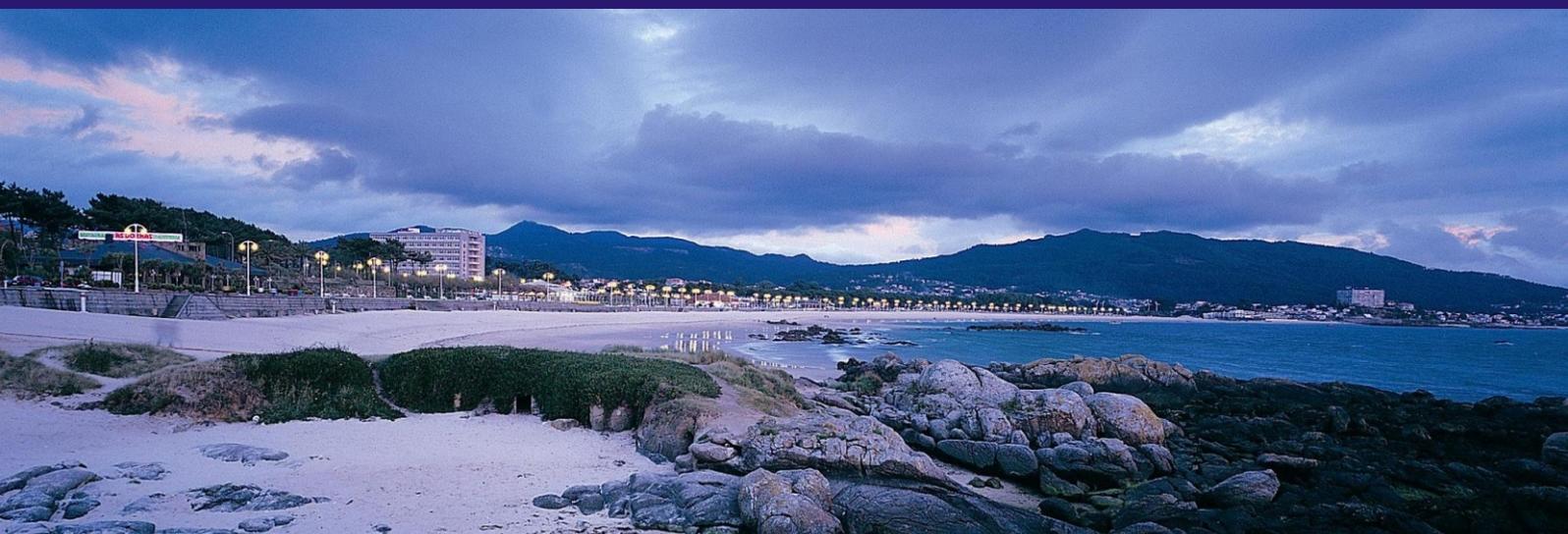




XXXIII Jornadas de Automática

Vigo, 5 al 7 de Septiembre de 2012



Actas de las
XXXIII Jornadas de Automática

Vigo, 5 al 7 de Septiembre de 2012



Organizan:

Universida deVigo



CEA
comité
español de
automática

Editado por:

Matías García Rivera

Rafael Sanz Domínguez

ISBN: 978-84-8158-583-4

Comités Organizador y Científico

Comité Organizador

- Rafael Sanz Domínguez, Universidad de Vigo, Presidente
- Armesto Quiroga, José Ignacio
- Barreiro Blas, Antonio
- Berea Cruz, Juan Manuel
- Camaño Portela, José Luis
- Delgado Romero, Emma
- Díaz-Cacho Medina, Miguel Ramón
- Pérez Losada, Diego
- Espada Seoane, Ángel
- García Rivera, Matías
- Garrido Campos, Julio
- López Fernández, Joaquín
- Marín Martín, Ricardo
- Moares Crespo, José María
- Paz Domonte, Enrique
- Rodríguez Diéguez, Amador
- Rodríguez Monzo, Miguel
- Saéz López, Juan
- Sotelo Martínez, José Manuel
- Vázquez Núñez, Fernando

Comité Científico

- César de la Prada (UVA), Presidente CEA
- Joseba Quevedo Casín (UPC), Vicepresidente CEA
- Miguel Ángel Mañanas Villanueva (UPC), Secretario CEA
- Pere Ridao Rodríguez (UdG), Automar
- Ramón Ceres Ruiz (CSIC-IAI), Bioingeniería
- José Manuel Andujar Márquez (UHU), Control Inteligente
- Óscar Reinoso García (UMH), Educación en Automática
- Francesc Xavier Blasco Ferragud (UPV), Ingeniería de Control
- Miguel Ángel Piera Eroles (UAB), Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos
- Alfonso García Cerezo (UMA), Robótica
- Alejandro Alonso Muñoz (UPM), Sistemas de Tiempo Real
- José María Martínez Montiel (UNIZAR), Visión por Computador

Contenido

Presentación	iii
Comités Organizador y Científico	v
Contenido	vii
Automar	1
<i>ORGANIZACIONES HOLÓNICAS MULTIAGENTE PARA RESOLVER MISIONES MEDIANTE ROBOTS MÓVILES;</i> A. Soriano, L. Marín, J. Gómez-Moreno, A. Valera, M. Vallés, A. Giret . . .	3
<i>CONTROL DE PROFUNDIDAD DE CUERPOS SUMERGIDOS BASADO EN CAMBIOS DE VOLUMEN;</i> J. A. Somolinos, A. López, L. R. Núñez, M. Espín, D. Díaz	13
<i>Proyecto RAUVI: Historia y Resultados;</i> J. J. Fernández, J. C. García, M. Prats, P. J. Sanz, D. Ribas, P. Ridaó, S. Wirth, G. Oliver	21
<i>DIAGNOSTICO POR TRANSFORMADA WAVELET DE VIBRACIONES MECÁNICAS EN APLICACIONES MARINAS;</i> Alberto De Miguel Catoira, Javier Romero Gómez, Rebeca Bouzón Otero, Manuel Romero Gómez	29
<i>PLANEADOR AUTÓNOMO SUBMARINO;</i> J. Barreiro, H. Pardo, E. García	39
Bioingeniería	45
<i>INTERFAZ MULTIMODAL BASADA EN LA COMBINACIÓN DE INFORMACIÓN OCULAR, CEREBRAL Y HÁPTICA PARA EL CONTROL DE UN BRAZO ROBOT;</i> Andrés Úbeda, Eduardo Iáñez, José M. Azorín, José M. Sabater, Carlos Pérez, Nicolás M. García	47
<i>CLASIFICADOR DE POTENCIALES DE ERROR ORIENTADO A LA DETECCIÓN DE LA INTENCIÓN DE MOVIMIENTO;</i> Joaquín López, Andrés Úbeda, Eduardo Iáñez, José M. Azorín, Francisco J. Gimeno, José M. Climent	53
<i>MobiDerm: UNA APLICACIÓN PARA MÓVILES PARA EL SEGUIMIENTO DE LA EVOLUCIÓN DE LUNARES Y OTRAS ALTERACIONES DERMATOLÓGICAS;</i> José F. Sigut Saavedra, Silvia Alayón Miranda, Monika D. Jarysz Chodowiecki, Adrián Brito Pacheco, José L. Sánchez de la Rosa, Francisco J. Fumero Batista, Vanesa Muñoz Cruz, Lorenzo Moreno	59

<i>CARACTERIZACIÓN DE LOS PATRONES DE MOVIMIENTO Y POSTURA ALTERADOS DE PERSONAS CON PARÁLISIS CEREBRAL DISCINÉTICA MEDIANTE UNA INTERFAZ INERCIAL PERSONA-COMPUTADOR;</i>	
R. Raya, E. Rocon, A. Clemotte, R. Ceres	67
<i>SISTEMA ROBÓTICO PARA TÉCNICAS DE CIRUGÍA DE PUERTO ÚNICO;</i>	
I. Rivas-Blanco, P. del Saz-Orozco, I. García-Morales, V.F. Muñoz	73
<i>Puesta en marcha de un fotobiorreactor industrial;</i>	
C. Rodríguez, I. Fernández, J. L. Guzmán, M. Berenguel, F.G. Acién	81
<i>DISEÑO DE UN CIRCUITO DE EMG Y APLICACIÓN EN EL CONTROL DE UNA MANO ROBÓTICA IMPRIMIBLE;</i>	
Álvaro Villoslada, Alejandro Escalante, Mohamed Abderrahim	89
<i>Estudio de la función sensoriomotora mediante el dispositivo robótico PUPArm;</i>	
Ana Llinares, Francisco J. Badesa, Ricardo Morales, Nicolás García-Aracil, J. M. Sabater, Carlos Pérez-Vidal, José María Azoín	97
<i>Diseño de una órtesis motorizada de tobillo para rehabilitación de ictus con un enfoque TOP-DOWN;</i>	
Guillermo Asín Prieto, Iván Collantes Vallar, Juan C. Moreno Sastoque, José Luis Pons Rovira	105
<i>INTEGRACIÓN DE UNA PLATAFORMA HÍBRIDA PARA REHABILITACIÓN Y COMPENSACIÓN FUNCIONAL DE LA MARCHA;</i>	
M. Bortole, J. L. Pons, E. Urendes	113
<i>Un modelo de controlador FES basado en sinergias musculares para la rehabilitación del equilibrio con exoesqueletos híbridos;</i>	
S. Piazza, D. Torricelli, F. Brunetti, A. J. del-Ama, A. Gil-Agudo, J. L. Pons	119
<i>ACTUADORES MULTIMODALES PARA COMPENSACIÓN DE LA MARCHA DE PERSONAS CON PATOLOGÍA NEUROLÓGICA;</i>	
Antonio J. del-Ama, Magdo Bortole, Andrés Garza-Cervantes, Juan C. Moreno, Ángel Gil-Agudo, José L. Pons	125
<i>ANÁLISIS DEL CONTROL CINEMÁTICO DE UN ROBOT ENDOSCÓPICO MODULAR HIPER-REDUNDANTE CON ACCIONAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO;</i>	
José L. González, Alberto Herreros, Juan C. Fraile, Javier P. Turiel, David de la Fuente, Rubén Alonso, Fernando Gayubo	133
<i>A platform for studying muscle selectivity in sFES;</i>	
Aikaterini D. Koutsou, Juan A. Gallego, José L. Pons, Eduardo Rocon	141
<i>INFLUENCIA DE LA DESCARGA PARCIAL DE PESO EN LA LATERALIDAD DE LA MARCHA HUMANA;</i>	
E. Urendes, M. Bortole, J. L. Pons, R. Ceres	149
<i>ANÁLISIS DE DATOS BIOMECÁNICOS PARA DETERMINAR EL GRADO DE PARTICIPACIÓN DEL PACIENTE DURANTE REHABILITACIÓN DE LA MARCHA ASISTIDA POR ROBOT;</i>	
I. Collantes, G. Asín, J. C. Moreno, J. L. Pons	155

<i>CUANTIFICACIÓN DEL ERROR INSTRUMENTAL EN EL ANÁLISIS CINÉMÁTICA CON SENSORES INERCIALES (MEMS);</i>	
Stefan G. Lambrecht, José Luis Pons	161
<i>MODELAMIENTO DE LA MARCHA HEMIPLÉJICA;</i>	
Lely Luengas, Giovanni Sánchez, Esperanza Camargo	165
Control Inteligente	171
<i>DISEÑO DE VIVIENDAS BIOSOLARES CON DOMÓTICA;</i>	
M. H. Alanbari, Jorge Verdú	173
<i>REDUCCIÓN DE LAS VIBRACIONES DE UN SISTEMA DE VISIÓN A BORDO DE UN HELICÓPTERO MEDIANTE UN CONTROLADOR INTELIGENTE;</i>	
G. Nicolás Marichal Plasencia, María Tomás Rodríguez, Pascual Campoy, Ángela Hernández López, Salvador Castillo Rivera	179
<i>Control óptimo en tiempo real de procesos térmicos en la industria alimentaria;</i>	
A. Arias-Méndez, A. A. Alonso, E. Balsa-Canto, N. Molina, C. Vilas	187
<i>DYNAMIC MODELLING OF HUMANOID ROBOTS USING SPATIAL ALGEBRA;</i>	
M. González-Fierro, D. Hernández García, P. Pierro, C. Balaguer	195
<i>Canales de Comunicación para Sistemas IEC61499 Basados en Componentes;</i>	
Federico Pérez, Elisabet Estévez, Fabian López, Dario Orive, Marga Marcos	203
Educación en Automática	213
<i>CONTROL AUTOMÁTICO CON HERRAMIENTAS INTERACTIVAS;</i>	
José Luis Guzmán, Ramon Costa-Castelló, Manuel Berenguel, Sebastián Dormido	215
<i>Automatización de instrumentos musicales: un proyecto integral de ingeniería industrial;</i>	
Joan Vallvé Navarro, Ramon Costa Castelló	223
<i>La USBLab y el Laboratorio remoto EJS+TwinCAT: dos herramientas de la UCM para el control de dispositivos reales;</i>	
Eva Besada-Portas, Jose A. Lopez-Orozco, Santiago Cifuentes, Jesus M. de la Cruz	231
<i>Una nueva librería para la docencia de robótica;</i>	
Arturo Gil, Óscar Reinoso, Miguel Juliá, David Úbeda, Lorenzo Fernández	239
<i>INICIO DE LA AUTOMATIZACIÓN DEL CÁLCULO. DEL ÁBACO AL ORDENADOR;</i>	
Juan Aurelio Montero Sousa, José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Héctor Quintian-Pardo	247
<i>INTRODUCCIÓN HISTÓRICA A LA AUTOMÁTICA. PRIMERA LECCIÓN DE FUNDAMENTOS DE AUTOMÁTICA;</i>	
Juan Aurelio Montero Sousa, José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Héctor Quintian-Pardo	253

<i>EXPOSICIÓN PARA ALUMNOS DE BACHILLER DE UNA PLANTA DE LABORATORIO DE CONTROL AUTOMÁTICO;</i>	
José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Héctor Quintian-Pardo, Manuel Romero Gómez	259
<i>PLATAFORMA DIDÁCTICA PARA LA EVALUACIÓN DE SENSORES TÁCTILES CAPACITIVOS;</i>	
José Ignacio Suárez, Jesús Lozano, Javier Vázquez	265
<i>Evaluación de la contribución del aprendizaje basado en proyectos a la adquisición de competencias en estudiantes de Ingeniería en Automática y Electrónica Industrial;</i>	
Jesús M. Gómez de Gabriel, J. Jesús Fernández Lozano, Alfonso J. García Cerezo	273
<i>DISEÑO Y CONTROL DE SISTEMA TÉRMICO A ESCALA DE LABORATORIO;</i>	
Javier Rico Azagra, Gabriel Sierra Somovilla, Gabriel Tobias García, Montserrat Gil Martínez	281
<i>CONTROL OPTIMIZADO DE NIVEL SOBRE UN SISTEMA DE TANQUES COMUNICANTES DE FLUIDOS;</i>	
Eduardo J. Moya de la Torre, Fco. Javier García Ruiz, Alberto de Domingo de la Rubia, Daniel San José Rodríguez	289
<i>"MeiA.": UN ENFOQUE METODOLÓGICO PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE SISTEMAS DE AUTOMATIZACIÓN;</i>	
A. Burgos, M. L. Alvarez, I. Sarachaga, E. Estévez, M. Marcos	297
<i>PROPUESTA DE MAQUETA DE BAJO COSTE PARA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE REGULACIÓN AUTOMÁTICA;</i>	
Ángela Baldán Martín, Juan Pazos Serrano	305
<i>Robot autobalanceante como proyecto didáctico colaborativo en Iberoamérica y como trabajo integrador de conocimiento;</i>	
R. Lebrón, A. Umeyama, F. Brunetti, J. C. Moreno, J. L. Pons	313
<i>Tecnología para dotar a los Laboratorios Virtuales y Remotos de funcionalidades de Evaluación Automática;</i>	
G. Farias, F. Gomez-Estern, L. De la Torre, D. Muñoz de la Peña, C. Sánchez, S. Dormido	319
<i>ENTORNO DIDACTICO REALISTA DE INTEGRACIÓN DE SISTEMAS DE FABRICACION SOBRE UN PROTOTIPO DE PLANTA INDUSTRIAL;</i>	
Julio Garrido Campos, Ricardo Marín Martín, Juan Sáez López, José Ignacio Armesto Quiroga	327
Ingeniería de Control	335
<i>ARQUITECTURA PLC-OPC-MATLAB PARA CONTROL BORROSO EN TIEMPO REAL DE ELECTROLIZADOR EN SISTEMA HÍBRIDO EÓLICO-SOLAR;</i>	
Isaías González Pérez, Antonio José Calderón Godoy, Manuel Calderón Godoy, Antonio Ramiro González	339
<i>CONTROL EN RED BASADO EN EVENTOS DE MÚLTIPLES PLANTAS REMOTAS;</i>	
María Guinaldo, José Sánchez, Sebastián Dormido, Manlio A. Delgado . . .	347

<i>CALIBRACIÓN AUTOMÁTICA DE BARRAS DE CONTROL EN UN REACTOR NUCLEAR UTILIZANDO LA INSERCIÓN EXPONENCIAL DE REACTIVIDAD;</i>	
José Luis Fernandez Marrón Juan Blázquez Martínez, José Miguel Barcala Riveira	355
<i>ESTRATEGIA DE CODISEÑO DE CONTROLADORES INFERENCIALES PARA SU IMPLEMENTACIÓN MEDIANTE SENSORES INALÁMBRICOS;</i>	
Ignacio Peñarrocha, Daniel Dolz, Julio Ariel Romero, Roberto Sanchis . . .	361
<i>CONTROL Y ADQUISICION DE DATOS DE UN FOTOBIORREACTOR MEDIANTE AUTOMATA PROGRAMABLE Y LABVIEW;</i>	
Salah Eddine Fril Allame, Juan Manuel Méndez Sánchez, Isaías González Pérez, Antonio José Calderón Godoy	369
<i>Control PVA aplicado a un quadrotor validado a través de un modelo de simulación multicuerpo;</i>	
Silvia Estellés Martínez, M. Tomás-Rodríguez	377
<i>IFAsyn y EIFAsyn: dos Filtros de Información para el Procesado Eficiente de Medidas Temporalmente Desordenadas ;</i>	
Eva Besada-Portas, José A. Lopez-Orozco, Jesus M. de la Cruz	383
<i>Coordinación de controladores NMPC en una red de oxígeno;</i>	
Rubén Martí, Daniel Sarabia, Cristina Marcos, César de Prada	391
<i>Control GPI-repetitivo de corriente en inversores en entornos con impedancia de red incierta;</i>	
German Andres Ramos Fuentes, John Alexander Cortés Romero, Ramon Costa Castelló	399
<i>Optimización multiarreglo en paralelo sobre GPU;</i>	
María Pereda García, Jesús M. Zamarreño	407
<i>Plataforma de desarrollo para la configuración del control empotrado en helicópteros quadrotor;</i>	
Laura Muñoz, Daniel Gómez, Emilio Asensi, Antoni Ruiz, Victor Peñacoba, Pedro García	413
<i>AJUSTE AUTOMÁTICO EN LAZO ABIERTO DEL REGULADOR DE UN HORNO DIDÁCTICO;</i>	
José Luis Casteleiro-Roca, José Luis Calvo-Rolle, Héctor Quintian-Pardo, Alberto De Miguel Catoira	421
<i>Estrategias de Control de pH para un Fotobiorreactor tipo Bolsa de Plano Vertical;</i>	
I. Fernández, C. Rodríguez, J. L. Guzmán, M. Berenguel, J. C. Moreno, M. C. Cerón	427
<i>La gestión óptima del canal de comunicaciones para la estimación implica un patrón de muestreo periódico?;</i>	
L. Orihuela, A. Barreiro, F. Gómez-Estern, F. R. Rubio	435
<i>CONTROL DE AEROGENERADORES MEDIANTE CONTROLADORES DEPENDIENTES DE LA VELOCIDAD Y TURBULENCIA DEL VIENTO;</i>	
D. Dolz, I. Peñarrocha, N. Aparicio, R. Sanchis	443
<i>Desarrollo y evaluación de una estación de control de tierra para vehículos aéreos no tripulados;</i>	
Jesús Velasco, Sergio García-Nieto, Gilberto Reynoso-Meza, Javier Sanchis	451

<i>CONTROL ROBUSTO DE PROCESO ATAD PARA MEJORAR LA CALIDAD DE FANGO TRATADO;</i>	
S. Nájera, M. Gil-Martínez, J. A. Zambrano, I. Irizar	457
<i>CONTROLADOR PI BASADO EN EVENTOS CON UMBRALES ADAPT-ABLES;</i>	
Julio A. Romero, Néstor J. Pascual, Ignacio Peñarrocha, Roberto Sanchis	463
<i>MONITORIZACIÓN DE CONTROLADORES PREDICTIVOS;</i>	
Diego García-Álvarez, Mario Francisco, María Jesús de la Fuente, Pastora Vega	471
<i>Sensor/Actuador de retardos de Internet para la operación de dispositivos remotos;</i>	
Miguel Díaz-Cacho Medina, Emma Delgado Romero, Matías García Rivera, Antonio Barreiro Blas	479
<i>MONITORIZACIÓN DE ESTADOS TRANSITORIOS MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES;</i>	
Diego García-Álvarez, Alejandro Merino, María Jesús de la Fuente	489
<i>AR Drone Identification and Navigation Control at CVG-UPM ;</i>	
J. Pestana, J. L. Sanchez-Lopez, I. Mellado-Bataller, Changhong Fu, P. Campoy	495
<i>Aplicación de Técnicas de Visualización para el Análisis del Consumo Eléctrico en Edificios;</i>	
Francisco J. García Fernández, Daniel Pérez López, Ignacio Díaz Blanco, Alberto B. Díez, Manuel Domínguez	503
<i>Modelado de un Sistema MIMO de Doble Rotor y Control Robusto QFT de Uno de sus Grados de Libertad;</i>	
Carlos Galilea Gil, Montserrat Gil Martínez	509
<i>CONTROL ROBUSTO QFT DE PLANTA EXPERIMENTAL DE MOTORES DE CORRIENTE CONTINUA;</i>	
David Lozano Delgado, Montserrat Gil-Martínez, Carlos Elvira Izurrategui	519
<i>CONTROL DE VISCOSIDAD BASADO EN MEDIDA VIRTUAL;</i>	
Ramón Ferreiro García, Javier Romero Gómez, Alberto De Miguel Catoira, Manuel Romero Gómez	527
<i>ESTRATEGIAS DE CONTROL PARA CICLOS BRAYTON CERRADOS DE PRODUCCIÓN DE POTENCIA;</i>	
Manuel Romero Gómez, Javier Romero Gómez, José Carbia Carril, Alberto De Miguel Catoira	533
<i>CONTROL AUTÓNOMO DE SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS DE UN VEHÍCULO CUATRIRROTOR;</i>	
Juan Manuel Herrero, Mireia Medrano Llop, Concepción Peiro Galbis, Carlos Peris Navarro, Ismael Vives Martí	541
<i>Control híbrido de una planta termo-solar de baja temperatura para la generación de agua caliente;</i>	
M. Pasamontes, J. D. Álvarez, J. L. Guzmán, E. F. Camacho, M. Berenguel	549
<i>OPERACIÓN ÓPTIMA DE UN PROCESO DE FANGOS ACTIVADOS MEDIANTE MPC NO LINEAL;</i>	
Pastora Vega, José M. Martín, Silvana Revollar, Mario Francisco, M.J. Fuente	557

Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos	565
<i>MODELADO DEL COMPORTAMIENTO DE CUERPOS SUMERGIDOS EN MANIOBRAS;</i>	
Amable López Piñeiro, José Andrés Somolinos Sánchez, Miguel Santamaría Romojaro, Fernando Robledo de Miguel, Carlos Arias Rodrigo	567
<i>ESTUDIO DEL MERCADO NACIONAL EN EL SECTOR DEL MUEBLE;</i>	
Zeltia Prego López, Jairo Paredes Menéndez, Nerea Prego López, Octavio Manuel Pereira Neto	575
<i>ESTUDIO DEL MERCADO AUTOMOVILÍSTICO;</i>	
Nerea Prego López, Zeltia Prego López, Jairo Paredes Menéndez, Octavio Manuel Pereira Neto	583
<i>SEPARACIÓN DE PARTÍCULAS EN UN ELECTROFILTRO BASADA EN LÓGICA BORROSA;</i>	
Jairo Paredes Menéndez, Zeltia Prego López, Nerea Prego López, Octavio Manuel Pereira Neto	591
<i>LAS INNOVACIONES EN LOS SISTEMAS MQL;</i>	
Octavio Manuel Pereira Neto, Jairo Paredes Menéndez, Nerea Prego López, Zeltia Prego López	597
<i>ANÁLISIS DINAMICO Y MODELADO DE SUSPENSIONES HOSSACK EN MOTOCICLETAS DE COMPETICION;</i>	
Ciro Moreno Ramírez, M. Tomás-Rodríguez, Simos A. Evangelou	605
<i>REDUCCIÓN DE MODELOS PARA CONTROL Y OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL: APLICACIÓN A SISTEMAS CON FRONTERA MÓVIL;</i>	
E. López-Quiroga, A. A. Alonso, C. Theodoropoulos	613
<i>MODELADO Y SIMULACIÓN DE SENSORES QUÍMICOS DE DIÓXIDO DE ESTAÑO PARA LA DETECCIÓN DE ETANOL;</i>	
F. J. Lozano Jaramillo, J. Lozano Rogado, J. I. Suárez Marcelo, J. M. Ordiales Solis	621
<i>MODELOS EFICIENTES PARA TAREAS DE CONTROL EN LÍNEA DURANTE LA REFRIGERACIÓN DE FRUTAS;</i>	
Diana Rivas, Carlos Vilas, Antonio A. Alonso, Fernando Varas	629
<i>OPTIMIZACIÓN EN TIEMPO REAL DE UN REACTOR QUÍMICO USANDO ADAPTACIÓN DE MODIFICADORES;</i>	
Daniel Navia, Gloria Gutiérrez, César de Prada	637
<i>REDES DE PETRI COLOREADAS DISYUNTIVAS APLICADAS A UNA TOMA DE DECISIONES EFICIENTE;</i>	
Juan Ignacio Latorre Biel, Emilio Jiménez Macías	645
<i>MODELADO DE UN PROCESO DE EXTRUSIÓN DE POLÍMEROS;</i>	
Eduardo J. Moya de la Torre, Alfonso Poncela, Vicente José Castro Peñas	653
<i>CALIBRADO DE MODELOS EN BIOLOGÍA DE SISTEMAS MEDIANTE BÚSQUEDA DISPERSA PARALELIZADA Y COOPERATIVA;</i>	
Alejandro Fernández Villaverde, Jose Alberto Egea, Julio Rodríguez Banga	661
<i>ACCESO A UN SIMULADOR ECOSIMPRO DESDE OPC/SCADA, MATLAB Y SIMULINK;</i>	
A. Rodriguez, L. F. Acebes, A. Merino, R. Mazaeda, C. de Prada	667

<i>METAHEURÍSTICAS PARA LA OPTIMIZACIÓN DINÁMICA MULTI-OBJETIVO DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES;</i>	
Víctor M. Ortiz-Martínez, Isabel Gracia, Jose A. Egea	673
<i>MODELO CAUSAL PARA LA SIMULACIÓN DE LA GESTION DEL TRÁFICO AÉREO (ATM) A NIVEL PRETÁCTICO Y ESTRATÉGICO;</i>	
Jenaro Nosedal Sánchez, Sergio Ruiz, Miquel Ángel Piera Eroles	681
Robótica	687
<i>SISTEMA AUTOMÁTICO DE RECARGA DE BATERÍAS PARA UN ROBOT MÓVIL EDUCACIONAL;</i>	
Sergio Rubio Rosa, Eduardo Zalama Casanova, Jaime Gómez García-Bermejo	689
<i>VERDINO, PROTOTIPO ELECTRICO DE VEHICULO AUTOGUIADO;</i>	
L. Acosta, J. Toledo, A. Hamilton, R. Arnay J. Espelosin, N. Morales, D. Perea, L. Moreno	697
<i>DISEÑO DE UN EFECTOR FINAL HIDRÁULICO DE DOBLE FUNCIÓN PARA EL ROBOT MÓVIL ALACRANE;</i>	
Jesús García, Jorge L. Martínez, Anthony Mandow, Alfonso García-Cerezo, Javier Serón	705
<i>CORRECCIÓN DE LA POSICIÓN MEDIANTE MARCAS PLANAS UTILIZANDO EL SENSOR IR DEL WIIMOTE;</i>	
Salvador Domínguez, Eduardo Zalama, Jaime Gómez García-Bermejo	711
<i>Búsqueda de caminos libres de colisiones para un sistema bimanual considerando la eliminación de obstáculos movibles;</i>	
Carlos Rodríguez, Andrés Montaña, Raúl Suárez	721
<i>IMPLETACIÓN DE UN ALGORITMO DE LOCALIZACIÓN BASADO EN UN MÉTODO DE MONTECARLO PARA UN ROBOT MOVIL OMIDIRECCIONAL;</i>	
J. Gómez-Moreno, A. Soriano, M. Vallés, A. Valera, M. Martínez	729
<i>ENSEÑANDO ROBÓTICA MÓVIL CON LABORATORIOS REMOTOS;</i>	
D. Chaos, J. Chacón, J. A. López-Orozco, S. Dormido-Bencomo, J. Aranda	737
<i>LOCALIZACIÓN MONTE CARLO A PARTIR DE LA APARIENCIA GLOBAL DE IMÁGENES OMNIDIRECCIONALES;</i>	
Lorenzo Fernández, Luis Payá, Mónica Ballesta, Francisco Amorós, Óscar Reinoso	743
<i>Coordinación Temporal de Dos Robots Manipuladores;</i>	
Andrés Montaña, Raúl Suárez	751
<i>RASMA: Plataforma para la Creación de Animaciones Stop-Motion con Asistencia Robótica;</i>	
David Cuenca, Iván Perea, Gabriel J. García, Jorge Pomares, Fernando Torres	759
<i>HUMANOID ROBOT SELF-LOCATION IN SPL LEAGUE;</i>	
Eduardo Munera, Manuel Muñoz, José Simó, Francisco Blanes	765
<i>DESARROLLO DE UN SISTEMA RASTREADOR DE OLORES PARA ROBOT MOVIL;</i>	
I. Sáenz del Castillo González, J. Lozano Rogado, J. I. Suárez Marcelo, J. M. Ordiales Solis	773

<i>PARÁMETROS DE DISEÑO EN PINZAS ROBÓTICAS FLEXIBLES;</i> Andres S. Vázquez, Javier J. Jiménez, Jesús Chico, Ismael Payo	779
<i>Diseño CAD/CAM de un prototipo de dedo para una mano antropomórfica accionada por servomotores;</i> Damián Mira Martínez, Santiago T. Puente Méndez, Fernando Torres Medina	789
<i>DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO PARA LA DETECCIÓN DE PIEZAS DEFECTUOSAS POR FALLOS EN EL CORDÓN DE ADHESIVO;</i> Diego Pérez Losada, Joaquín López Fernández, Enrique Paz Domonte, Rafael Sanz	797
<i>MODELADO Y SIMULACIÓN DE BRAZOS ROBÓTICOS CON BLENDER Y PYTHON;</i> Adolfo Sánchez Hermosell, J. Álvaro Fernández Muñoz	805
<i>DISEÑO DE UN ACTUADOR PARA PINZA ROBÓTICA BASADA EN UN SMA;</i> Francisco Javier Tormo, Jaime Masiá, Juan Ramón Rufino, José Ferri, Borja Mansilla	813
<i>SLAM con Marcadores de Realidad Aumentada;</i> Miguel Juliá, Lorenzo Fernández, Luis Payá, José M. Marín, Arturo Gil, Óscar Reinoso	819
<i>Vuelos de planeadores autónomos no tripulados en misiones cooperativas mediante aprovechamiento de energía de térmicas;</i> D. Alejo, J. A. Cobano, G. Heredia, A. Ollero	825
<i>INSTRUMENTO QUIRÚRGICO DE SUTURA PARA ANASTOMOSIS AUTOMÁTICA DEL TUBO DIGESTIVO;</i> José Antonio Tornero, Raúl Suárez, Francesc Cano, Andrés Montaña, Manuel López Cano	833
<i>Algoritmo para la secuenciación en el ensamblaje de estructuras mediante robots;</i> S. Vera, I. Maza, A. Ollero	839
Tiempo Real	847
<i>Arquitectura de Supervisión y Control en Tiempo Real de un vehículo Fórmula Student Eléctrico;</i> Sara Mata, Asier Zubizarreta, Eva Portillo, Itziar Cabanes, Dario Orive, Marga Marcos, Charles Pinto	849
<i>ARQUITECTURA MULTI-CONTROLADOR CON TRANSFERENCIA SIN SALTO PARA PROCESOS CON CONMUTACIÓN DE MODOS;</i> Nagore Iriondo, Elisabet Estévez, Marga Marcos	859
<i>APLICACIONES AVANZADAS PARA LA AUTOMATIZACIÓN EN LA INDUSTRIA DE SEMICONDUCTORES;</i> Manuel J. Moreno Lizaranzu, Federico Cuesta Rojo	867
<i>Sistemas particionados de control;</i> J. Simó, P. Balbastre, S. Peiró, M. Masmano, A. Crespo	873
<i>CARACTERÍSTICAS DE ZIGBEE EN TELEMETRÍA DE UN QUADROTOR;</i> Ramón A. García, Francisco R. Rubio	879

<i>MONITORIZACIÓN AUTOMÁTICA EN TIEMPO REAL DE EQUIPOS DE PRUEBA DE SEMICONDUCTORES ;</i>	
Manuel J. Moreno Lizaranzu, Federico Cuesta Rojo	887
<i>MANTENIMIENTO REMOTO PARA MAQUINAS DE CORTE DE PIEDRA HECHAS A MEDIDA ;</i>	
Julio Garrido Campos, Ricardo Marín Martín, Juan Sáez López, José Ignacio Armesto Quiroga	893
<i>MODELO EN ECOSIMPRO DE CAPTADOR SOLAR FRESNEL;</i>	
J. M. Torres, A. J. Gallego, J. M. Escaño, C. Bordons	901
Visión por Computador	907
<i>Método General de Segmentación de Imágenes Basado en una Distancia Pseudométrica para Definir Vecindarios de Píxeles;</i>	
José F. Sigut Saavedra, Francisco J. Fumero Batista, Silvia Alayón Miranda, Manuel González de la Rosa, Marta González-Hernández, José L. Sánchez de la Rosa, Lorenzo Moreno	909
<i>Vitality assessment of boar sperm using N Concentric Squares resized and Local binary pattern in gray scale images;</i>	
Óscar García-Olalla, María Teresa García-Ordás, Diego García-Ordás, Laura Fernández-Robles, Enrique Alegre	919
<i>SVM APPROACH TO CLASSIFY BOAR ACROSOME INTEGRITY OF A MULTI-FEATURES SURF DESCRIPTION;</i>	
Laura Fernández-Robles, Óscar García-Olalla, María Teresa García-Ordás, Diego García-Ordás, Enrique Alegre	925
<i>DETECCIÓN DE SUELO Y PAREDES CON VISIÓN MONOCULAR PARA NAVEGACIÓN POR INTERIORES;</i>	
J. Omedes, G. López-Nicolás, J. J. Guerrero	931
<i>Reconocimiento de manos con sensor RGB-D;</i>	
Carlos M. Mateo, Pablo Gil, Santiago T. Puente, Fernando Torres	939
<i>Boar spermatozoa classification using local invariant features and bag of words;</i>	
María Teresa García-Ordás, Laura Fernández-Robles, Óscar García-Olalla, Diego García-Ordás, Enrique Alegre	947
<i>Detección de Peatones para Sistemas de Asistencia a la Conducción;</i>	
Daniel Olmeda, Basam Musleh, Fernando García, José María Armingol, Arturo de la Escalera	953
<i>EVALUATION OF SEGMENTATION METHODS APPLIED TO INTACT AND DAMAGED ACROSOMES OF BOAR SPERMATOZOON HEADS;</i>	
Eduardo Fidalgo, Javier de Pedro, Laura Fernández-Robles, María Teresa García-Ordás, Enrique Alegre	959
<i>RECONSTRUCCIÓN PRECISA DE INTERIORES CON ESCÁNER 3D Y TECNOLOGÍAS RFID;</i>	
Enrique Valero, Antonio Adán, Carlos Cerrada	967
<i>DISEÑO DE SOFTWARE PARA EL CONTROL DE DISPOSITIVOS EN APLICACIONES DE VISIÓN POR COMPUTADOR;</i>	
Juan Manuel Muñoz Lobato, Alejandro Hidalgo Paniagua, Santiago Salamanca Miño, Pilar Merchán García	977

*CONSTRUCCIÓN DE MAPAS ÓPTICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN
DEL FONDO MARINO;*

Ricard Prados, Rafael Garcia, Nuno Gracias, Pere Ridao, Javier Escartín,
László Neumann 985

*USO DE DESCRIPTORES DE APARIENCIA GLOBAL EN TAREAS
DE CONSTRUCCIÓN DE MAPAS Y LOCALIZACIÓN;*

Francisco Amorós, Luis Payá, Óscar Reinoso, Luis M. Jiménez 993

*SISTEMA DE SEGURIDAD LABORAL BASADO EN VISIÓN ARTIFI-
CIAL PARA MÁQUINA DE CORTE POR PLASMA / OXIGÁS;*

M. Dolores Moreno Rabel, J. Álvaro Fernández Muñoz 1003

Índice de Autores **1011**



SLAM con Marcadores de Realidad Aumentada

Miguel Juliá, Lorenzo Fernández, Luis Payá, José M. Marín, Arturo Gil, Oscar Reinoso
 Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática,
 Universidad Miguel Hernández,
 Avda. Universidad s/n, Edif Quorum V,
 03202 - Elche (Alicante), España,
 mjulia@umh.es

Resumen

En este artículo se presenta el desarrollo de un sistema de localización y mapeado simultáneo (SLAM) empleando una única cámara. Dicho sistema emplea un filtro de Kalman extendido (EKF) usando la posición de marcadores de realidad aumentada como características visuales. Como novedad presentamos una técnica para determinar el error cometido en la obtención de la pose de los marcadores de realidad aumentada empleando la transformada unscented. El sistema se ha implementado y probado experimentalmente usando un robot Pioneer 3AT de Adept Mobile Robots con una arquitectura basada en ROS mostrando la validez del sistema.

Palabras clave: SLAM, EKF, Marcadores de Realidad Aumentada, Transformada Unscented.

1. Introducción

Durante los últimos años se han desarrollado numerosas técnicas de SLAM basadas en marcas o características [2] [4]. Dichas técnicas tratan de determinar la localización de un robot móvil sin tener un mapa previo empleando ciertas características del entorno como referencia. De este modo, a medida que el robot se mueve la posición de dichas características se guarda en un mapa que se va generando on-line y que se emplea simultáneamente para determinar la pose del robot. Para este cometido, son comunes las técnicas basadas en filtros de Kalman [2] y las técnicas basadas en filtros de partículas [4].

Sin embargo, todas ellas tienen un problema en común, la necesidad de realizar una correcta asociación de datos entre las nuevas características que se observan y las que han sido almacenadas en el mapa. En general, una mala asociación de datos afecta significativamente a los algoritmos de SLAM provocando en muchos casos errores importantes en la localización. Algunas técnicas son más sensibles que otras ante una mala asociación de datos.

En este ámbito, al estudiar las técnicas de SLAM

es importante identificar que errores provienen de una incorrecta asociación de datos y cuales son inherentes al propio algoritmo. En este sentido, es sumamente útil poder emplear características que permitan una correcta asociación de datos. Se han empleado diversos tipos de características en los algoritmos de SLAM, tales como esquinas o líneas identificadas con sensores láser, puntos característicos junto con sus descriptores visuales en imágenes captadas por un par estéreo como, por ejemplo, puntos SIFT o SURF [1], y en ocasiones también marcas artificiales. A pesar de que el uso de marcas artificiales no es lo ideal dado que es necesario modificar el entorno, resultan muy interesantes ya que ofrecen una mayor robustez para la asociación de datos que las características naturales.

Los marcadores usados para aplicaciones de realidad aumentada son un buen ejemplo de características artificiales que permiten una robusta asociación de datos. Este tipo de marcadores de realidad aumentada se han aplicado ya al problema del SLAM [8], [10]. Estos marcadores consisten en un cuadro negro sobre un fondo blanco en cuyo interior hay grabada una figura que permite identificar de forma única dicho marcador (Ver Figura 1). Existen varias librerías de código abierto que permiten obtener la pose de este tipo de marcadores así como su identificador. Sin embargo, dado que emplean diversas técnicas de optimización no lineales es complejo determinar el error asociado a dicha pose.

La principal novedad de este artículo es una nueva técnica de determinación del error en la estimación de la pose de marcadores de realidad aumentada basada en la transformada unscented. Empleando dicha técnica la poses de los marcadores con su error asociado se integran en un EKF.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera. La Sección 2 describe la arquitectura global empleada en el sistema de SLAM, la Sección 3 presenta la técnica empleada para la detección y la determinación del error de los marcadores de realidad aumentada. A continuación, la Sección 4 describe el algoritmo de SLAM basado en EKF. Por último, la Sección 5 muestra los experimentos

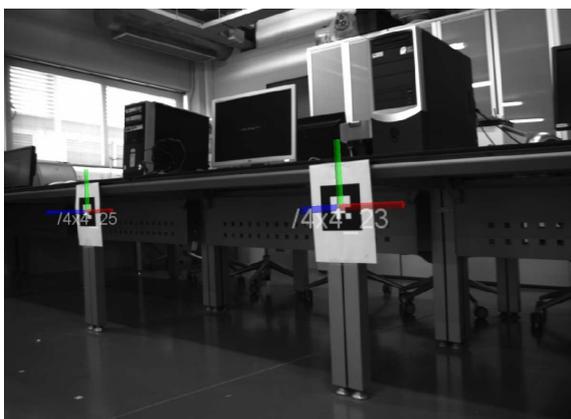


Figura 1: Marcadores de realidad aumentada detectados en una imagen.

llevados a cabo para probar el sistema y la Sección 6 detalla las conclusiones y futuras líneas de investigación.

2. Descripción del sistema

El sistema diseñado consta de un robot móvil de tracción diferencial modelo Pioneer P3AT de Adept Mobile Robots equipado con una cámara Videre, un sensor láser SICK LMS200, odometría, y ordenador embarcado. Todo el sistema funciona bajo Linux y está implementado sobre la plataforma ROS (Robot Operative System) [9]. La figura 2 muestra la arquitectura implementada.

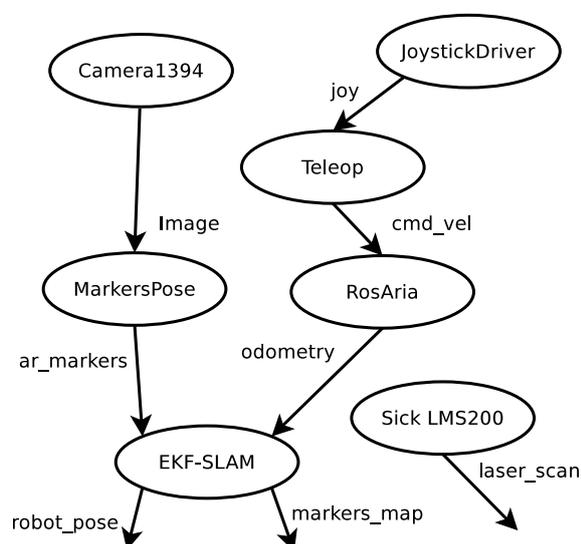


Figura 2: Descripción de la arquitectura diseñada en ROS.

El robot se mueve de forma teleoperada dando comandos a la interfaz RosAria que controla los motores. Además, la interfaz RosAria publica las lecturas de odometría de la plataforma. La cámara Videre graba imágenes con una resolución de 640

x 480. El nodo MarkerPose se emplea para analizar dichas imágenes detectando y obteniendo la pose de múltiples marcadores. Dicho nodo emplea la librería ARToolKit¹. Además calcula el error asociado a la estimación de la pose de cada marcador. La odometría y la pose de los marcadores junto con su error se fusionan en el nodo EKF-SLAM. Este nodo genera un mapa de marcadores y localiza al robot en el mismo.

3. Pose y error de los marcadores

Existen varias librerías que permiten la localización de marcadores de realidad aumentada utilizando una única cámara. Entre ellas destacan ARToolKit y ARToolKitPlus. Se ha elegido ARToolKit porque existe una interfaz disponible en ROS. ARToolKit tiene dos funciones principales. En primer lugar permite detectar los marcadores que aparecen en una imagen. Esa función permite obtener las esquinas de los marcadores detectados y las ecuaciones de las líneas que los conectan. Además, empleando una transformación de perspectiva, compara cada marcador en la imagen con una base de datos de patrones con el fin de determinar el identificador de cada patrón. A continuación, conociendo mediante calibración previa la matriz fundamental de la cámara y los parámetros de distorsión, ARToolKit calcula la pose de cada marcador empleando un optimizador recursivo no lineal [7]. Determinar el error cometido en la estimación de dicha pose no es trivial dada la complejidad del optimizador recursivo no lineal. De hecho, la librería no evalúa este dato.

Freeman *et al.* [3] propusieron utilizar la transformada unscented [6] para determinar el error asociado a la pose de los marcadores. Para ello, Freeman *et al.* consideraron la incertidumbre asociada a la detección de las esquinas de los marcadores. De este modo, empleando la transformada unscented se puede determinar el error asociado a la detección de las esquinas.

Sin embargo, dicho error asociado a la posición de las esquinas en la imagen no es la única fuente de error para determinar la pose. De hecho, la incertidumbre asociada a los parámetros de calibración de la cámara tiene un papel muy importante en la incertidumbre real de la pose. Por este motivo, hemos considerado importante extender la propuesta de Freeman *et al.* [3] considerando también los errores en escalado (en relación con la distancia focal y el tamaño del marcador) y los errores asociados a la determinación del centro óptico en la imagen. Incorporando esta información se obtiene un modelo mucho más preciso del error real come-

¹<http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>

tido en la estimación de la pose de los marcadores.

Por lo tanto, a continuación se explica el proceso de determinación de la incertidumbre asociada a la pose de los marcadores. En primer lugar empleando ARToolkit se determinan las esquinas de los marcadores presentes en la escena. Con las esquinas devueltas por ARToolkit junto con los parámetros de calibración construimos un conjunto de puntos sigma. Para cada uno de dichos puntos llamamos al optimizador recursivo no lineal que obtiene la pose del marcador. Finalmente, la media y la covarianza de la pose se determinan estadísticamente. Este proceso se explica detalladamente a continuación.

La transformación no lineal $\mathbf{z} = f(\mathbf{y})$ que vamos a analizar empleando la transformada unscented resuelve la pose del marcador a partir de las coordenadas de las cuatro esquinas $(p_x^1, p_y^1), (p_x^2, p_y^2), (p_x^3, p_y^3), (p_x^4, p_y^4)$, el lado del marcador d , y los parámetros de calibración de la cámara f_x, f_y, c_x, c_y . Por lo tanto, tenemos un vector de entrada de 13 dimensiones. Se puede reducir a 11 considerando d, f_x , y f_y como un único factor de escala δ . Por lo tanto, nuestra transformación no lineal tiene como vector de entrada $\mathbf{y} = [p_x^1, p_y^1, p_x^2, p_y^2, p_x^3, p_y^3, p_x^4, p_y^4, c_x, c_y, \delta]^\top$ de dimensión $L = 11$ y vector de salida de 6 variables $\mathbf{z} = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^\top$ que representa la posición y los ángulos de Euler correspondientes a la pose del marcador respecto de la cámara.

De este modo procedemos a aplicar la transformada unscented. En primer lugar se determinan los $2L + 1$ puntos sigma:

$$\mathcal{Y}_i = \begin{cases} \bar{\mathbf{y}} & i = 0 \\ \bar{\mathbf{y}} + \left(\sqrt{(L + \lambda) \mathbf{P}_y} \right)_i & i = 1, \dots, L \\ \bar{\mathbf{y}} - \left(\sqrt{(L + \lambda) \mathbf{P}_y} \right)_{i-L} & i = L + 1, \dots, 2L \end{cases} \quad (1)$$

donde \mathbf{P}_y es una matriz diagonal con la varianza de cada una de las variables de entrada, y $\lambda = \alpha^2(L + \kappa) - L$. Empleamos $\alpha = 1$ y $\kappa = 0$. Para construir la matriz \mathbf{P}_y se emplean los valores de covarianza $\sigma_p^2 = 2$ para las esquinas, $\sigma_c^2 = 10$ para las coordenadas del centro óptico, y $\sigma_\delta^2 = 7$ para el factor de escala que para mayor sencillez aplicamos únicamente sobre el tamaño del patrón.

Para cada uno de los puntos sigma se aplica la función no lineal $\mathbf{z} = f(\mathbf{y})$ para determinar la pose:

$$\mathcal{Z}_i = f(\mathcal{Y}_i), i = 0, \dots, 2L \quad (2)$$

Finalmente se determinan la media y la covarianza de la transformación:

$$\bar{\mathbf{z}} \approx \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(m)} \mathcal{Z}_i \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_z \approx \sum_{i=0}^{2L} W_i^{(c)} \{\mathcal{Z}_i - \bar{\mathbf{z}}\} \{\mathcal{Z}_i - \bar{\mathbf{z}}\}^\top \quad (4)$$

empleando los pesos:

$$\begin{aligned} W_0^{(m)} &= \lambda / (L + \lambda) \\ W_0^{(c)} &= \lambda / (L + \lambda) + (1 - \alpha^2 + \beta) \\ W_i^{(m)} &= W_i^{(c)} = 1 / \{2(L + \lambda)\}, i = 1, \dots, 2L \end{aligned} \quad (5)$$

donde el parámetro $\beta = 2$ es óptimo para distribuciones gaussianas.

En general el error evaluado mediante este procedimiento se ajusta mejor al error real que el propuesto en [3] y por lo tanto puede ser empleado en una aplicación de SLAM con las ventajas que ello supone para la asociación de datos.

4. EKF SLAM

A continuación la pose de los marcadores se fusiona con la odometría en un sistema de SLAM empleando un EKF. Para la asociación de datos entre el mapa que se crea y las nuevas marcas se emplea el identificador del marcador. La posición del marcador junto con su identificador ofrecen un sistema de asociación de datos muy robusto. A continuación se detalla el sistema de EKF-SLAM.

El estado consta de la pose del robot así como de la pose de los marcadores. Para simplificar el modelo se pueden colocar todos los marcadores en posición vertical y considerar únicamente la orientación del marcador reduciendo así de 6 a 4 las dimensiones en la pose de los marcadores. Así tendremos la pose $\hat{\mathbf{x}}_i = [\hat{x}_i^x, \hat{x}_i^y, \hat{x}_i^z, \hat{x}_i^\theta]^\top$ para el marcador i . La pose del robot se modela mediante posición y orientación $\hat{\mathbf{x}}_r = [\hat{x}_r^x, \hat{x}_r^y, \hat{x}_r^\theta]^\top$. El estado completo y su matriz de covarianza queda de la siguiente forma:

$$\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}_r \\ \hat{\mathbf{x}}_m \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_r & \mathbf{P}_{rm} \\ \mathbf{P}_{rm}^\top & \mathbf{P}_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

siendo $\hat{\mathbf{x}}_m$ un vector con todos los marcadores en el mapa.

El EKF integra las nuevas medidas en dos etapas. En primer lugar está la etapa de predicción donde se hace una predicción del estado $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}$ para el instante k con matriz de covarianza $\mathbf{P}_{k|k-1}$. Para ello se considera el modelo de movimiento del robot a partir del estado anterior $\mathbf{x}_{k-1|k-1}$ y la variación de odometría \mathbf{u}_k^Δ . Los marcadores se

consideran estáticos:

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_k^\Delta) \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1|k-1}\mathbf{F}^\top + \mathbf{J}\mathbf{Q}_k^\Delta\mathbf{J}^\top \quad (9)$$

Aquí \mathbf{Q}_k^Δ es la matriz de ruido de la odometría y \mathbf{F} y \mathbf{J} son las matrices jacobianas del modelo de movimiento del robot $f(\hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1}, \mathbf{u}_k^\Delta)$ respecto de la pose del robot y de la odometría respectivamente.

Posteriormente, las nuevas medidas con las poses de los marcadores \mathbf{z}_k en la última imagen capturada son incorporadas en la etapa de actualización. Aquí se encuentra el proceso de asociación de datos entre las nuevas observaciones y los marcadores ya presentes en el estado.

En primer lugar se filtran nuevas medidas empleando el valor de confianza que devuelve AR-ToolKit en cuanto al identificador y también exigiendo que las medidas cumplan ciertas condiciones como que estén en determinado rango de distancias o que estén en una orientación aproximadamente vertical. A continuación, para realizar la asociación de datos, procederemos exigiendo que los identificadores sean los mismos y que la distancia de Mahalanobis entre la observación y la observación esperada a partir del modelo de observación sobre el estado predicho $h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$ esté por debajo de un determinado umbral. En caso de haber varios marcadores que cumplan ambas condiciones se realiza la asociación que tenga la menor distancia de Mahalanobis. Si no cumplen las condiciones para asociación de datos se añade una nueva marca ampliando el vector de estado.

Para actualizar el estado con observaciones que se han podido asociar con marcadores en el mapa procedemos de la siguiente forma. Dada la observación predicha a partir de la transformación de coordenadas globales a coordenadas de cámara $h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1})$, se evalúa el vector de innovación $\tilde{\mathbf{v}}_k$ junto con su matriz de covarianza \mathbf{S}_k .

$$\tilde{\mathbf{v}}_k = \mathbf{z}_k - h(\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1}) \quad (10)$$

$$\mathbf{S}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^\top + \mathbf{P}_{z_k} \quad (11)$$

donde \mathbf{H} es la matriz jacobiana asociada al modelo de observación y \mathbf{P}_{z_k} es el error de la observación que se ha obtenido mediante el proceso explicado en la Sección 3.

A continuación se calcula la ganancia del filtro \mathbf{K}_k y se actualiza el estado $\hat{\mathbf{x}}_{k|k}$ y su covarianza $\mathbf{P}_{k|k}$.

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1}\mathbf{H}_k^\top\mathbf{S}_k^{-1} \quad (12)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k\tilde{\mathbf{v}}_k \quad (13)$$

$$\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{P}_{k|k-1} \quad (14)$$

Para ampliar el estado con marcadores nuevos que no se han asociado con ninguno previamente en el mapa se procede de la siguiente forma:

$$\hat{\mathbf{x}}_{aum} = \begin{bmatrix} \hat{x}_r \\ \hat{x}_m \\ g(\mathbf{z}_k) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{P}_{aum} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_r & \mathbf{P}_{rm} & \mathbf{P}_r\mathbf{G}_{x_r}^\top \\ \mathbf{P}_{rm}^\top & \mathbf{P}_m & \mathbf{P}_{rm}^\top\mathbf{G}_{x_r}^\top \\ \mathbf{G}_{x_r}\mathbf{P}_r & \mathbf{G}_{x_r}\mathbf{P}_{rm} & \mathbf{G}_{x_r}\mathbf{P}_r\mathbf{G}_{x_r}^\top + \mathbf{G}_z\mathbf{P}_{z_k}\mathbf{G}_z^\top \end{bmatrix} \quad (16)$$

donde $g(\mathbf{z}_k)$ representa el modelo de observación inverso que transforma la pose de un marcador de coordenadas de cámara a coordenadas globales, siendo \mathbf{G}_{x_r} y \mathbf{G}_z las matrices jacobianas asociadas a dicha transformación respecto de la pose del robot y de la observación respectivamente.

5. Experimentos

La arquitectura descrita en la Sección 2 que implementa los procesos descritos en las Secciones 3 y 4 se ha probado en un robot Pioneer P3AT. Se han realizado diversas pruebas en nuestro laboratorio distribuyendo una serie de marcadores de realidad aumentada en el mismo. Durante los experimentos el robot es teleoperado a lo largo del laboratorio. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

La Figura 3 muestra la superposición de los marcadores detectados (en rojo) sobre un mapa de ocupación del laboratorio contruido mediante SLAM con los datos del laser [5]. En general los marcadores son situados correctamente y la localización del robot mejora la proporcionada por la odometría.

Durante los experimentos se ha verificado que el sistema de asociación de datos nunca comete falsos positivos. Tan solo se cometen en ocasiones falsos negativos cuando los marcadores están muy alejados causados por un identificador incorrecto. Se puede reducir el número de falsos negativos siendo muy exigente con el umbral del valor de confianza del identificador, sin embargo, esto puede llegar a reducir en gran manera el número de marcas empleadas. En general los falsos negativos aunque amplían innecesariamente el estado no conducen a error en la determinación de la posición.

6. Conclusiones

En este artículo se ha presentado un sistema de SLAM empleando una única cámara. Para ello se ha mostrado como el uso de marcadores de realidad aumentada supone numerosas ventajas a la hora de la asociación de datos. Se ha hecho uso

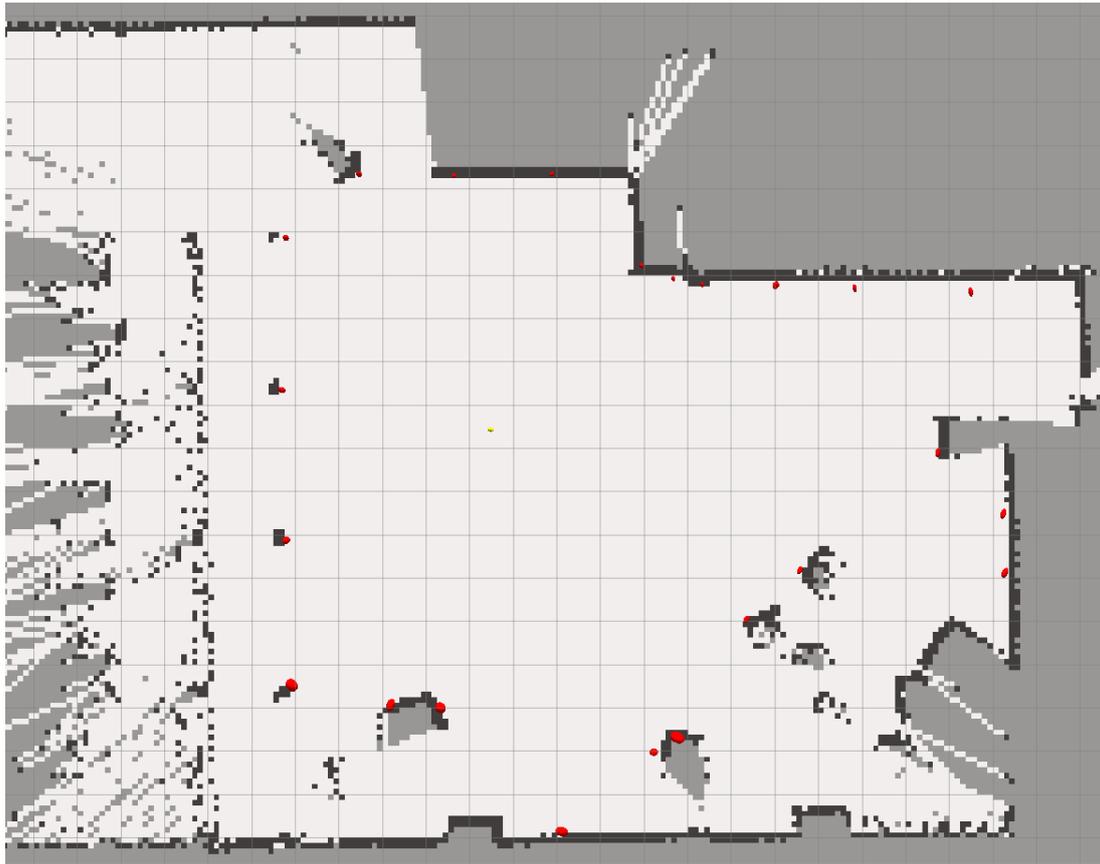


Figura 3: Mapa de marcadores superpuesto sobre el mapa de ocupación.

de la librería ARToolKit para detectar y estimar la pose de marcadores. Mediante la transformada unscented se ha propuesto un nuevo sistema para estimar el error cometido en la estimación de las poses de los marcadores que se ajusta mejor al error real que los métodos existentes. Dichas medidas se han integrado en un sistema de SLAM basado en un EKF. El sistema se ha implementado y probado experimentalmente usando un robot Pioneer P3AT de Adept Mobile Robots con una arquitectura basada en ROS. Diversos experimentos muestran la validez del sistema presentado en este artículo.

Como trabajos futuros se pretende ampliar este sistema para ser utilizado simultáneamente con múltiples robots. Además también se sustituirá la teleoperación por un sistema de exploración del entorno autónomo que coordine el movimiento de los robots.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el Gobierno de España (Ministerio de Ciencia e Innovación) a través del proyecto DPI2010-15308, “Exploración Integrada de Entornos mediante Robots Cooperativos para la Creación de Mapas 3D Visuales y Topológicos que puedan ser usados en Navegación

con 6 Grados de Libertad”.

Referencias

- [1] M. Ballesta, A. Gil, O. Reinoso, and O. Martinez-Mozos. Evaluation of interest point detectors for visual SLAM. *Int. Journal of Factory Automation, Robotics and Soft Computing*, 2008-4:86–95, 2008.
- [2] M.W.M.G. Dissanayake, P. Newman, S. Clark, H.F. Durrant-Whyte, and M. Csorba. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 17(3):229–241, June 2001.
- [3] R.M. Freeman, S.J. Julier, and A.J. Steed. A method for predicting marker tracking error. In *Mixed and Augmented Reality, 2007. ISMAR 2007. 6th IEEE and ACM International Symposium on*, pages 157–160. Ieee, 2007.
- [4] A. Gil, O. Reinoso, M. Ballesta, M. Juliá, and L. Payá. Multi-robot visual SLAM using a Rao-Blackwellized particle filter. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(1):68–80, 2010.
- [5] Cyrill Stachniss Giorgio Grisetti and Wolfram Burgard. Improved techniques for grid

- mapping with rao-blackwellized particle filters. *Transactions on Robotics*, 23(1):34–46, 2006.
- [6] S.J. Julier and J.K. Uhlmann. Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceedings of the IEEE*, 92(3):401–422, 2004.
- [7] H. Kato and M. Billinghurst. Marker tracking and hmd calibration for a video-based augmented reality conferencing system. In *Augmented Reality, 1999. (IWAR'99) Proceedings. 2nd IEEE and ACM International Workshop on*, pages 85–94. IEEE, 1999.
- [8] H. Lim and Y.S. Lee. Real-time single camera slam using fiducial markers. In *ICCAS-SICE, 2009*, pages 177–182. IEEE, 2009.
- [9] M. Quigley, B. Gerkey, K. Conley, J. Faust, T. Foote, J. Leibs, E. Berger, R. Wheeler, and A. Ng. ROS: an open-source Robot Operating System. In *International Conference on Robotics and Automation*, 2009.
- [10] T. Yamada, T. Yairi, S.H. Bener, and K. Machida. A study on slam for indoor blimp with visual markers. In *ICCAS-SICE, 2009*, pages 647–652. IEEE, 2009.