universitat Jaume I
Antonio Javier Barragán Piña	Universidad de Huelva
Alfonso Baños	Universidad de Murcia
Guillermo Bejarano	University of Seville
Gerardo Beruvides	Centro de Automática y Robótica
Carlos Bordons	University of Seville
Jose Manuel Bravo	University of Huelva
Jose Luis Calvo-Rolle	University of A Coruña
Fernando Castaño Romero	Centro de Automática y Robótica (UPM -CSIC)
José Luis Casteleiro-Roca	University of Coruña
Alvaro Castro-Gonzalez	Universidad Carlos III de Madrid
Ramon Costa-Castelló	Universitat Politècnica de Catalunya
Abel A. Cuadrado	University of Oviedo
Arturo De La Escalera	Universidad Carlos III de Madrid
Emma Delgado	Universidad de Vigo
Jose-Luis Diez	Universitat Politecnica de Valencia
Manuel Domínguez	Universidad de León
Juan Manuel Escaño	Universidad de Sevilla
Mario Francisco	University of Salamanca
Maria Jesus Fuente	Universidad de Valladolid
Juan Garrido	Universtiy of Cordoba
Antonio Giménez	Universidad de Almeria
Evelio Gonzalez	Universidad de La Laguna
José-Luis Guzmán	Universidad de Almería
Rodolfo Haber	Center for Automation and Robotics (UPM-CSIC)
César Ernesto Hernández	Universidad de Almería
Eloy Irigoyen	UPV/EHU
Agustin Jimenez	Universidad PolitÁcnica de Madrid
Emilio Jiménez	University of La Rioja
Jesus Lozano	Universidad de Extremadura
Jorge Luis Madrid	Centro de Automática y Robótica
Luis Magdalena	Universidad Politécnica de Madrid
David Martin Gomez	Universidad Carlos III de Madrid
Fernando Matia	Universidad Politecnica de Madrid
Joaquim Melendez	Universitat de Girona
Juan Mendez	Universidad de La Laguna
Luis Moreno	Universidad Carlos III de Madrid
María Dolores Moreno Rabel	Universidad de Extremadura
David Muñoz	Universidad de Sevilla
Antonio José Muñoz-Ramirez	Universidad de Málaga
Jose Luis Navarro	Universidad Politecnica de Valencia
Manuel G. Ortega	University of Seville
Andrzej Pawlowski	UNED
Mercedes Perez de La Parte	University of La Rioja
Ignacio Peñarrocha	Universitat Jaume I de Castelló, Spain
José Luis Pitarch	Universidad de Valladolid

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
MiguelÁngel Ridao	Universidad de Sevilla
Gregorio Sainz-Palmero	Universidad de Valladolid
Antonio Sala	Universitat Politecnica de Valencia
Ester Sales-Setién	Universitat Jaume I
Jose Sanchez	UNED
Javier Sanchis Saez	Universitat Politecnica de Valencia (UPV)
José Pedro Santos	ITEFI-CSIC
Matilde Santos	Universidad Complutense de Madrid
Alvaro Serna	University of Valladolid
José Enrique Simó	Universidad Politécnica de Valencia
José A. Somolinos	ETS I Navales. Universidad Politecnica de Madrid
Fernando Tadeo	Univ. of Valladolid
Alejandro Tapia	Universidad de Loyola Andalucía
David Tena	Universitat Jaume I
Jesús Torres	Universidad de La Laguna
Pedro M. Vallejo	Universidad de Salamanca
Guilherme Vianna	Universidad de Sevilla
Alejandro Vignoni	AI2 - UPV
Ramón Vilanova	UAB
Francisco Vázquez	Universidad de Cordoba
Jesús M. Zamarreño	University of Valladolid

Revisores Adicionales

Al-Kaff, Abdulla

Balbastre, Patricia
Beltrán de La Cita, Jorge
Bermudez-Cameo, Jesus
Blanco-Claraco, Jose-Luis
Blanes, Francisco
Bonin-Font, Francisco

Cancela, Brais

Ferraz, Luis

Garita, Cesar
Gimenez, Antonio
Gruber, Patrick
Guindel, Carlos

Hernandez Ruiz, Alejandro
Hernandez, Daniel

Jardón Huete, Alberto

López, Amable

Marin, Raul
Marín Plaza, Pablo
Mañanas, Miguel Angel
Morales, Rafael
Moreno, Francisco-Angel

Nuñez, Luis Ramón

Ponz Vila, Aurelio
Posadas-Yague, Juan-Luis
Poza-Luján, Jose-Luis
Pumarola, Albert

Raya, Rafael
Revestido Herrero, Elías
Rocon, Eduardo
Ruiz Sarmiento, José Raúl
Ruiz, Adria

Torres, Jose Luis

Vaquero, Victor

Table of Contents

Ingeniería de Control	
<hr/>	
TÚNEL DE AGUA PARA PRUEBAS Y CARACTERIZACIÓN DE DISEÑOS EXPERIMENTALES DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	1
<i>Eduardo Alvarez, Manuel Rico-Secades, Antonio Javier Calleja Rodríguez, Joaquín Fernández Francos, Aitor Fernández Jiménez, Mario Alvarez Fernández and Samuel Camba Fernández</i>	
Reduction of population variability in protein expression: A control engineering approach.	8
<i>Yadira Boada, Alejandro Vignoni and Jesús Picó</i>	
CONTROL ROBUSTO DEL PH EN FOTOBIORREACTORES MEDIANTE RECHAZO ACTIVO DE PERTURBACIONES	16
<i>José Carreño, Jose Luis Guzman, José Carlos Moreno and Rodolfo Villamizar</i>	
Control reset para maniobra de cambio de carril y validación con CarSim	23
<i>Miguel Cerdeira, Pablo Falcón, Antonio Barreiro, Emma Delgado and Miguel Díaz-Cacho</i>	
Maniobra de aterrizaje automática de una Cessna 172P modelada en FlightGear y controlada desde un programa en C	31
<i>Mario de La Rosa, Antonio Javier Gallego and Eduardo Fernández</i>	
Alternativas para el control de la red eléctrica aislada en parques eólicos marinos	38
<i>Carlos Díaz-Sanahuja, Ignacio Peñarrocha, Ricardo Vidal-Albalade and Ester Sales-Setién</i>	
CONTROL PREDICTIVO DISTRIBUIDO UTILIZANDO MODELOS DIFUSOS PARA LA NEGOCIACIÓN ENTRE AGENTES	46
<i>Lucía Fargallo, Silvana Roxani Revollar Chavez, Mario Francisco, Pastora Vega and Antonio Cembellín</i>	
Control Predictivo en el espacio de estados de un captador solar tipo Fresnel	54
<i>Antonio Javier Gallego, Mario de La Rosa and Eduardo Fernández</i>	
Control predictivo para la operación eficiente de una planta formada por un sistema de desalación solar y un invernadero	62
<i>Juan Diego Gil Vergel, Lidia Roca, Manuel Berenguel, Alba Ruiz Aguirre, Guillermo Zaragoza and Antonio Giménez</i>	
Depuración de Aguas Residuales en la Industria 4.0	70
<i>Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Ana María Jiménez Arévalo, Laura Eiroa Mateo and Fco. Javier Fernández-De-Cañete-Rodríguez</i>	
Control robusto con QFT del pH en un fotobioreactor raceway	77
<i>Ángeles Hoyo Sánchez, Jose Luis Guzman, Jose Carlos Moreno and Manuel Berenguel</i>	
Revisión sistemática de la literatura en ingeniería de sistemas. Caso práctico: técnicas de estimación distribuida de sistemas ciberfísicos	84
<i>Carmelina Ierardi, Luis Orihuela Espina, Isabel Jurado Flores, Álvaro Rodríguez Del Nozal and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Desarrollo de un Controlador Predictivo para Autómatas programables basado en la normativa IEC 61131-3	92
<i>Pablo Krupa, Daniel Limon and Teodoro Alamo</i>	
Diseño de un emulador de aerogenerador de velocidad variable DFIG y control de pitch ...	100
<i>Manuel Lara Ortiz, Juan Garrido Jurado and Francisco Vázquez Serrano</i>	

Observación de la fracción de agua líquida en pilas de combustible tipo PEM de cátodo abierto.....	108
<i>Julio Luna and Ramon Costa-Castelló</i>	
Control Predictivo Basado en Datos.....	115
<i>José María Manzano, Daniel Limón, Teodoro Álamo and Jan Peter Calliess</i>	
Control MPC basado en un modelo LTV para seguimiento de trayectoria con estabilidad garantizada.....	122
<i>Sara Mata, Asier Zubizarreta, Ione Nieva, Itziar Cabanes and Charles Pinto</i>	
Implementación y evaluación de controladores basados en eventos en la norma IEC-61499.	130
<i>Oscar Miguel-Escrig, Julio-Ariel Romero-Pérez and Esteban Querol-Dolz</i>	
AUTOMATIZACIÓN Y MONITORIZACIÓN DE UNA INSTALACIÓN DE ENSAYO DE MOTORES.....	138
<i>Alfonso Poncela Méndez, Miguel Ochoa Vega, Eduardo J. Moya de La Torre and F. Javier García Ruíz</i>	
OPTIMIZACIÓN Y CONTROL EN CASCADA DE TEMPERATURA DE RECINTO MEDIANTE SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN.....	146
<i>David Rodríguez, José Enrique Alonso Alfaya, Guillermo Bejarano Pellicer and Manuel G. Ortega</i>	
Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado.....	154
<i>Álvaro Rodríguez Del Nozal, Luis Orihuela, Pablo Millán Gata, Carmelina Ierardi and Alejandro Tapia Córdoba</i>	
Estimación de fugas en un sistema industrial real mediante modelado por señales aditivas.	160
<i>Ester Sales-Setién, Ignacio Peñarrocha and David Tena</i>	
Advanced control based on MPC ideas for offshore hydrogen production.....	167
<i>Alvaro Serna, Fernando Tadeo and Julio. E Normey-Rico</i>	
Transfer function parameters estimation by symmetric send-on-delta sampling.....	174
<i>José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido and Antonio Visioli</i>	
An Estimation Approach for Process Control based on Asymmetric Oscillations.....	181
<i>José Sánchez, María Guinaldo Losada, Sebastian Dormido, José Luis Fernández Marrón and Antonio Visioli</i>	
Robust PI controller for disturbance attenuation and its application for voltage regulation in islanded microgrid.....	189
<i>Ramon Vilanova, Carles Pedret and Orlando Arrieta</i>	
Infraestructura para explotación de datos de un simulador azucarero.....	197
<i>Jesús M. Zamarreño, Cristian Pablos, Alejandro Merino, L. Felipe Acebes and De Prada César</i>	
<hr/> Automar <hr/>	
INFRAESTRUCTURA PARA ESTUDIAR ADAPTABILIDAD Y TRANSPARENCIA EN EL CENTRO DE CONTROL VERSÁTIL.....	203
<i>Juan Antonio Bonache Seco, José Antonio Lopez Orozco, Eva Besada Portas and Jesús Manuel de La Cruz</i>	
ARQUITECTURA DE CONTROL HÍBRIDA PARA LA NAVEGACIÓN DE VEHÍCULOS SUBMARINOS NO TRIPULADOS.....	211
<i>Francisco J. Lastra, Jesús A. Trujillo, Francisco J. Velasco and Elías Revestido</i>	

Exploración y Reconstrucción 3D de Fondos Marinos Mediante AUVs y Sensores Acústicos	218
<i>Oscar L. Manrique Garcia, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
AUTOMATIZACIÓN DE MANIOBRAS PARA UN TEC DE 2GdL	226
<i>Marina Pérez de La Portilla, José Andrés Somolinos Sánchez, Amable López Piñeiro, Rafael Morales Herrera and Eva Segura</i>	
MERBOTS PROJECT: OVERALL DESCRIPTION, MULTISENSORY AUTONOMOUS PERCEPTION AND GRASPING FOR UNDERWATER ROBOTICS INTERVENTIONS	232
<i>Pedro J. Sanz, Raul Marin, Antonio Peñalver, David Fornas and Diego Centelles</i>	
<hr/> Bioingeniería <hr/>	
MARCADORES CUADRADOS Y DEFORMACIÓN DE OBJETOS EN NAVEGACIÓN QUIRÚRGICA CON REALIDAD AUMENTADA	238
<i>Eliana Aguilar, Oscar Andres Vivas and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	
Entrenamiento robótico de la marcha en pacientes con Parálisis Cerebral: definición de objetivos, propuesta de tratamiento e implementación clínica preliminar	244
<i>Cristina Bayón, Teresa Martín-Lorenzo, Beatriz Moral-Saiz, Óscar Ramírez, Álvaro Pérez-Somarriba, Sergio Lerma-Lara, Ignacio Martínez and Eduardo Rocon</i>	
PREDICCIÓN DE ACTIVIDADES DE LA VIDA DIARIA EN ENTORNOS INTELIGENTES PARA PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA	251
<i>Arturo Bertomeu-Motos, Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Luis Daniel Lledó, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Sistema de Visión Estereoscópico para el guiado de un Robot Quirúrgico en Operaciones de Cirugía Laparoscópica HALS.....	256
<i>Carlos Castedo Hernández, Rafael Estop Remacha, Eusebio de La Fuente López and Lidia Santos Del Blanco</i>	
Head movement assessment of cerebral palsy users with severe motor disorders when they control a computer thought eye movements.....	264
<i>Alejandro Clemotte, Miguel A. Velasco and Eduardo Rocon</i>	
Diseño de un sensor óptico de fuerza para exoesqueletos de mano.....	270
<i>Jorge Diez Pomares, Andrea Blanco Ivorra, José María Catalan Orts, Francisco Javier Badesa Clemente, José María Sabater and Nicolas Garcia Aracil</i>	
POSIBILIDADES DEL USO DE TRAMAS ARTIFICIALES DE IMAGEN MOTORA PARA UN BCI BASADO EN EEG	276
<i>Josep Dinarès-Ferran, Christoph Guger and Jordi Solé-Casals</i>	
EFFECTOS SOBRE LA ERD EN TAREAS DE CONTROL DE EXOESQUELETO DE MANO EMPLEANDO BCI.....	282
<i>Santiago Ezquerro, Juan Antonio Barios, Arturo Bertomeu-Motos, Luisa Lorente, Nuria Requena, Irene Delegido, Francisco Javier Badesa and Nicolas Garcia-Aracil</i>	
Formulación Topológica Adaptada para la Simulación y Control de Exoesqueletos Accionados con Transmisiones Harmonic Drive.....	288
<i>Andres Hidalgo Romero and Eduardo Rocon</i>	

Identificación de contracciones isométricas de la extremidad superior en pacientes con lesión medular incompleta mediante características espectrales de la electromiografía de alta densidad (HD-EMG)	296
<i>Mislav Jordanic, Mónica Rojas-Martínez, Joan Francesc Alonso, Carolina Migliorelli and Miguel Ángel Mañanas</i>	
Diseño de una plataforma para analizar el efecto de la estimulación mecánica aferente en el temblor de pacientes con temblor esencial	302
<i>Julio S. Lora, Roberto López, Jesús González de La Aleja and Eduardo Rocon</i>	
DEFINICIÓN DE UN PROTOCOLO PARA LA MEDIDA PRECISA DEL RANGO CERVICAL EMPLEANDO TECNOLOGÍA INERCIAL	308
<i>Álvaro Martín, Rafael Raya, Cristina Sánchez, Rodrigo Garcia-Carmona, Oscar Ramirez and Abraham Otero</i>	
SISTEMA BRAIN-COMPUTER INTEFACE DE NAVEGACIÓN WEB ORIENTADO A PERSONAS CON GRAVE DISCAPACIDAD.....	313
<i>Víctor Martínez-Cagigal, Javier Gómez-Pilar, Daniel Álvarez, Eduardo Santamaría-Vázquez and Roberto Hornero</i>	
ESTRATEGIAS DE NEUROESTIMULACIÓN TRANSCRANEAL POR CORRIENTE DIRECTA PARA MEJORA COGNITIVA	320
<i>Silvia Moreno Serrano, Mario Ortiz and José María Azorín Poveda</i>	
COMPARATIVA DE ALGORITMOS PARA LA DETECCIÓN ONLINE DE IMAGINACIÓN MOTORA DE LA MARCHA BASADO EN SEÑALES DE EEG	328
<i>Marisol Rodríguez-Ugarte, Irma Nayeli Angulo Sherman, Eduardo Iáñez and Jose M. Azorin</i>	
DETECCIÓN, MEDIANTE UN GUANTE SENSORIZADO, DE MOVIMIENTOS SELECCIONADOS EN UN SISTEMA ROBOTIZADO COLABORATIVO PARA HALS	334
<i>Lidia Santos, José Luis González, Eusebio de La Fuente, Juan Carlos Fraile and Javier Pérez Turiel</i>	
BIOSENSORES PARA CONTROL Y SEGUIMIENTO PATOLOGÍAS REUMATOIDES	340
<i>Amparo Tirado, Raúl Marín, José V Martí, Miguel Belmonte and Pedro Sanz</i>	
Assessment of tremor severity in patients with essential tremor using smartwatches	347
<i>Miguel A. Velasco, Roberto López-Blanco, Juan P. Romero, M. Dolores Del Castillo, J. Ignacio Serrano, Julián Benito-León and Eduardo Rocon</i>	
INTERFAZ CEREBRO-ORDENADOR PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS A TRAVÉS DE DOS PARADIGMAS DE NAVEGACIÓN	353
<i>Fernández-Rodríguez Álvaro, Velasco-Álvarez Francisco and Ricardo Ron-Angevin</i>	
<hr/>	
Control Inteligente	
Aprendizaje por Refuerzo para sistemas lineales discretos con dinámica desconocida: Simulación y Aplicación a un Sistema Electromecánico	360
<i>Henry Diaz, Antonio Sala and Leopoldo Armesto</i>	
Diseño de sistemas de control en cascada clásico y borroso para el seguimiento de trayectorias	368
<i>Javier G. Gonzalez, Rodolfo Haber, Fernando Matia and Marcelino Novo</i>	

ANÁLISIS FORMAL DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS NO LINEALES MEDIANTE REDES NEURONALES.....	376
<i>Eloy Irigoyen, Mikel Larrea, A. Javier Barragán, Miguel Ángel Martínez and José Manuel Andújar</i>	
Predicción de la energía renovable proveniente del oleaje en las islas de Fuerteventura y Lanzarote.	384
<i>G.Nicolás Marichal, Deivis Avila, Ángela Hernández, Isidro Padrón and José Ángel Rodríguez</i>	
Aplicación de Redes Neuronales para la Estimación de la Resistencia al Avance en Buques	393
<i>Daniel Marón Blanco and Matilde Santos</i>	
Novel Fuzzy Torque Vectoring Controller for Electric Vehicles with per-wheel Motors.....	401
<i>Alberto Parra, Martín Dendaluze, Asier Zubizarreta and Joshué Pérez</i>	
REPOSTAJE EN TIERRA DE UN AVIÓN MEDIANTE ALGORITMOS GENÉTICOS .	408
<i>Elías Plaza and Matilde Santos</i>	
VISUALIZACIÓN WEB INTERACTIVA PARA EL ANÁLISIS DEL CHATTER EN LAMINACIÓN EN FRÍO.....	416
<i>Daniel Pérez López, Abel Alberto Cuadrado Vega and Ignacio Díaz Blanco</i>	
BANCADA PARA ANÁLISIS INTELIGENTE DE DATOS EN MONITORIZACIÓN DE SALUD ESTRUCTURAL.....	424
<i>Daniel Pérez López, Diego García Pérez, Ignacio Díaz Blanco and Abel Alberto Cuadrado Vega</i>	
CONTROL DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR BASADO EN REDES NEURONALES.....	431
<i>Jesus Enrique Sierra and Matilde Santos</i>	
CONTROL PREDICTIVO FUZZY CON APLICACIÓN A LA DEPURACIÓN BIOLÓGICA DE FANGOS ACTIVADOS.....	437
<i>Pedro M. Vallejo Llamas and Pastora Vega Cruz</i>	
<hr/> Educación en Automática <hr/>	
REFLEXIONES SOBRE EL VALOR DOCENTE DE UNA COMPETICION DE DRONES EN LA EDUCACIÓN PARA EL CONTROL.....	445
<i>Ignacio Díaz Blanco, Alvaro Escanciano Urigüen, Antonio Robles Alvarez and Hilario López García</i>	
Uso del Haptic Paddle con aprendizaje basado en proyectos.....	451
<i>Juan M. Gandarias, Antonio José Muñoz-Ramírez and Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel</i>	
REPRESENTACION INTEGRADA DE ACCIONAMIENTOS MECANICOS Y CONTROL DE EJES ORIENTADA A LA COMUNICACIÓN Y DOCENCIA EN MECATRONICA.....	457
<i>Julio Garrido Campos, David Santos Esterán, Juan Sáez López and José Ignacio Armesto Quiroga</i>	
Construcción y modelado de un prototipo fan & plate para prácticas de control automático	465
<i>Cristina Lampon, Javier Martin, Ramon Costa-Castelló and Muppaneni Lokesh Chowdary</i>	

EDUCACION EN AUTOMATICA E INDUSTRIA 4.0 MEDIANTE LA APLICACIÓN DE TECNOLOGÍAS 3D	471
<i>Jose Ramon Llata, Esther Gonzalez-Sarabia, Carlos Torre-Ferrero and Ramon Sancibrian</i>	
Desarrollo e implementación de un sistema de control en una planta piloto hibrida.....	479
<i>Maria P. Marcos, Cesar de Prada and Jose Luis Pitarch</i>	
LA INFORMÁTICA INDUSTRIAL EN LAS INGENIERÍAS INDUSTRIALES	486
<i>Rogelio Mazaeda, Eusebio de La Fuente López, José Luis González, Eduardo J. Moya de La Torre, Miguel Angel García Blanco, Javier García Ruiz, María Jesús de La Fuente Aparicio, Gregorio Sainz Palmero and Smaranda Cristea</i>	
Ventajas docentes de un flotador magnético para la experimentación de técnicas control ..	495
<i>Eduardo Montijano, Carlos Bernal, Carlos Sagües, Antonio Bono and Jesús Sergio Artal</i>	
PROGRAMACIÓN ATRACTIVA DE PLC	502
<i>Eduardo J. Moya de La Torre, F. Javier García Ruíz, Alfonso Poncela Méndez and Victor Barrio Lángara</i>	
MODERNIZACIÓN DE EQUIPO FEEDBACK MS-150 PARA EL APRENDIZAJE ACTIVO EN INGENIERÍA DE CONTROL	510
<i>Perfecto Reguera Acevedo, Miguel Ángel Prada Medrano, Antonio Morán Álvarez, Juan José Fuertes Martínez, Manuel Domínguez González and Serafín Alonso Castro</i>	
INNOVACIÓN PEDAGÓGICA EN LA FORMACIÓN DEL PERFIL PROFESIONAL PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL A TRAVÉS DE UNA APROXIMACIÓN HOLÍSTICA.	517
<i>Juan Carlos Ríos, Zaneta Babel, Daniel Martínez, José María Paredes, Luis Alonso, Pablo Hernández, Alejandro García, David Álvarez, Jorge Miranda, Constantino Manuel Valdés and Jesús Alonso</i>	
Aprendiendo Simulación de Eventos Discretos con JaamSim	522
<i>Enrique Teruel and Rosario Aragüés</i>	
RED NEURONAL AUTORREGRESIVA NO LINEAL CON ENTRADAS EXÓGENAS PARA LA PREDICCIÓN DEL ELECTROENCEFALOGRAMA FETAL...	528
<i>Rosa M Aguilar, Jesús Torres and Carlos Martín</i>	
ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MATERIA EN REACTORES RACEWAYS.....	534
<i>Marta Barceló, Jose Luis Guzman, Francisco Gabriel Acién, Ismael Martín and Jorge Antonio Sánchez</i>	
MODELADO DINÁMICO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE FRÍO VINCULADO A UN CICLO DE REFRIGERACIÓN	539
<i>Guillermo Bejarano Pellicer, José Joaquín Suffo, Manuel Vargas and Manuel G. Ortega</i>	
Predictor Intervalar basado en hiperplano soporte	547
<i>José Manuel Bravo Caro, Manuel Vasallo Vázquez, Emilian Cojocarú and Teodoro Alamo Cantarero</i>	
Dynamic simulation applied to refinery hydrogen networks	555
<i>Anibal Galan Prado, Cesar De Prada, Gloria Gutierrez, Rafael Gonzalez and Daniel Sarabia</i>	

APROXIMACIÓN DE MODELOS ALGEBRAICOS MEDIANTE ALAMO Y ECOSIMPRO	563
<i>Carlos Gómez Palacín, José Luis Pitarch, Gloria Gutiérrez and Cesar De Prada</i>	
A Causal Model to Analyze Aircraft Collision Avoidance Deadlock Scenarios	569
<i>Miquel Àngel Piera Eroles, Julia de Homdedeu, Maria Del Mar Tous, Thimjo Koca and Marko Radanovic</i>	
ONLINE DECISION SUPPORT FOR AN EVAPORATION NETWORK	575
<i>José Luis Pitarch, Marc Kalliski, Carlos Gómez Palacín, Christian Jasch and Cesar De Prada</i>	
Predicción de la irradiancia a partir de datos de satélite mediante deep learning	582
<i>Javier Pérez, Jorge Segarra-Tamarit, Hector Beltran, Carlos Ariño, José Carlos Alfonso Gil, Aleks Attanasio and Emilio Pérez</i>	
MODELO DINÁMICO ORIENTADO AL TRATAMIENTO Y SEGUIMIENTO DE LA LEUCEMIA MIELOIDE CRÓNICA	589
<i>Gabriel Pérez Rodríguez and Fernando Morilla</i>	
Modelado y optimización de la operación de un sistema de bombeo de múltiples depósitos	596
<i>Roberto Sanchis Llopis and Ignacio Peñarrocha</i>	
DEVELOPMENT OF A GREY MODEL FOR A MEDIUM DENSITY FIBREBOARD DRYER IN ECOSIMPRO	604
<i>Pedro Santos, Jose Luis Pitarch and César de Prada</i>	
DETECCIÓN AUTOMÁTICA DE FALLOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LAS FECHAS DE LIMPIEZA PARA INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS	611
<i>Jorge Segarra-Tamarit, Emilio Pérez, Hector Beltran, Enrique Belenguer and José Luis Gandía</i>	
Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras	618
<i>Alejandro Tapia Córdoba, Pablo Millán Gata, Fabio Gómez-Estern Aguilar, Carmelina Ierardi and Álvaro Rodríguez Del Nozal</i>	
FRAMEWORK PARA EL MODELADO DE UN LAGO DE DATOS	626
<i>J.M Torres, R.M. Aguilar, C.A. Martin and S. Diaz</i>	
SIMULADOR CARDIOVASCULAR PARA ENSAYO DE ROBOTS DE NAVEGACION AUTONOMA	633
<i>José Emilio Traver, Juan Francisco Ortega Morán, Ines Tejado, J. Blas Pagador, Fei Sun, Raquel Pérez-Aloe, Blas M. Vinagre and F. Miguel Sánchez Margallo</i>	
PLANIFICACION DE LA PRODUCCION BASADA EN CONTROL PREDICTIVO PARA PLANTAS TERMOSOLARES	641
<i>Manuel Jesús Vasallo Vázquez, José Manuel Bravo Caro, Emilian Cojocarú and Manuel Emilio Gegundez Arias</i>	
Evaluación multicriterio para la optimización de redes de energía	649
<i>Ascensión Zafra Cabeza, Rafael Espinosa, Miguel Àngel Ridao Carlini and Carlos Bordóns Alba</i>	
Percibiendo el entorno en los robots sociales del RoboticsLab	657
<i>Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya, Àlvaro Castro-Gonzalez, Juan José Gamboa, Marcos Maroto Gómez, Sara Marqués Villaroya, Antonio J. Pérez Vidal and Miguel Àngel Salichs</i>	

DISEÑO DE UNA PRÓTESIS DE MANO ADAPTABLE AL CRECIMIENTO	664
<i>Marta Ayats and Raul Suarez</i>	
COOPERATIVISMO BIOINSPIRADO BASADO EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS HORMIGAS	672
<i>Brayan Bermudez, Kristel Novoa and Miguel Valbuena</i>	
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE UN EXOESQUELETO DE MIEMBRO SUPERIOR PARA SOPORTE DE CARGAS	680
<i>Andrea Blanco Ivorra, Jorge Diez Pomares, David Lopez Perez, Francisco Javier Badesa Clemente, Miguel Ignacio Sanchez and Nicolas Garcia Aracil</i>	
Estructura de control en ROS y modos de marcha basados en máquinas de estados de un robot hexápodo	686
<i>Raúl Cebolla Arroyo, Jorge De Leon Rivas and Antonio Barrientos</i>	
USING AN UAV TO GUIDE THE TELEOPERATION OF A MOBILE MANIPULATOR	694
<i>Josep Arnau Claret and Luis Basañez</i>	
Estudio de los patrones de marcha para un robot hexápodo en tareas de búsqueda y rescate	701
<i>Jorge De León Rivas and Antonio Barrientos</i>	
SISTEMA DE INTERACCIÓN VISUAL PARA UN ROBOT SOCIAL	709
<i>Mario Domínguez López, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo and Samuel Marcos Pablos</i>	
Mejora del Comportamiento Proxémico de un Robot Autónomo mediante Motores de Inteligencia Artificial Desarrollados para Plataformas de Videojuegos	717
<i>David Fernández Chaves, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Micrófonos de contacto: una alternativa para sensado táctil en robots sociales	724
<i>Juan José Gamboa, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo, Marcos Maroto Gómez and Miguel A. Salichs</i>	
Clasificación de información táctil para la detección de personas	732
<i>Juan M. Gandarias, Jesús M. Gómez-De-Gabriel and Alfonso García-Cerezo</i>	
Planificación para interceptación de objetivos: Integración del Método Fast Marching y Risk-RRT	738
<i>David Alfredo Garzon Ramos, Mario Andrei Garzon Oviedo and Antonio Barrientos</i>	
ESTABILIZACIÓN DE UNA BOLA SOBRE UN PLANO UTILIZANDO UN ROBOT PARALELO 6-RSS	746
<i>Daniel González, Lluís Ros and Federico Thomas</i>	
TELEOPERACIÓN DE INSTRUMENTOS QUIRÚRGICOS ARTICULADOS	754
<i>Ana Gómez Delgado, Carlos Perez-Del-Pulgar, Antonio Reina Terol and Victor Muñoz Martinez</i>	
CONTROL OF A ROBOTIC ARM FOR TRANSPORTING OBJECTS BASED ON NEURO-FUZZY LEARNING VISUAL INFORMATION	760
<i>Juan Hernández Vicén, Santiago Martínez de La Casa Díaz and Carlos Balaguer</i>	
PLATAFORMA BASADA EN LA INTEGRACIÓN DE MATLAB Y ROS PARA LA DOCENCIA DE ROBÓTICA DE SERVICIO	766
<i>Carlos G. Juan, Jose Maria Vicente, Alvaro Garcia and Jose Maria Sabater-Navarro</i>	

Estimadores de fuerza y movimiento para el control de un robot de rehabilitación de extremidad superior	772
<i>Aitziber Mancisidor, Asier Zubizarreta, Itziar Cabanes, Pablo Bengoa and Asier Brull</i>	
Definiendo los elementos que constituyen un robot social portable de bajo coste	780
<i>Marcos Maroto Gómez, José Carlos Castillo, Fernando Alonso-Martín, Juan José Gamboa, Sara Marqués Villarroya and Miguel Ángel Salichs</i>	
Interfaces táctiles para Interacción Humano-Robot	787
<i>Sara Marqués Villarroya, Jose Carlos Castillo Montoya, Fernando Alonso Martín, Marcos Maroto Gómez, Juan José Gamboa and Miguel A. Salichs</i>	
HERRAMIENTAS DE ENTRENAMIENTO Y MONITORIZACIÓN PARA EL DESMINADO HUMANITARIO	793
<i>Hector Montes, Roemi Fernandez, Pablo Gonzalez de Santos and Manuel Armada</i>	
Control a Baja Velocidad de una Rueda con Motor de Accionamiento Directo mediante Ingeniería Basada en Modelos	799
<i>Antonio José Muñoz-Ramírez, Jesús Manuel Luque-Bedmar, Jesus Manuel Gomez-De-Gabriel, Anthony Mandow, Javier Serón and Alfonso Garcia-Cerezo</i>	
SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS AUTÓNOMOS USANDO V-REP BAJO ROS	806
<i>Cándido Otero Moreira, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz Dominguez, Joaquín López Fernández, Rafael Barea, Eduardo Romera, Eduardo Molinos, Roberto Arroyo, Luís Miguel Bergasa and Elena López</i>	
Cinemática y prototipado de un manipulador paralelo con centro de rotación remoto para robótica quirúrgica.....	814
<i>Francisco Pastor, Juan M. Gandarias and Jesús M. Gómez-De-Gabriel</i>	
ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE SINGULARIDADES AISLADAS EN ROBOTS PARALELOS MEDIANTE DESARROLLOS DE TAYLOR DE SEGUNDO ORDEN.....	821
<i>Adrián Peidro Vidal, Óscar Reinoso, Arturo Gil, José María Marín and Luis Payá</i>	
INTERFAZ DE CONTROL PARA UN ROBOT MANIPULADOR MEDIANTE REALIDAD VIRTUAL	829
<i>Elena Peña-Tapia, Juan Jesús Roldán, Mario Garzón, Andrés Martín-Barrio and Antonio Barrientos</i>	
Evolución de la robótica social y nuevas tendencias	836
<i>Antonio J. Pérez Vidal, Alvaro Castro-Gonzalez, Fernando Alonso Martín, Jose Carlos Castillo Montoya and Miguel A. Salichs</i>	
DISEÑO MECÁNICO DE UN ASISTENTE ROBÓTICO CAMARÓGRAFO CON APRENDIZAJE COGNITIVO	844
<i>Irene Rivas-Blanco, M Carmen López-Casado, Carlos Pérez-Del-Pulgar, Francisco García-Vacas, Víctor Fernando Muñoz, Enrique Bauzano and Juan Carlos Fraile</i>	
CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES.....	852
<i>Francisco Abiud Rojas-De-Silva and Raul Suarez</i>	
Modelado del Contexto Geométrico para el Reconocimiento de Objetos.....	860
<i>José Raúl Ruiz Sarmiento, Cipriano Galindo and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	
Estimación Probabilística de Áreas de Emisión de Gases con un Robot Móvil Mediante la Integración Temporal de Observaciones de Gas y Viento	868
<i>Carlos Sanchez-Garrido, Javier Monroy and Javier Gonzalez-Jimenez</i>	

MANIPULADOR AÉREO CON BRAZOS ANTROPOMÓRFICOS DE ARTICULACIONES FLEXIBLES	876
<i>Alejandro Suarez, Guillermo Heredia and Anibal Ollero</i>	
EVALUACIÓN DE UN ENTORNO DE TELEOPERACIÓN CON ROS	864
<i>David Vargas Frutos, Juan Carlos Ramos Martínez, José Luis Samper Escudero, Miguel Ángel Sánchez-Urán González and Manuel Ferre Pérez</i>	

Sistemas de Tiempo Real

GENERACIÓN DE CÓDIGO IEC 61131-3 A PARTIR DE DISEÑOS EN GRAFCET....	892
<i>María Luz Alvarez Gutierrez, Isabel Sarachaga Gonzalez, Arantzazu Burgos Fernandez, Nagore Iriondo Urbistazu and Marga Marcos Muñoz</i>	
CONTROL EN TIEMPO REAL Y SUPERVISIÓN DE PROCESOS MEDIANTE SERVIDORES OPC-UA	900
<i>Francisco Blanes Noguera and Andrés Benlloch Faus</i>	
Control de la Ejecución en Sistemas de Criticidad Mixta	906
<i>Alfons Crespo, Patricia Balbastre, Jose Simo and Javier Coronel</i>	
GENERACIÓN AUTOMÁTICA DEL PROYECTO DE AUTOMATIZACIÓN TIA PORTAL PARA MÁQUINAS MODULARES	913
<i>Darío Orive, Aintzane Armentia, Eneko Fernandez and Marga Marcos</i>	
DDS en el desarrollo de sistemas distribuidos heterogéneos con soporte para criticidad mixta	921
<i>Hector Perez and J. Javier Gutiérrez</i>	
ARQUITECTURA DISTRIBUIDA PARA EL CONTROL AUTÓNOMO DE DRONES EN INTERIOR	929
<i>Jose-Luis Poza-Luján, Juan-Luis Posadas-Yaguë, Giovanni-Javier Tipantuña-Topanta, Francisco Abad and Ramón Mollá</i>	
Ingeniería Conducida por Modelos en Sistemas de Automatización Flexibles	935
<i>Rafael Priego, Elisabet Estévez, Darío Orive, Isabel Sarachaga and Marga Marcos</i>	
Estudio e implementación de Middleware para aplicaciones de control distribuido	942
<i>Jose Simo, Jose-Luis Poza-Lujan, Juan-Luis Posadas-Yaguë and Francisco Blanes</i>	

Visión por Computador

Real-Time Image Mosaicking for Mapping and Exploration Purposes	948
<i>Abdulla Al-Kaff, Juan Camilo Soto Triviño, Raúl Sosa San Frutos, Arturo de La Escalera and José María Armingol Moreno</i>	
ALGORITMO DE SLAM UTILIZANDO APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES	956
<i>Yerai Berenguer, Luis Payá, Mónica Ballesta, Luis Miguel Jiménez, Sergio Cebollada and Oscar Reinoso</i>	
Medición de Oximetría de Pulso mediante Imagen fotopletismográfica.....	964
<i>Juan-Carlos Cobos-Torres, Jordan Ortega Rodríguez, Pablo J. Alhama Blanco and Mohamed Abderrahim</i>	
Algoritmo de captura de movimiento basado en visión por computador para la teleoperación de robots humanoides.....	970
<i>Juan Miguel Garcia Haro and Santiago Martinez de La Casa</i>	

COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE DETECCIÓN DE ROSTROS EN IMÁGENES DIGITALES	976
<i>Natalia García Del Prado, Victor Gonzalez Castro, Enrique Alegre and Eduardo Fidalgo Fernández</i>	
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO DE FUGA PARA SISTEMA DE DETECCIÓN DE LÍNEAS DE CARRIL	983
<i>Manuel Ibarra-Arenado, Tardi Tjahjadi, Sandra Robla-Gómez and Juan Pérez-Oria</i>	
Oculus-Crawl, a Software Tool for Building Datasets for Computer Vision Tasks	991
<i>Iván De Paz Centeno, Eduardo Fidalgo Fernández, Enrique Alegre Gutiérrez and Wesam Al Nabki</i>	
Clasificación automática de obstáculos empleando escáner láser y visión por computador ..	999
<i>Aurelio Ponz, Fernando Garcia, David Martin, Arturo de La Escalera and Jose Maria Armingol</i>	
T-SCAN: OBTENCIÓN DE NUBES DE PUNTOS CON COLOR Y TEMPERATURA EN INTERIOR DE EDIFICIOS	1007
<i>Tomás Prado, Blanca Quintana, Samuel A. Prieto and Antonio Adan</i>	
EVALUACIÓN DE MÉTODOS PARA REALIZAR RESÚMENES AUTOMÁTICOS DE VÍDEOS	1015
<i>Pablo Rubio, Eduardo Fidalgo, Enrique Alegre and Víctor González</i>	
SIMULADOR PARA LA CREACIÓN DE MUNDOS VIRTUALES PARA LA ASISTENCIA A PERSONAS CON MOVILIDAD REDUCIDA EN SILLA DE RUEDAS ..	1023
<i>Carlos Sánchez Sánchez, María Cidoncha Jiménez, Emiliano Pérez, Ines Tejado and Blas M. Vinagre</i>	
Calibración Extrínseca de un Conjunto de Cámaras RGB-D sobre un Robot Móvil	1031
<i>David Zúñiga-Nöel, Rubén Gómez Ojeda, Francisco-Ángel Moreno and Javier González Jiménez</i>	

TRANSFER FUNCTION PARAMETERS ESTIMATION BY SYMMETRIC SEND-ON-DELTA SAMPLING

José Sánchez, María Guinaldo, Sebastián Dormido

Departamento de Informática y Automática, UNED, C/ Juan del Rosal 16, 28040 Madrid,
{jsanchez,mguinaldo,sdormido}@dia.uned.es

Antonio Visioli

Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Brescia, via Branze 38, 25123 Brescia,
antonio.visioli@unibs.it

Resumen

In this paper, a method to estimate the parameters of first and second order systems with time delays with different accuracy levels for autotuning of event-based PID controllers is presented. Information from the describing function of the non-linearity that introduces the event-based sampling strategy and measures of the oscillations are used to generate the estimations. The event-based sampling condition applied is based on the sampling strategy known as symmetric-send-on-delta.

Palabras clave: Describing function, event-based control, send-on-delta, estimation, limit cycle.

1 INTRODUCTION

During last years, studies on the application of the event-based paradigm to different control engineering fields have experimented a huge expansion both in printed publications and in conferences and workshops. From the first two publications in an international conference with an explicit mention to event-based control [1] and sampling [2] to these days, the event-based paradigm has been applied to PID control, predictive control, networked control, distributed control, agent-based systems, filtering, state estimation, sampling, etc. (see [11]). However, there is one specific field in control engineering in which the event-based paradigm has not been applied until now: parameter estimation of transfer functions. To find references on system identification that can be considered near or related to the event-based paradigm, it is necessary to look at works on autotuning based on relays, such as [8, 10, 13, 15].

As a relay is a static non-linearity, the common procedure in the frequency domain to analyze the behavior of a relay in a feedback loop is the describing function (DF). This method relies on the estimation of the amplitude (K_u) and frequency (ω_u) of the oscillations produced by a relay, which are approximations to the true values due to the truncated high order harmonics that the DF ap-

proach introduces even with no measurement errors.

The relationship between the describing function approach and the parameter estimation based on events is due to the fact that an event-based sampling can generate an oscillatory signal in the control loop. In the most basic architecture of an event-based feedback control loop, the sampling is done applying a Send-On-Delta (SOD) sampling strategy to the process output [12, 14]. When the output is quantified by a quantity multiple of δ , the relationship between the input and the output of the event sampling block is symmetric with respect to the origin. Then, this strategy is known as Symmetric-Send-On-Delta (SSOD) and can be seen also as a generalization of a biased relay [3] with its corresponding describing function.

The present paper provides an event-based parameter estimation approach for autotuning purposes of control loops using a SSOD block located at the process output. A first try on using the describing function approach to autotuning of event-based PI control loops was reported in [4]. In this work, the process (first order plus time delay, FOPTD for short) parameters are estimated considering a limit cycle of one level generated by the SSOD block and knowing at first one of the three FOPTD parameters. Also, the parameter estimation in an event-based control loop is considered in [5]. In such work, the estimation approach is based on curving fitting using a relay in series with the SSOD block and a pre-tuned PI controller. From measurements obtained of the oscillatory signals and using the controller parameter values, expressions to obtain the FOPDT parameters are given. In the new approach presented here, a previous tuning of the controller is not necessary and the method can be applied at the beginning of the design phase, as a previous step to the tuning. Like previous works based on DF, the model parameters need to be calculated using some previous information from the process (i.e., the static gain or the velocity gain in a process with integration), but no additional experiments are needed.

The rest of the paper is organized as follows. In Section 2, the structure of the control loop con-

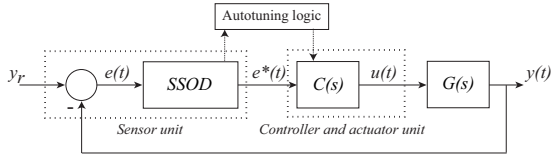


Figure 1: Event-based control loop where the estimation parameter approach is included as part of the autotuning logic.

sidered is described. In Section 3, the estimation approach based on the describing function of the SSOD block is presented. Section 4 outlines the procedure to identify the most usual models used for tuning of PID controllers. Examples of results are shown in Section 5. Finally, the discussion about the goodness of the proposed method is given in Section 6.

2 ARCHITECTURE

The event-based feedback control loop considered in this work is divided into three units (Figure 1): the sensor, the control, and the actuator. The sensor unit is composed of the sensor and its on-board intelligence, and it is on charge of computing the error $e(t) = y_r(t) - y(t)$. The event-based sampler takes the error $e(t)$ and produces an event-based signal $e^*(t)$ transmitted to the controller. The control unit $C(s)$ implements the control law that, without loss of generality, is considered to be PID. The actuator unit receives $u(t)$ from $C(s)$ and applies it to the process $G(s)$.

The autotuning logic block contains the programming code needed to apply the different steps of the estimation approach explained in this paper. So, during the identification phase, the logic would be in charge of deactivating the integral and derivative actions of the PID in Figure 1 and modify the proportional gain to produce the oscillations needed to estimate the parameters. At the same time, the logic would introduce changes in the reference y_r to disturb the process (for example, a step or a pulse). Once the event-based estimation phase concludes, the $C(s)$ would start working with the information received from the autotuning logic, being these data, for example, the three PID parameters derived from a set of tuning rules or directly the model parameters for the predictive controller.

In this paper, the event-based sampling is done applying a SSOD. Formally, a SOD sampler can be thought as a block which receives a continuous signal $e(t)$ as input and generates a sampled signal $e^*(t)$ as output, which is a piecewise constant signal with $e^*(t) = e(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1})$. Each t_k is denoted as event time, and it holds

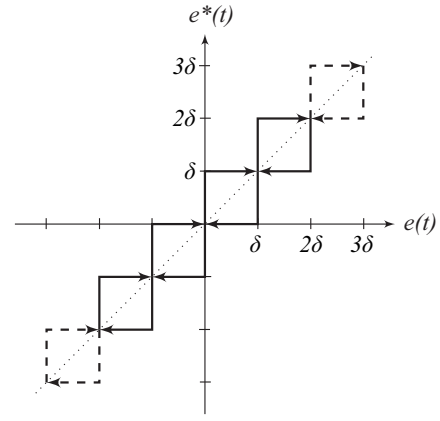


Figure 2: Relationship between $e(t)$ and $e^*(t)$.

that $t_{k+1} = \inf\{t \mid t > t_k, |e(t) - e(t_k)| \geq \delta\}$, where $\delta > 0$ is the sampling threshold. In the symmetric case (SSOD), the sampled output signal $e^*(t)$ can assume only values multiple of the threshold δ , and is mathematically described as follows:

$$e^*(t) = \begin{cases} (i+1)\delta & \text{if } e(t) \geq (i+1)\delta \wedge e^*(t^-) = i\delta \\ i\delta & \text{if } e(t) \in [(i-1)\delta, (i+1)\delta] \wedge e^*(t^-) = i\delta \\ (i-1)\delta & \text{if } e(t) \leq (i-1)\delta \wedge e^*(t^-) = i\delta \end{cases}$$

The key point of the relationship between $e(t)$ and $e^*(t)$ is that it can be considered as a generalization of a relay with hysteresis, where there is an infinite number of thresholds [9], as shown in Figure 2. This implies that a describing function of this non-linearity can be derived and applied to the analysis of the oscillations.

3 THE DESCRIBING FUNCTION APPROACH

The describing function of a SSOD block that produces a signal similar to Figure 2 is given by the following equation [6, 7]:

$$N(A, \delta) = \frac{2\delta}{\pi A} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{\delta m}{A}\right)^2} + 2 \sum_{k=1}^{m-1} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta k}{A}\right)^2} \right] - j \frac{2}{\pi} \left(\frac{\delta}{A}\right)^2 m, \quad (1)$$

considering that the input is a sinusoidal signal of amplitude A . In (1), $m = \text{floor}(A/\delta)$ represents the amplitude of the oscillation reached by the signal $e(t)$. According to Figure 2, the output of the SSOD block is zero for inputs of amplitude $A < \delta$, so A must be equal or higher than δ in order to produce some output. For this reason, the quotient $\delta/A \in [0, 1]$ and can be considered as a normalized parameter δ_A . So, the DF expression of the SSOD block can be rewritten as

$$N(\delta_A) = \frac{2\delta_A}{\pi} \left[1 + \sqrt{1 - (\delta_A m)^2} + 2 \sum_{k=1}^{m-1} \sqrt{1 - (\delta_A k)^2} \right] - j \frac{2\delta_A^2}{\pi} m, \quad (2)$$

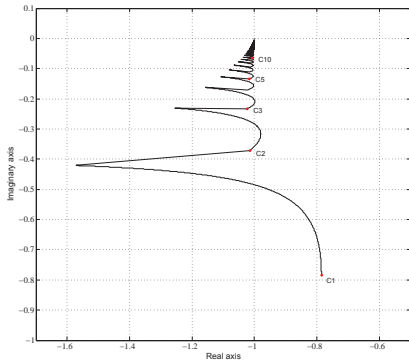


Figure 3: Nyquist plot of $-1/N(\delta_A)$. A C_i point corresponds to $\delta_A = 1/i$.

where $\delta_A \in [0, 1]$. The calculations of $N(A, \delta)$ are omitted for brevity.

The condition for the existence of limit cycles is given by [33]:

$$G_{ol}(j\omega) = -\frac{1}{N\delta_A}, \quad (3)$$

where $G_{ol}(j\omega) = C(j\omega)G(j\omega)$. In Figure 3, the portrait of $-1/N(\delta_A)$ is represented for $\delta_A \in [0, 1]$ and some particular points are illustrated. The intersection of $G_{ol}(j\omega)$ with a point C of $-1/N(\delta_A)$ is known as *intersection* or *critical point*. The subindex i in a C point means that its intersection with $G_{ol}(j\omega)$ produces theoretically an oscillation of amplitude $A = i\delta$, $i \geq 1$. As an oscillation of amplitude $A = i\delta$ with $i = 1, \dots, n$ means that $m = [A/\delta] = [i\delta/\delta] = i$, from (2) the expression to obtain the C_i corresponding to an oscillation of amplitude $i\delta$ is

$$C_i = \frac{-1}{\frac{2}{i\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{i-1} \sqrt{1 - \left(\frac{k}{i}\right)^2} \right] - j \frac{2}{i\pi}}. \quad (4)$$

In Figure 4.a, each arc segment of the SSOD represents a certain type of limit cycle. The first arc, starting in C_1 , represents possible limit cycles of amplitudes in the interval $[\delta, 2\delta)$ and corresponds to the triggering of events at crossing the $\pm\delta$ thresholds (Figure 4.b), the second arc represents possible limit cycles of amplitudes $[2\delta, 3\delta)$ generated at crossing the $\pm 2\delta$ thresholds (Figure 4.c), and so on (Figure 4.d). Two or more intersection in the Nyquist map means that the process can reach two or more oscillations of different frequencies and amplitudes depending on the operation conditions. It is important to notice that $N(\delta_A = 0) = C_\infty = \lim_{i \rightarrow \infty} C_i = -1$, that means the intersection of $G_{ol}(j\omega)$ with C_∞ would produce a limit cycle of infinite amplitude, i.e., instability.

Applying a proportional gain $C(j\omega) = K_{osc}$ to a stable $G(j\omega)$, three possible cases can be generated:

- Case 1: $G_{ol}(j\omega) < -1$ and $G(j\omega) < -1/N(\delta_A)$. No oscillations at any frequency.
- Case 2: $G_{ol}(j\omega) < -1$ and $G(j\omega) = -1/N(\delta_A)$. Existence of oscillations at frequency ω_{osc} and amplitude given by the intersection point, that

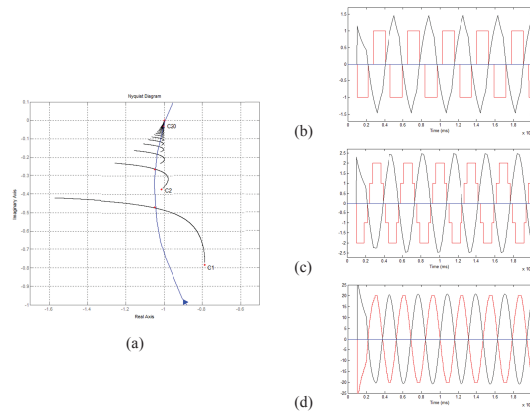


Figure 4: Graphical determination of the limit cycles of $G_{ol}(s) = 2.25e^{-s}/(s+1)$.

is, $A = [1/\delta_A]$. There can be as many stable limit cycles as intersections.

- Case 3: $G_{ol}(j\omega) \geq -1$. Instability. However, depending of the operation or initial conditions of the process, the stable limit cycle can be reached avoiding the instability. Hence, for small perturbations, as the limit cycle is locally stable, it will converge to its original state with increasing time, avoiding the instability.

The event-based method for parameter estimation consists in applying a proportional gain K_{osc} to the unknown process $G(s)$ and forcing it to enter in a limit cycle of amplitude $i\delta$, $i \geq 1$. That means to move the process from Case 1 to Cases 2 or 3. The details of the approach will be given in the next section, but a further comment is required before. The value of C from the DF analysis is an approximation of the true value of the experimental oscillations denoted as C' . Higher accuracy in the estimation depends higher oscillations, but, at the same time, the sensibility of K_{osc} is higher.

4 THE PARAMETER ESTIMATION PROCEDURE

The transfer functions models used for PID autotuning and the equations derived for them are summarized in Table 1. We make the following assumptions: (i) the process is in steady state with the SSOD block centered in zero; (2) K_{osc} is set to 1.

The estimation procedure can be divided into the following steps:

1. Getting the oscillation parameters.
 - (a) To reach an stable oscillation of high order, i.e. $i > 5$, move out the process from the steady state introducing a square pulse of amplitude, for example, $y_r = y_{max}$ and increasing the K_{osc} gain.
 - (b) Once the oscillation is stable, annotate the gain K_{osc} , the amplitude of the oscillation

Table 1: Models used for PID autotuning. K , L , T , T_1 and T_2 are all positive constants.

Model	$\mathbf{G}(s)$	$ \mathbf{G}(s) $	$\angle \mathbf{G}(s)$
FOPTD	$\frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1}$	$\frac{K}{\sqrt{1+\omega^2T^2}}$	$-\omega L - \arctan \omega T$
SOPTD-1	$\frac{Ke^{-Ls}}{(Ts+1)^2}$	$\frac{K}{1+\omega^2T^2}$	$-\omega L - 2 \arctan \omega T$
SOPTD-2	$\frac{Ke^{-Ls}}{(T_1s+1)(T_2s+1)}$	$\frac{K}{\sqrt{1+\omega^2T_1^2}\sqrt{1+\omega^2T_2^2}}$	$-\omega L - \arctan \omega T_1 - \arctan \omega T_2$

A_{osc} and the frequency ω_{osc} .

- (c) As the amplitude A of the oscillation will be not an integer number, calculate the crossing point C_{osc} using (1). In case of A is an integer number is also possible to use (4).
2. Estimation of steady-state gain by asymmetric oscillations.
 - (a) Add a bias d to the SSOD block output to produce a stable asymmetric oscillation.
 - (b) Repeat step 1a.
 - (c) Once the oscillation is stable, K becomes

$$K = \frac{\int_0^{2\pi} y(t)dt}{K_{osc} \int_0^{2\pi} e^*(t)dt}. \quad (5)$$

3. Estimate T using data from steps 1 and 2 according to Table 2.
4. Obtain L using T and the arguments of C_i according to Table 2.

5 SIMULATION EXAMPLES

Without loss of generality, the approach can be applied with oscillations of amplitude non-multiple of δ that means that (1) must be used to calculate C_{osc} instead of (4). In all the experiments, δ was set to 1 and the steady-state gain K was obtained by introducing a bias of $\delta = 0.5$ in the SSOD block and the approximations were exact.

5.1 Accuracy of the estimations

Table III illustrates the actual and process transfer function parameters obtained using information from the oscillations of amplitudes δ , 2δ and 3δ . The frequencies and gains of the current processes represent the points in which the processes intersect with the critical points C_1 , C_2 and C_3 in the Nyquist map. These points are approximations obtained from the DF, whereas the true values are obtained from experimental measures. Note that estimations using C_3 are very close to the actual processes, and the estimation error in any parameter is below the 2%.

Note that in the presented example of SOPTD two approaches are possible: 1) consider that there is a single pole with multiplicity equal to 2 and identify T , and 2) fix the value of T_1 and estimate T_2 . The application of the approach to the estimation of two different lags is complicated due to the discrepancies between theoretical and practical critical points, especially in the

frequencies, producing imaginary solutions in many situations.

Notice the non-causal model obtained in the last case in Table 3 with the lowest amplitude oscillation due to the discrepancies between the real ($\omega_1 = 0.304$) and the theoretical ($\omega_1 = 0.404$) oscillations frequency. As the order of oscillation increases, the discrepancy reduces and the estimation parameters converge to the real ones.

5.2 Comparative with other methods

Table 4 compares the actual and estimated process transfer functions for first order processes using the event-based and the ATV-2 approaches [8, 10]. Note that the estimations provided by ATV-2 are less accurate. However, since the AVT-2 assumes that the dead time can be observed from the initial response of the system to the relay tests, the delays of the ATV-based results are exact.

5.3 High-order processes

Table 4 presents the outcome of the event-based identification method when the process is modeled as FOPTD and SOPTD. With regard to the second case, the results for the SOPTD-1 are not so good due to the dominant lag as the estimation produces an average lag, that is, a critically damped system but, however the real process is overdamped. Applying the SOPTD-2 model when T_1 is provided, the estimated model can be now considered a good approach to the real one. Nyquist curves of the real processes and estimated transfer functions are presented in Figure 5.

5.4 Non-minimum phase processes

In this section, results of the estimation of FOPTD and SOPTD of non-minimum phase processes are presented in Table 6. The second case presented is compared with other method in the literature called *phase deviation* [15] in Figure 6. Note how this method presents a bad behavior at low frequencies that produces stationary error in contrast to the event-based method proposed in this paper.

6 DISCUSSION

In this paper, a simple event-based method to estimate the parameters of first and second order systems with time delays using SSOD sampling has been presented.

Table 2: Estimation of T and L .

Model	\mathbf{T}	\mathbf{L}
FOPTD	$\frac{\sqrt{K^2 K_{osc}^2 - C_{osc} ^2}}{ C_{osc} \omega_{osc}}$	$-\frac{\angle C_{osc} + \arctan \omega_{osc} T}{\omega_{osc}}$
SOPTD-1	$\frac{\sqrt{ C_{osc} (K K_{osc} - C_{osc})}}{ C_{osc} \omega_{osc}}$	$-\frac{\angle C_{osc} + 2 \arctan \omega_{osc} T}{\omega_{osc}}$
SOPTD-2	T_1 known $T_2 = \frac{ C_{osc} ^2 T_1 \omega_{osc}^2 - K^2 K_{osc}^2 + C_{osc} ^2}{ C_{osc} ^2 \omega_{osc}^2 (T_1 \omega_{osc} + 1)}$	$-\frac{\angle C_{osc} + \arctan \omega_{osc} T_1 + \arctan \omega_{osc} T_2}{\omega_{osc}}$

Table 3: Comparative of the improvement of the estimations using information from three oscillations of different amplitude and frequency.

Nominal process	\mathbf{C}_1	\mathbf{C}_2	\mathbf{C}_3
$\frac{e^{-s}}{s+1}$ $\omega_1 = 1.39, K_1 = 1.919$ $\omega_2 = 1.76, K_2 = 2.175$ $\omega_3 = 1.89, K_1 = 2.209$	$\frac{e^{-1.101s}}{0.782s+1}$ $\omega_1 = 1.425$ $K_1 = 1.59$ $A_1 = 1.006$	$\frac{e^{-0.998s}}{0.926s+1}$ $\omega_2 = 1.781$ $K_2 = 2.03$ $A_2 = 2.009$	$\frac{e^{-1.006s}}{0.998s+1}$ $\omega_3 = 1.843$ $K_3 = 2.14$ $A_3 = 3.02$
$\frac{e^{-s}}{(s+1)^2}$ $\omega_1 = 0.896, K_1 = 2.007$ $\omega_2 = 1.114, K_2 = 2.432$ $\omega_3 = 1.182, K_1 = 2.523$	$\frac{e^{-0.9965s}}{(0.930s+1)^2}$ $\omega_1 = 0.963$ $K_1 = 1.9$ $A_1 = 1.009$	$\frac{e^{-1.014s}}{(0.985s+1)^2}$ $\omega_2 = 1.127$ $K_2 = 2.311$ $A_2 = 2.038$	$\frac{e^{-1.006s}}{(0.995s+1)^2}$ $\omega_3 = 1.185$ $K_3 = 2.451$ $A_3 = 3.037$
	$\frac{e^{-1.074s}}{(s+1)(0.740s+1)}$	$\frac{e^{-1.014s}}{(s+1)(0.985s+1)}$	$\frac{e^{-1.006s}}{(s+1)(0.991s+1)}$

Table 4: Parameter estimation of FOPTD with different delays and time constants. The information used in the event-based method corresponds to oscillation of amplitude higher to 4δ .

Process	Event-based	ATV-2
$\frac{e^{-2s}}{s+1}$	$\frac{e^{-2.0066s}}{1.0002s+1}$ $A = 4.565, \omega_{osc} = 1.088,$ $K_{osc} = 1.856$	$\frac{0.89e^{-2s}}{0.761s+1}$
$\frac{e^{-5s}}{s+1}$	$\frac{e^{-5.002s}}{1.008s+1}$ $A = 6.4, \omega_{osc} = 0.5134,$ $K_{osc} = 1.15$	$\frac{0.833e^{-2s}}{0.728s+1}$
$\frac{e^{-2s}}{10s+1}$	$\frac{e^{-2.003s}}{9.977s+1}$ $A = 5.12, \omega_{osc} = 0.7859,$ $K_{osc} = 8$	$\frac{0.988e^{-2s}}{8.02s+1}$

The method is based on the information that the describing function of the SSOD sampling block provides about the point in which the process starts oscillating when the gain margin with respect to $-1/N(\delta_A)$ is reduced to zero by applying a proportional gain. The oscillation means the intersection of the process with a point of some arc segment of the SSOD describing function in the Nyquist loci. With the proportional gain applied to reach a stable oscillation, the frequency, the DF information on the intersection point, and the polar forms of the transfer functions of FOPTD and SOPTD, the steady-state gain, the time constants and time delays are obtained.

Comparing the results with other methods based on describing functions analysis of a relay, solutions are

Table 5: Examples of parameter estimation of high-order processes.

Process	FOPTD	SOPTD
$\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^2}$	$A = 6.122, K_{osc} = 2.5, \omega_{osc} = 0.623$ $\frac{e^{-3.002s}}{3.755s+1}$	$\frac{e^{-2.008s}}{(1.994s+1)^2}$
$\frac{e^{-2s}}{(s+1)(10s+1)}$	$A = 8.164, K_{osc} = 6.76, \omega_{osc} = 0.572$ $\frac{e^{-2.869s}}{11.588s+1}$	$\frac{e^{-1.249s}}{(4.173s+1)^2}$ $\frac{e^{-1.9883s}}{(1.0197s+1)(9.9684s+1)}$
$\frac{e^{-0.2s}}{0.5s^2+1.5s+1}$	$A = 7.2, K_{osc} = 7.45, \omega_{osc} = 3.514$ $\frac{e^{-0.460s}}{2.080s+1}$	$\frac{e^{-0.1898s}}{(0.7188s+1)^2}$
$\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^5}$	$A = 8.18, K_{osc} = 1.95, \omega_{osc} = 0.2749$ $\frac{e^{-7.407s}}{6.025s+1}$	$\frac{e^{-5.554s}}{(3.516s+1)^2}$

very accurate for non-measurement errors of the limit cycle waveform. The identification accuracy can be indeed high due to the use of oscillations that reduce the high-harmonic components of the limit cycle, especially for identifying higher-order or time delay processes of which the relay responses are apparently different from the sinusoidal shape.

Additionally, as other DF-related methods, the computational cost is low because applications of numerical methods to solve non-linear equations or costly experimental measures of high-order harmonics are not needed.

However, many questions and problems still remain open. One shortcoming of the method is that obtaining high-order oscillations can be sometimes difficult since depends on the historical operation of the pro-

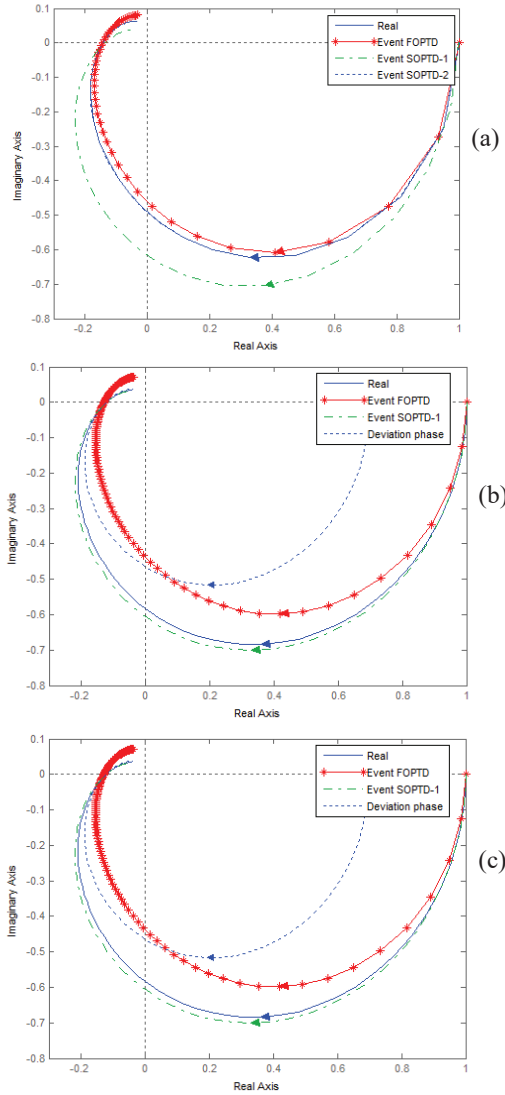


Figure 5: Nyquist curves of high-order processes and estimated models for three cases presented in Table 5. (a) $\frac{e^{-2s}}{(s+1)(10s+1)}$, (b) $\frac{e^{-0.2s}}{0.5s^2+1.5s+1}$, (c) $\frac{e^{-2s}}{(2s+1)^5}$.

cess, not just on the gain. So, a constant increment of the proportional gain to reach higher oscillations can be translated into instability. Other issue to research is that the quantitative relationship between the C-point order used and the accuracy of the identification is not known. The study of processes with integrators will also be part of future studies. Furthermore, the sampling technique used for the estimation is vulnerable to the noise of the measurements. How the noise affects the parameter estimation is also an interesting problem to consider in the future.

Agradecimientos

This work has been funded by Spanish Ministry of Economy and Competitiveness under contracts DPI2012-31303 and DPI2014-55932-C2-2-R.

Table 6: Examples of parameter estimation of high-order processes.

Process	FOPTD	SOPTD
$\frac{(1-s)e^{-s}}{(s+1)^5}$	$A = 9.46, K_{osc} = 1.5, \omega_{osc} = 0.4648$ $\frac{e^{-4.838s}}{2.343s+1}$	$\frac{e^{-4.014s}}{(1.488s+1)^2}$
$\frac{(1-s)e^{-4s}}{(s+1)^4}$	$A = 7.09, K_{osc} = 1.19, \omega_{osc} = 0.3459$ $\frac{e^{-7.20s}}{1.813s+1}$	$\frac{e^{-6.499s}}{(1.228s+1)^2}$

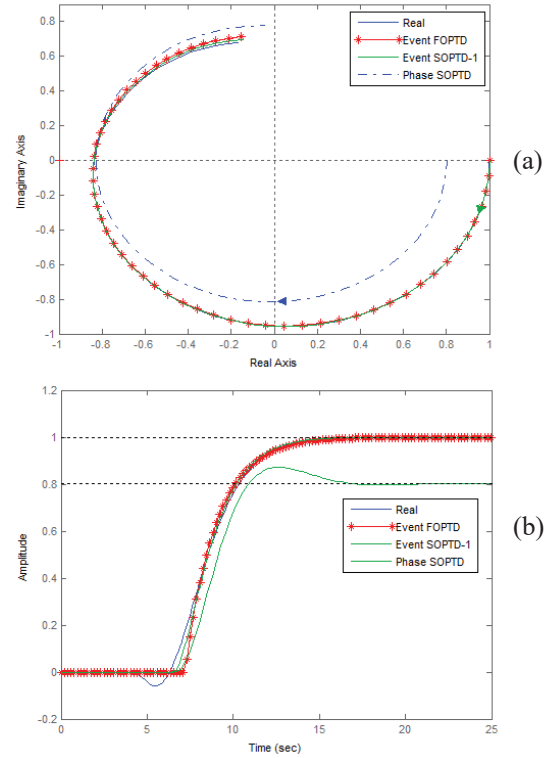


Figure 6: (a) Nyquist plots and (b) step responses for the second case in Table 6. The event-based method is compared with the strategy proposed in [15].

Referencias

- [1] K.E. Årzén, A Simple Event-Based PID Controller, 14th IFAC World Congress (1999), Beijing, China.
- [2] B. Bernhardsson, K.J. Åström, Comparison of periodic and event based sampling for first-order stochastic systems, 14th IFAC World Congress (1999), Beijing, China.
- [3] M. Beschi, S. Dormido, J. Sanchez, A. Visioli, Characterization of symmetric send-on-delta PI controllers, Journal of Process Control 22(10) (2012) 1930-1945.
- [4] M. Beschi, S. Dormido, J. Sanchez, A. Visioli, L.J. Yebra, Event-based PI plus feedforward control strategies for a distributed solar collector field, IEEE Transactions on Control Systems Technology 22(4) (2014) 1615-1622.

- [5] M. Beschi, S. Dormido, J. Sánchez, A. Visioli, Closed-loop automatic tuning technique for an event-based PI controller, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 54(24) (2015) 6362-6370.
- [6] S. Dormido, M. Mellado, Determination of limit cycles in adaptive sampling systems (In Spanish), *Revista de Automática* 26 (1975) 21-31.
- [7] S. Dormido, M. Mellado, A study on fixed-difference sampling scheme, *Applications and Research in Information Systems and Sciences* 2 (1977) 496-500.
- [8] I. Kaya, D.P. Atherton, Parameter estimation from relay autotuning with asymmetric limit cycle data, *Journal of Process Control* 11(4) (2001) 429-439.
- [9] E. Kofman, J. Braslavsky, Level crossing sampling in feedback stabilization under data rate constraints, 45th IEEE International Conference on Decision and Control (2006), San Diego, USA.
- [10] W. Li, E. Eskinat, W.L. Luyben, An improved autotune identification method, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 30(7) (1991) 1530-1541.
- [11] M. Miskowicz (ed.), *Event-Based Control and Signal Processing*, CRC Press, 2015.
- [12] M. Miskowicz, Send-on-delta: An event-based data reporting strategy, *Sensors* 6 (2006) 49-63.
- [13] C. Scali, G. Marchetti, D. Semino, Relay with additional delay for identification and autotuning of completely unknown processes, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 38(5) (1999) 1987-1997.
- [14] V. Vasyutynskyy, K. Kabitzsh, Implementation of PID controller with send-on-delta sampling, *International Control Conference* (2006), Glasgow, Scotland, United Kingdom.
- [15] P. Wang, D. Gu, W. Zhang, Modified relay feedback identification based on describing function analysis, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 46(5) (2007) 1538-1546.