

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 Politécnic 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
Miguel Ángel 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

Núñez, 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	
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 FOTOBIOREACTORES 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 <hr/>	
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>	
<hr/> Sistemas de Tiempo Real <hr/>	
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>	
<hr/> Visión por Computador <hr/>	
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>	

Diseño LQ e implementación distribuida para la estimación de estado

A. R. del Nozal, L. Orihuela, P. Millán, C. Ierardi, A. Tapia
 Universidad Loyola Andalucía, {arodriguez,dorihuela,pmillan,cierardi,atapia}@uloyola.es

Resumen

Este artículo trata el problema de la estimación distribuida del estado de una planta por dos agentes. El objetivo de cada uno de los agentes es reconstruir el estado completo a partir de sus propias medidas y la información intercambiada con el otro. Para ello, se introduce una novedosa estructura de observador en la cual se divide el espacio de estados en la parte observable por el agente en cuestión y la parte no observable por él. El diseño de las ganancias del observador se lleva a cabo mediante la resolución de un problema LQ en el que el usuario puede variar dos parámetros escalares para lograr una observación adecuada. Se introduce dicho algoritmo para una red con dos agentes siendo su generalización para un número indeterminado de agentes un posible futuro trabajo.

Palabras clave: Estimación distribuida. Sistemas multi-agente. Sistemas invariantes en tiempo. Programación LQ.

1. Introducción

Cuando se considera el problema de la estimación del estado de una planta de grandes dimensiones, como puedan ser grandes factorías o cadenas de producción, la complejidad del problema crece exponencialmente. El hecho de que la información de dichos sistemas sea recolectada por muchos agentes unido a la lejana situación geográfica de éstos complica enormemente el diseño de los observadores. Sin embargo ofrece infinidad de ventajas respecto a los antiguos sistemas centralizados como puede ser la robustez, la escalabilidad o la flexibilidad respecto a cambios en la topología de la red o del sistema a observar.

El problema de la estimación distribuida del estado de una planta ha sido abordado desde diferentes perspectivas desde hace años, aunque seguramente, el estimador más conocido sea el filtro de Kalman distribuido [5, 6]. El filtro de Kalman distribuido ha atraído la atención de muchos investigadores y no solo en el campo de la ingeniería

de control, sino también en otros campos como pueden ser el procesamiento de señales [4], la visión artificial [7] o el campo de la óptica [2] por nombrar algunos. La mayoría de filtros de Kalman distribuido aplicados en la práctica funcionan con dos fases principales: Primero alcanzan un consenso entre los agentes y posteriormente cada uno aplica un filtro que contribuye a la estabilización de la estimación conjunta del estado. Estrategias de consenso son también utilizadas en [8], [9] y [10], donde los autores proponen el diseño de filtros H_∞ .

El estudio de la descomposición del espacio de estados en las partes observable y no observable por el agente ya ha sido estudiado en previos trabajos de los autores, vease [3] y [1]. En el primero, el observador utilizado es propuesto para una red con dos agentes ofreciendo condiciones de estabilidad. El segundo de ellos trata la aplicación de un filtro de Kalman distribuido para este tipo de arquitectura en la que se llevan a cabo una serie de simplificaciones. Este artículo se centra en el diseño de las ganancias del observador.

Desde el punto de vista de la topología de comunicación la mayoría de los trabajos parte de la formulación en la que ningún agente es capaz de reconstruir el estado por sí mismo. Es decir, los agentes deben colaborar entre ellos. Aunque en nuestra red solo se considere una pareja de agentes, también se tiene esta consideración.

Este artículo constituye un trabajo preliminar considerando una red de únicamente dos agentes. La intención de los autores es mostrar el potencial de la estructura de observador presentada y la capacidad de diseño mediante un algoritmo LQ por el cual sea solo necesario ajustar el valor de dos escalares. De esta manera no es necesario tener profundos conocimientos de control para el ajuste del mismo.

El artículo esta organizado de la siguiente manera. La Sección 2 introduce la formulación del problema que se va a abordar así como algunas definiciones y simplificaciones llevadas a cabo. En la Sección 3 se muestra la estructura de observador considerada cuyo diseño se trata en la Sección 4.

Finalmente en las secciones 5 y 6 algunas simulaciones y las conclusiones son presentadas.

2. Formulación del problema

Considere un sistema discreto, lineal, autónomo e invariante en el tiempo y dos agentes (1 y 2) tomando medidas del sistema con la siguiente representación en el espacio de estados:

$$x^+ = Ax + w, \quad (1)$$

$$y_1 = C_1x + n_1, \quad (2)$$

$$y_2 = C_2x + n_2, \quad (3)$$

donde $y_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ y $y_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ son vectores que representan la salida del sistema para el agente 1 y 2 respectivamente; $C_1 \in \mathbb{R}^{m_1 \times n}$ y $C_2 \in \mathbb{R}^{m_2 \times n}$ son las matrices de salida de ambos agentes y $w \in \mathbb{R}^n$, $n_1 \in \mathbb{R}^{m_1}$ y $n_2 \in \mathbb{R}^{m_2}$ son perturbaciones y ruidos mutuamente independientes.

La estructura del observador propuesta en la siguiente sección esta basada en la consideración de una transformación del sistema a la forma observable escalonada. Por la cual, es posible obtener una matriz de transformación lineal $T \in \mathbb{R}^{n \times n}$ de tal forma que ante el cambio de variable $\xi \triangleq Tx$ es posible transformar la representación en espacio de estados del sistema en la siguiente:

$$\xi_i^+ = T_i A T_i^T \xi_i = \begin{bmatrix} A_i^{\bar{o}} & \tilde{A}_i \\ 0 & A_i^o \end{bmatrix} \xi_i, \quad (4)$$

$$y_i = C_i T_i^T \xi = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{C}_i \end{bmatrix} \xi_i, \quad (5)$$

donde el estado transformado ξ puede ser dividido:

$$\xi_i = \begin{bmatrix} \xi_i^{\bar{o}} \\ \xi_i^o \end{bmatrix}$$

siendo $\xi_i^{\bar{o}} \in \mathbb{R}^{n^{\bar{o}}}$ y $\xi_i^o \in \mathbb{R}^{n^o}$ respectivamente la parte no observable y observable del sistema (1) por un agente genérico i cuando el sistema no se encuentra afectado por ruido. Tenga en cuenta que la parte observable se encuentra completamente desacoplada de la no observable (A_i^o, \tilde{C}_i), gracias a la estructura con forma de cascada.

Además, la matriz de transformación lineal T_i puede ser descompuesta a su vez $T_i = [\bar{V}_i \ V_i]^T$, donde $\bar{V}_i \in \mathbb{R}^{n \times n^{\bar{o}}}$ esta compuesto por $n^{\bar{o}}$ vectores columnas en \mathbb{R}^n formando una base ortonormal del subespacio no observable del sistema (1)-(2). A su vez, $V_i \in \mathbb{R}^{n \times n^o}$ es una base ortonormal de la parte observable. Ambas bases son mutuamente ortogonales y juntas, forman el espacio completo \mathbb{R}^n . Ya que T_i es una matriz ortogonal se cumplen las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} \bar{V}_i^T \bar{V}_i &= I_{n^{\bar{o}}}, & V_i^T V_i &= I_{n^o}, \\ \bar{V}_i^T V_i &= 0_{n^{\bar{o}} \times n^o}, & V_i^T \bar{V}_i &= 0_{n^o \times n^{\bar{o}}}. \end{aligned}$$

Definición 1. El error de estimación cometido por un agente i es definido como:

$$e_i = x - \hat{x}_i.$$

Definición 2. El error de estimación cometido por un agente i en la base escalonada observable se define como:

$$\varepsilon_i = \xi - \hat{\xi}_i.$$

Al igual que pasaba con el estado, el error puede ser dividido en su parte observable y no observable:

$$\varepsilon_i = \begin{bmatrix} \varepsilon_i^{\bar{o}} \\ \varepsilon_i^o \end{bmatrix}.$$

Suposición 1. Suponemos que existe observabilidad colectiva del sistema. Esto es, el conjunto de agentes considerado es capaz de observar todas las componentes del estado. Es decir, la pareja $(A, [C_1^T C_2^T]^T)$ es observable.

Del mismo modo la observabilidad local del sistema no es considerada, es decir, ningún agente es capaz de reconstruir el estado completo basado en sus propias medidas.

Suposición 2. Para el caso objeto de estudio se considera que no existe acople entre espacios observables de los agentes. Es decir, consideraremos que el espacio no observable por el agente i coincide con el observable por el agente j y viceversa:

$$V_i^T V_j = 0, \quad \bar{V}_i^T V_j = I$$

3. Estructura de observador propuesta

Considérese la siguiente estructura de observador para el agente 1:

$$\hat{x}_1^+ = \underbrace{A \hat{x}_1}_A + \underbrace{V_1 L_1 (y_1 - \hat{y}_1)}_B + \underbrace{\bar{V}_1 N_{1,2} \bar{V}_1^T (\hat{x}_2 - \hat{x}_1)}_C \quad (6)$$

dónde L_1 y $N_{1,2}$ son, respectivamente, una ganancia local para la estimación del agente 1 en su espacio observable y una ganancia aplicada al término de consenso. Cada uno de los componentes del observador es detallado a continuación:

A Término de predicción basado en modelo.

B Corrección local de medidas: La diferencia entre la salida del sistema y la estimada por el agente 1 es multiplicada por la ganancia L_1 . El resultado se utilizan como pesos para llevar a cabo una transformación lineal de V_1 .

C Término en consenso: Utilizando la estimación del estado realizada por el agente 2, 1 es capaz de corregir la estimación de sus estados no observables. La diferencia entre las estimaciones de ambos agentes es proyectada sobre el espacio no observable del agente 1 y ponderada por la matriz $N_{1,2}$. Así, la información provista por el agente 2 es usada para corregir los estados no observables de 1 y viceversa.

4. Diseño basado en LQ

En anteriores secciones se ha introducido el problema que se pretende resolver así como la estructura de observador propuesta. En esta sección se pretende introducir un algoritmo de diseño de las ganancias del observador basado en programación LQ.

4.1. Algoritmo de consenso basado en LQ

Considere la estructura de observador introducida en (6). Entonces, es posible construir la siguiente función de coste para el agente 1:

$$J_1(k) = \sum_{t=k}^{\infty} \kappa_1 |r(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, t), \quad (7)$$

dónde

$$\begin{aligned} \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, t) &= \varepsilon_1(t)^T U_1 \varepsilon_1(t) \\ &+ u_1|_L^T(t) S_1 u_1|_L(t) + u_1|_N^T(t) T_1 u_1|_N(t), \end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned} u_1|_L(k) &= -L_1 \tilde{C}_1 \varepsilon_1^o(k), \\ u_1|_N(k) &= -N_{1,2}(k) \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) \end{aligned}$$

El significado de $u_1|_L$ and $u_1|_N$ puede ser algo confuso. El primero, es el error de estimación cometido por la parte observable del agente multiplicado por la ganancia de Luenberger L_1 . Por otro lado, $u_1|_N$ es la transformación lineal de la proyección del error de estimación en el espacio no observable por 1. Las matrices de pesos $U_1 \in \mathbb{R}^{n_{o1} \times n_{o1}}$, $S_1 \in \mathbb{R}^{n_{o1} \times n_{o1}}$ y $T_1 \in \mathbb{R}^{n_{\bar{o}1} \times n_{\bar{o}1}}$ son matrices diagonales definidas positivas.

La función de coste definida en (7) puede ser reescrita como:

$$\begin{aligned} J_1(k) &= \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, k) \\ &+ \sum_{t=k+1}^{\infty} \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, t) \\ &= \kappa_1(\varepsilon_1, u_1|_L, u_1|_N, k) + J_1(k+1). \end{aligned} \quad (8)$$

Supongamos entonces que el coste óptimo de esta

función objetivo viene dado por la siguiente expresión:

$$J_1^*(k) = \varepsilon_1^o(k)^T P_1|_L \varepsilon_1^o(k) + \varepsilon_1^{\bar{o}}(k)^T P_1|_N \varepsilon_1^{\bar{o}}(k),$$

dónde $J_1^*(k)$ es el coste óptimo de (7) en el instante k y dónde las matrices $P_1|_L \in \mathbb{R}^{n_{o1} \times n_{o1}}$ y $P_1|_N \in \mathbb{R}^{n_{\bar{o}1} \times n_{\bar{o}1}}$ son definidas positivas. Note el carácter cuadrático respecto al error de estimación.

Entonces, desarrollando la expresión (8) obtenemos lo siguiente:

$$\begin{aligned} J_1(k) &= \varepsilon_1(k)^T U_1 \varepsilon_1(k) + u_1|_L^T(k) S_1 u_1|_L(k) \\ &+ u_1|_N^T(k) T_1 u_1|_N(k) \\ &+ \varepsilon_1^o(k+1)^T P_1|_L \varepsilon_1^o(k+1) \\ &+ \varepsilon_1^{\bar{o}}(k+1)^T P_1|_N \varepsilon_1^{\bar{o}}(k+1). \end{aligned} \quad (9)$$

Para continuar con el desarrollo es necesario obtener la dinámica del error transformado tanto de la parte no observable como de la observable del estado. Para ello, partimos de un sistema como el expuesto en (1) pero libre de ruido y una estructura de observador como la expuesta en (6). Entonces el error de estimación viene dado por la siguiente expresión:

$$e_1^+ = (A - V_1 L_1 C_1) e_1 - \bar{V}_1 N_{1,2} \bar{V}_1^T (e_1 - e_2).$$

Si a la expresión anterior le aplicamos la transformación a forma escalonada observable definida por $\xi_1 = T_1 x$ obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\bar{o}} \\ \varepsilon_1^o \end{bmatrix}^+ = \begin{bmatrix} A_1^{\bar{o}} & \tilde{A}_1 \\ 0 & A_1^o - L_1 \tilde{C}_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^{\bar{o}} \\ \varepsilon_1^o \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_{1,2} \bar{V}_1^T (e_1 - e_2) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

De esta expresión, es deducible que la dinámica del error de estimación observable se encuentra completamente desacoplada de la no observable y viene dada por:

$$\varepsilon_1^{o+} = \left(A_1^o - L_1 \tilde{C}_1 \right) \varepsilon_1^o. \quad (10)$$

Del mismo modo, consideramos ahora la dinámica del error no observable:

$$\varepsilon_1^{\bar{o}+} = A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}} + \tilde{A}_1 \varepsilon_1^o - N_{1,2} \bar{V}_1 (e_1 - e_2).$$

Por un lado, gracias a la estructura en forma de cascada del sistema tras la transformación, podemos considerar que la ganancia L_1 esta diseñada de tal manera que el error de estimación en régimen permanente de la parte observable tiene a cero con $\left[A_i^o - L_i \tilde{C}_i \right]$ Schur estable. Por otro lado, es posible reescribir la expresión $\bar{V}_1^T (e_1 - e_2)$

haciendo uso de la transformación a forma escalonada observable:

$$\begin{aligned}\bar{V}_1^T(e_1 - e_2) &= \bar{V}_1^T(V_1\varepsilon_1^o + \bar{V}_1\varepsilon_1^{\bar{o}} - V_2\varepsilon_2^o - \bar{V}_2\varepsilon_2^{\bar{o}}) \\ &= \varepsilon_1^{\bar{o}} - \varepsilon_2^o.\end{aligned}$$

Así la expresión finalmente queda:

$$\varepsilon_1^{\bar{o}+} = (A_1^{\bar{o}} - N_{1,2})\varepsilon_1^{\bar{o}} + F, \quad (11)$$

siendo F un término que tiende asintóticamente a cero cuando la parte observable se ha diseñado de tal forma que $\begin{bmatrix} A_i^o - L_i\tilde{C}_i \end{bmatrix}$ es Schur estable.

Téngase en cuenta que gracias a la estructura en forma de cascada introducida por la transformación a la forma escalonada observable, es posible diseñar la ganancia local del observador de una forma completamente independiente a la que se utilizaría en el término de consenso. Cuando se considera también la parte no observable del agente, es posible obtener una expresión de la dinámica del error para esta parte que únicamente depende de sí misma y de los errores de estimación obtenidas en las partes observables de los agentes. Entonces, si el diseño de la ganancia local del agente se realiza de tal manera que la dinámica del error de estimación observable sea más rápida que la del no observable, ambos errores tenderán a cero de forma asintótica.

Entonces, volviendo a la función de coste del algoritmo basado en LQ, si sustituimos las expresiones (10) y (11) en (9) obtenemos:

$$\begin{aligned}J_1(k) &= \varepsilon_1(k)^T U_1 \varepsilon_1(k) + u_1|_L^T(k) S_1 u_1|_L(k) \quad (12) \\ &+ u_1|_N^T(k) T_1 u_1|_N(k) \\ &+ (A_1^o \varepsilon_1^o(k) + u_1|_L(k))^T P_1|_L \\ &\times (A_1^o \varepsilon_1^o(k) + u_1|_L(k)) \\ &+ (A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) + u_1|_N(k))^T P_i|_N \\ &\times (A_1^{\bar{o}} \varepsilon_1^{\bar{o}}(k) + u_i|_N(k)).\end{aligned}$$

Dado que la función de coste presenta una forma convexa, es posible calcular el mínimo de dicha función respecto a $u_i|_L$ y $u_i|_N$ igualando las derivadas parciales a cero:

$$\begin{aligned}\frac{\partial J_1(k)}{\partial u_1|_L(k)} &= 2S_1 u_1|_L(k) \\ &+ 2P_1|_L (A_1^o \varepsilon_1^o(k) + u_1|_L(k)) = 0, \\ \frac{\partial J_1(k)}{\partial u_1|_N(k)} &= 2T_1 u_1|_N(k) \\ &+ 2P_i|_N (A_1^{\bar{o}} \varepsilon_i^{\bar{o}}(k) + u_1|_N(k)) = 0,\end{aligned}$$

lo que implica:

$$u_1|_L^*(k) = -(S_1 + P_1|_L)^{-1} P_1|_L A_1^o \varepsilon_1^o(k), \quad (13)$$

$$u_1|_N^*(k) = -(T_1 + P_1|_N)^{-1} P_1|_N A_1^{\bar{o}} \varepsilon_i^{\bar{o}}(k), \quad (14)$$

siendo $u_1|_L^*(k)$ y $u_1|_N^*(k)$ los valores de $u_1|_L(k)$ y $u_1|_N(k)$ que minimizan el valor de la función objetivo en el instante k .

Sustituyendo (13)-(14) en (12) es posible obtener las siguientes ecuaciones de Riccati para el cálculo de $P_1|_L$ y $P_1|_N$:

$$\begin{aligned}A_1^{oT} P_1|_L A_1^o - P_1|_L + V_1^T U_1 V_1 \\ &= A_1^{oT} P_1|_L (S_1 + P_1|_L)^{-1} P_1|_L A_1^o. \\ A_1^{\bar{o}T} P_1|_N A_1^{\bar{o}} - P_1|_N + \bar{V}_1^T U_1 \bar{V}_1 \\ &= A_1^{\bar{o}T} P_1|_N (T_1 + P_1|_N)^{-1} P_1|_N A_1^{\bar{o}}.\end{aligned}$$

Finalmente, una vez conocidas las matrices $P_1|_L$ y $P_1|_N$, resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones, los valores de L_1 y $N_{1,2}$ son obtenidos:

$$\begin{aligned}(S_1 + P_1|_L)^{-1} P_1|_L A_1^o &= L_1 \tilde{C}_1, \\ (T_1 + P_1|_N)^{-1} P_1|_N A_1^{\bar{o}} &= N_{1,2}.\end{aligned}$$

Sea consciente que la matriz U_1 pondera el conocimiento de la dinámica del sistema mientras que S_1 y T_1 ponderan la información provista por las medidas directas de la planta así como la información provista por el agente 2.

4.2. Diseño de las ganancias propuesto

En esta sección, un método general para diseñar las ganancias del observador es presentado. Para ello se utilizará el algoritmo basado en LQ presentado en la sección previa.

Consideremos que la incertidumbre que afecta tanto a nuestro sistema (w) como a las medidas tomadas por los diferentes agentes (n_1, n_2) pueden ser cuantificadas a través de las matrices Q y R_1 respectivamente. Es decir, por ejemplo, considere un ruido blanco de media cero y desviación típica dada por dichas matrices o considere un ruido acotado cuya cota venga almacenada en las mismas.

El objetivo principal del método es diseñar las matrices de pesos para el algoritmo LQ (U_1, S_1 y T_1) teniendo en cuenta las siguientes tres características:

1. El error en las medidas del sistema viene dado por los valores almacenados en R_1 . Este valor afecta directamente a las matrices de pesos S_1 y T_1 .
2. La distancia entre el agente 1 y el agente que constituye la fuente de información para reconstruir su espacio no observable. En nuestro caso, al solo considerar dos agentes podemos suponer que existen dos vías de comunicación con velocidades de transferencia

diferentes. Este hecho afectará a la matriz de peso T_1 .

3. La incertidumbre introducida en la evolución del estado ya sea por ruidos o por no linealidades no consideradas son definidas por la matriz Q . Este factor actúa directamente sobre la matriz U_1 .

Este artículo propone los siguientes valores para las matrices de pesos:

$$U_1 = \rho_1 Q, \quad (15)$$

$$S_1 = \lambda_1 V_1^T C_1^T R_1 C_1 V_1, \quad (16)$$

$$T_1 = \lambda_1 (\bar{V}_1^T C_1^T R_1 C_1 \bar{V}_1 + D_1), \quad (17)$$

dónde $\rho_1 \in \mathbb{R}$ y $\lambda_1 \in \mathbb{R}$ son dos escalares que permiten fijar la relación entre las matrices de pesos y D_1 es una matriz en cuya diagonal se recoge la distancia entre el nodo 1 y el nodo que realiza la medida del estado correspondiente (2). Así, el diseño del observador se reduce a un problema en el cual solo es necesario fijar el valor de dos escalares para variar la calidad de estimación de la planta por los diferentes agentes.

El diseño de dichos escalares se ha fijado de tal manera que si son fijados con valor unidad, el diseño se lleva a cabo de una forma directamente proporcional a los parámetros de ruido y distancia al agente que realiza la medida del estado concerniente. Los parámetros permiten al usuario modificar esta proporcionalidad según su propia experiencia acerca del proceso.

5. Ejemplos de simulación

Con el fin de mostrar la robustez del algoritmo para el diseño del observador introducido se llevarán a cabo varias simulaciones. Para ello considere el siguiente sistema y matrices de salida:

$$A = \begin{bmatrix} 1,005 & 0 & 0 \\ 0 & 0,9954 & -0,08757 \\ 0 & 0,1248 & 0,9945 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0], \quad C_2 = [0 \ 1 \ 0].$$

Los ruidos considerados son $Q = I_n \otimes 0,2$, $R_1 = 0,1$, $R_2 = 0,1$.

El sistema considerado cuenta con tres estados. El primero de ellos, x_1 es un estado con una dinámica inestable que se considera completamente desacoplado de los otros dos. Por otro lado, el segundo y tercer estados (x_2 y x_3) son una pareja de polos conjugados con una dinámica críticamente estable. El primer estado es observado por el primer agente mientras que el segundo observa el segundo y el tercero a través de las medidas de x_2 .

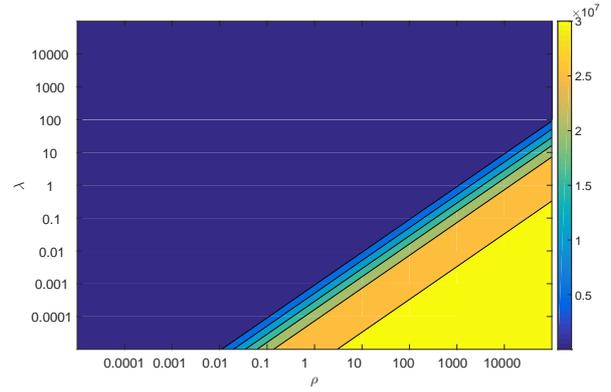


Figura 1: Efecto de los parámetros ρ y λ en el error de estimación.

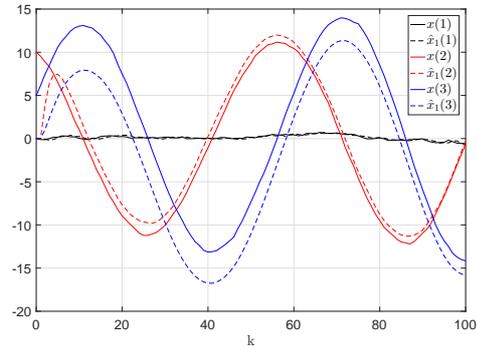


Figura 2: Evolución del estado y las estimaciones del agente 1 (en líneas discontinuas).

En la Figura 1 se muestra el efecto que tiene el ajuste de los parámetros δ y λ en el error de estimación de ambos agentes. Para ello, se han llevado a cabo varias simulaciones considerando el mismo vector de ruidos y variando los valores de estos escalares. En la figura se representa la suma del error de estimación cuadrático de cada agente para un horizonte temporal de 100 instantes:

$$e_{ac} = \sum_{k=1}^{100} \sum_{i=1}^2 \|e_i(k)\|^2.$$

Observe que para un valor constante de λ al aumentar el valor de δ el error crece bruscamente. Es decir, cuando se penaliza en gran medida la exactitud del modelo respecto a las medidas tomadas la calidad de la estimación empeora en gran medida. Sin embargo, para los parámetros de diseño considerados ($\delta = 1$ y $\lambda = 1$) el error de estimación es bajo.

Por último, con el fin de mostrar la robustez del estimador en la Figura 2 se muestra la evolución del sistema y del estimador implementado en el agente 1 (en líneas discontinuas).

En la figura se puede observar que el error de estimación en el primer estado decrece rápidamente mientras que el segundo estado tiene una dinámica algo más lenta. Por último el tercer estado es el último en converger ya que el agente no toma medidas directamente de él, sino que obtiene información acerca de éste a través de las lecturas de x_2 .

6. Conclusiones

Este artículo muestra una novedosa forma de analizar el problema de la estimación distribuida de una planta por una red de agentes. Gracias a la descomposición del estado por cada uno de los agentes en los subespacios observable y no observable, cada uno de ellos es capaz de diseñar una ganancia independiente para la parte del estado de la cual obtiene información por sus propias medidas y la parte que obtiene a través de consenso con el otro agente.

La principal novedad introducida en el artículo es el diseño de las ganancias del estimador a través de un algoritmo basado en programación lineal cuadrática. Para la elección de las matrices de pesos referentes al algoritmo basado en LQ se propone un diseño proporcional a las perturbaciones del sistema multiplicado por dos parámetros escalares. Dichos parámetros pueden ser ajustados por el usuario en función de su experiencia con el proceso, no siendo necesario conocimientos de control para ello.

Agradecimientos

Trabajo parcialmente financiado por AEI / FEDER (DPI-75294-CS-2-R, TEC2016-80242-P) y por el MCyT (DPI2013-44135-R).

Referencias

- [1] P. Millán A.R. del Nozal, L. Orihuela. Distributed consensus-based kalman filtering considering subspace decomposition. In *20th IFAC World Congress*, Toulouse, France, July 2017.
- [2] Gilles L. et al. Distributed kalman filtering compared to fourier domain preconditioned conjugate gradient for laser guide star tomography on extremely large telescopes. *Journal of the Optical Society of America*, 30(5):898–909, 2013.
- [3] P. Millán et al. Distributed implementation and design for state estimation. In *20th IFAC World Congress*, Toulouse, France, July 2017.
- [4] Hanly S.V. Ng B.L., Evans J.S. and Aktas D. Distributed dowlink beamforming with

cooperative base stations. *IEEE Transactions on Information Theory*, 54(12):5491–5499, 2008.

- [5] R. Olfati-Saber. Distributed Kalman filtering for sensor networks. In *46th IEEE Conference on Decision and Control*, pages 5492–5498, New Orleans, LA, USA, December 2007.
- [6] R. Olfati-Saber. Kalman-consensus filter: Optimality, stability, and performance. In *48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference*, pages 7036–7042, Shanghai, P.R. China, December 2009.
- [7] Chen S.Y. Kalman filter for robot vision: a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(11):4409–4420, 2012.
- [8] V. Ugrinovskii. Distributed robust filtering with H_∞ consensus of estimates. *Automatica*, 47(1):1–13, 2011.
- [9] V. Ugrinovskii. Distributed robust estimation over randomly switching networks using H_∞ consensus. *Automatica*, 49(1):160–168, 2013.
- [10] Ugrinovskii V. Allgöwer F. Wu J., Li L. Distributed filter design for cooperative h-infinity-type estimation. *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pages 1373–1378, 2015.