

ACTAS

DE LAS

XXXVIII Jornadas de Automática

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



Universidad de Oviedo
Universidá d'Uviéu
University of Oviedo



CEA
*Comité Español
de Automática*

Colabora

Gijón

Convention Bureau

Actas de

XXXVIII

Jornadas de Automática

© 2017 Universidad de Oviedo
© Los autores

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

DL AS 2749-2017

ISBN: 978-84-16664-74-0

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

Prefacio

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

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

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

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

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

Gijón, septiembre de 2017

Hilario López
Presidente del Comité Organizador

Program Committee

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

Daniel Pérez	University of Oviedo
Emilio Pérez	Universitat Jaume I
Juan Pérez Oria	Universidad de Cantabria
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 Rodriguez-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>	

Sistemas de Tiempo Real

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

Visión por Computador

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

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

CÁLCULO DE FUERZAS DE CONTACTO PARA PRENSIONES BIMANUALES

Abiud Rojas-de-Silva

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, francisco.abiud.rojas.de.silva@upc.edu

Raúl Suárez

Institut d'Organització i Control de Sistemes Industrials (IOC)
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, raul.suarez@upc.edu

Resumen

En este artículo se presenta un método para calcular fuerzas de contacto para prensiones bimanuales. El método propuesto utiliza dos funciones de coste para optimizar la distribución de la fuerza de las manos con las que se realiza la prensión bimanual y para minimizar la fuerza ejercida por los dedos. Las funciones de coste y las restricciones del problema de optimización se han formulado en función de los torques de las articulaciones tomando como base la relación existente entre las fuerzas de contacto, la matriz jacobiana de la mano y los torques de las articulaciones. Adicionalmente se presenta un índice para medir la distribución de la fuerza entre las manos. El artículo incluye algunos ejemplos prácticos del enfoque propuesto.

Palabras clave: Fuerzas de contacto, prensiones bimanuales, optimización.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la manipulación de objetos realizado por seres humanos es un tópico que ha sido analizado a lo largo de varios años, cuyos resultados han generado una vasta fuente de conocimiento que ha sido utilizado en diferentes dominios, por ejemplo en el área de rehabilitación con el desarrollo de dispositivos protésicos y en el área de robótica con el diseño de dispositivos mecánicos para sujetar objetos, así como la implementación de estrategias teóricas para calcular configuraciones adecuadas para tales dispositivos a fin de sujetar los objetos de forma robusta.

El uso de dispositivos mecánicos, tales como pinzas o manos mecánicas para sujetar y manipular objetos conlleva el desarrollo de dos fases [4], la primera es la *síntesis de la prensión*, que consiste en encontrar los puntos de contacto sobre la superficie del objeto que sean alcanzables por la

mano, cumpliendo al mismo tiempo algunas restricciones básicas; la segunda fase puede denominarse como la *fase de sostenimiento* que consiste en mantener la prensión del objeto mientras es manipulado. Para ello es necesario calcular las fuerzas que los dedos de la mano deben ejercer sobre el objeto con la finalidad de contrarrestar las perturbaciones externas que pueden aparecer durante su manipulación. La fase de sostenimiento ha sido ampliamente estudiada, en la sección 2 se discuten algunos trabajos relacionados. Sin embargo, con el desarrollo de sistemas robóticos bimanuales equipados con manos antropomorfas se añade un grado de complejidad extra en la búsqueda de prensiones bimanuales y sus correspondientes fuerzas de contacto.

En este trabajo se presenta un método para calcular fuerzas de contacto para sistemas robóticos bimanuales considerando las limitaciones de torque en las articulaciones de las manos. Adicionalmente se propone un índice que describe la distribución de las fuerzas entre las manos del sistema bimanual.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

El cálculo de las fuerzas de contacto para compensar perturbaciones externas se ha abordado a través de diferentes enfoques. Uno de los primeros enfoques dio solución al problema utilizando la matriz de la prensión y descomponiendo las fuerzas de contacto en dos componentes: las fuerzas de manipulación y las fuerzas de prensión [16, 10]. Estas dos componentes son conocidas como las soluciones particular y homogénea del problema de las fuerzas de contacto para prensiones estáticas. Las fuerzas de contacto pueden encontrarse resolviendo la componente homogénea del problema, conocida también como *las fuerzas internas* de la prensión. Algunos investigadores han caracterizado estas fuerzas internas como enlaces virtuales con actuadores virtuales que representan el objeto sujetado de tal manera que cuando una fuerza

se aplica en cada uno de los puntos de contacto se generan fuerzas articulares en el mecanismo virtual [20, 22]. Muchos de los primeros trabajos que adoptaron el concepto de las fuerzas internas para calcular las fuerzas de contacto solo consideraban presiones de precisión, i.e., contactando solo con la yema de los dedos [1, 6, 14]. Sin embargo en trabajos posteriores se demostró que en las presiones envolventes (usando toda la mano y no solo la yema de los dedos) existen contactos que ejercen fuerzas no controlables sobre el objeto [2, 3]. Este hecho se ha analizado descomponiendo el espacio de fuerzas de contacto en cuatro subespacios que representan las fuerzas activas y pasivas y las fuerzas internas controlables y no controlables [23, 24, 25].

El uso de las fuerzas internas del objeto para calcular las fuerzas de contacto implica la formulación de un problema con una gran cantidad de variables y con un infinito número de posibles soluciones. Para hacer frente a este tipo de problemas se han utilizado diferentes tipos de optimización con la finalidad de obtener las fuerzas de contacto óptimas, o al menos encontrar una solución subóptima. La mayoría de los métodos de optimización utilizados han tenido que hacer frente a la no linealidad de los modelos de fricción de los contactos modelándolos como matrices de inequaciones [8, 21], matrices simétricas [4] o bien modelando el problema entero de forma que cumpla los requerimientos necesarios para ser resuelto como un problema dual de programación lineal [7].

Uno de los principales retos en el cálculo de las fuerzas de contacto consiste en desarrollar métodos que permitan calcularlas tan rápido como sea posible de forma que puedan ser utilizados en aplicaciones de ejecución en tiempo real. Para ello se han utilizado enfoques de optimización convexa y optimización con gradientes que permiten encontrar soluciones óptimas o subóptimas con tiempos de computo relativamente pequeños [8, 13, 9, 5, 17].

El uso de métodos de optimización para calcular las fuerzas de contacto para sistemas bimanuales es un área de investigación activa debido a la complejidad que los sistemas bimanuales imponen, sin embargo los trabajos desarrollados en éste ámbito son escasos [12, 18]. Por tal motivo, en este trabajo se presenta un método para calcular las fuerzas de contacto para presiones bimanuales utilizando un método de optimización lineal considerando las limitaciones de torque de las articulaciones de los dedos de las manos. Adicionalmente, se propone un índice para medir la distribución de las fuerzas entre las manos.

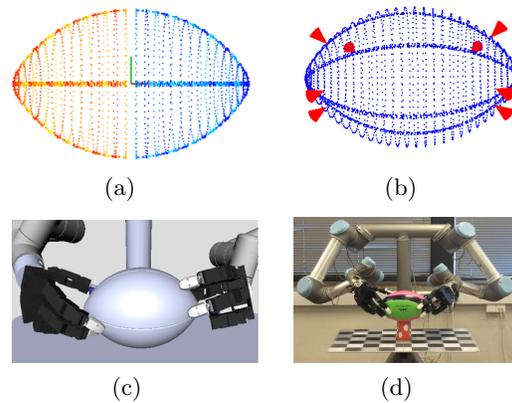


Figura 1: Planificador bimanual de presiones basado en un método de segmentación por rebanadas. a) El objeto es segmentado en rebanadas. b) Puntos de contacto obtenidos. c) Simulación de la presión bimanual. d) Ejecución de la presión bimanual en un sistema real.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En un trabajo previo, se presentó un planificador de presiones para objetos grandes utilizando sistemas bimanuales [15]. El alcance de ese trabajo incluye la búsqueda de los puntos de presión para dos manos en objetos grandes a través de la segmentación del objeto en rebanadas (Ver Fig.1). Durante la experimentación real los puntos sobre el objeto que son el objetivo de contacto de las manos se proyectaron una cierta distancia hacia el interior siguiendo la dirección del vector normal de la superficie del objeto en tales puntos con la finalidad de generar fuerzas de contacto lo suficientemente grandes utilizando solo el control de la posición de los dedos. Con ese enfoque es posible que la contribución de la fuerza entre las manos no esté balanceada. Por lo tanto, el problema a resolver consiste en calcular fuerzas de contacto adecuadas para presiones bimanuales con la finalidad de compensar perturbaciones externas durante la manipulación del objeto con una distribución uniforme de fuerzas entre las manos. Las suposiciones consideradas en el enfoque propuesto son las siguientes:

- Solo se consideran presiones de precisión con contactos rígidos con fricción (Sin embargo, el enfoque puede ser adaptado fácilmente para ser utilizado con contactos blandos).
- La fricción entre el objeto y los dedos de la mano se describe mediante el modelo de fricción de Coulomb.
- Ambas manos utilizan igual número de dedos.
- El torque máximo es el mismo para todas las articulaciones de los dedos.

- El peso del objeto es conocido, e inicialmente es la única fuerza a ser compensada por las fuerzas de prensión.

4. ENFOQUE PROPUESTO

Dado el peso del objeto, se deben hallar las fuerzas que los dedos de la mano deben ejercer sobre el objeto para contrarrestarlo. La ecuación general que describe dicho balance de fuerzas se puede expresar como:

$$\mathbf{GF} = -\mathbf{w}_e \quad (1)$$

donde $\mathbf{F} = \{\mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_n\}^T$ es el vector de fuerzas aplicadas por los n dedos sobre el objeto, \mathbf{G} es la matriz de grasp y \mathbf{w}_e es la fuerza generalizada externa producida por el peso del objeto que debe ser compensado.

Con la finalidad de encontrar \mathbf{F} , se propone optimización con dos diferentes funciones de coste, una para minimizar la norma infinito (L_∞) del cociente entre los torques de las articulaciones de los dedos para una configuración dada y el máximo torque articular, y la segunda función para minimizar la norma de mínimos cuadrados (L_2) de los torques articulares de los dedos para una configuración dada, con la finalidad de balancear las fuerzas entre las manos y minimizar la fuerza ejercida por los dedos.

4.1. FORMULACIÓN DE LAS RESTRICCIONES DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

Cuando una prensión es redundante (i.e., el número de puntos de contacto es mayor que el mínimo necesitado para sujetar un objeto), como en el caso de las prensiones bimanuales con mas de dos dedos por mano, existen infinitas combinaciones de fuerzas que podrían compensar una perturbación externa dada, sin embargo no todas esas combinaciones de fuerzas pueden ser ejercidas por los dedos. Con la finalidad de determinar las fuerzas que cada dedo puede ejercer, se considera una hipersfera en el espacio del torque articular expresada por:

$$\boldsymbol{\tau}_i^T \boldsymbol{\tau}_i = 1 \quad (2)$$

donde $\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbb{R}^m$ es el vector de los torques articulares del i -ésimo dedo con m articulaciones. La relación entre

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{J}_i^T \mathbf{f}_i \quad (3)$$

donde \mathbf{J}_i y \mathbf{f}_i son la matriz Jacobiana y la fuerza aplicada por el i -ésimo dedo, proyecta la esfera

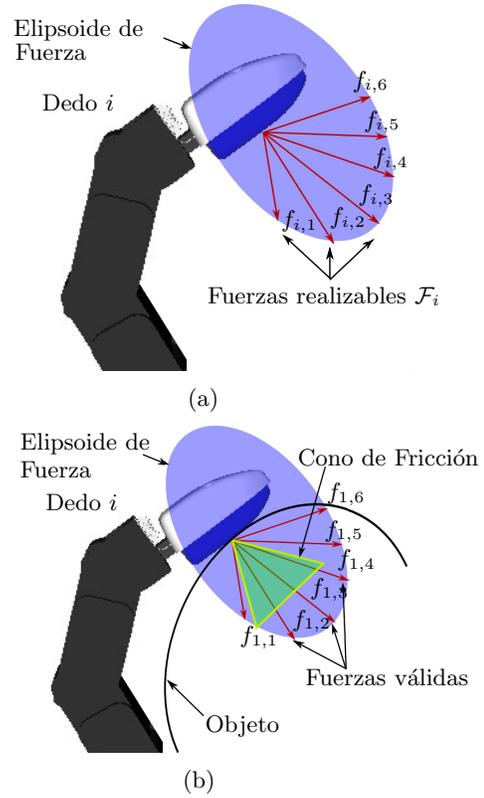


Figura 2: a) Ejemplo ilustrativo de las fuerzas realizables pertenecientes al Elipsoide de Fuerza de un dedo para una configuración articular dada y $|\boldsymbol{\tau}_i| \leq 1$. b) Fuerzas realizables válidas para un coeficiente de fricción dado.

unitaria de torque en un elipsoide en el espacio de fuerzas de las yemas de los dedos,

$$\mathcal{F}_i^T \mathbf{J}_i \mathbf{J}_i^T \mathcal{F}_i = 1 \quad (4)$$

El elipsoide representado en (4) indica las fuerzas $\mathcal{F}_i = \{\mathbf{f}_{i,j}, \dots, \mathbf{f}_{i,\infty}\}$ que cada dedo puede ejercer con un conjunto de torques $|\boldsymbol{\tau}_i| \leq 1$ para una configuración dada (ver Fig.2-a). Por lo tanto, si se conoce el máximo torque de las articulaciones de un dedo, es posible calcular la fuerza \mathbf{f}_i que éste puede hacer para una configuración específica a través de:

$$\mathbf{f}_i = (\mathbf{J}_i^\dagger)^T \boldsymbol{\tau}_i \quad (5)$$

donde \mathbf{J}_i^\dagger es la matriz pseudo inversa de \mathbf{J}_i . Dado que \mathbf{F} in eq. (1) representa las fuerzas ejercidas por n dedos, eq. (5) se puede extender de manera que:

$$\mathbf{F} = (\mathcal{J}^\dagger)^T \boldsymbol{\mathcal{T}} \quad (6)$$

donde $\mathcal{J}^\dagger = \text{diag}(\mathbf{J}_1^\dagger, \dots, \mathbf{J}_n^\dagger)$ es la matriz diagonal a bloques de las matrices jacobianas pseudo invertidas de n dedos y $\boldsymbol{\mathcal{T}} = \{\boldsymbol{\tau}_{1,1}, \dots, \boldsymbol{\tau}_{n,m}\}^T$ es el vector que contiene los torques articulares de los n dedos.

Reemplazando eq. (6) en eq. (1) es posible contrarrestar \mathbf{w}_e considerando el espacio del torque articular:

$$\mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \mathcal{T} = -\mathbf{w}_e \quad (7)$$

Adicionalmente, para evitar que los dedos se deslicen sobre el objeto como consecuencia de las fuerzas aplicadas, éstas deben estar dentro de los correspondientes conos de fricción (ver Fig. 2-b) definidos por:

$$\frac{\mathbf{f}_i}{\|\mathbf{f}_i\|} \cdot \hat{\mathbf{n}}_i \geq \frac{1}{\sqrt{1 + \mu^2}} \quad (8)$$

donde $\hat{\mathbf{n}}_i$ es la normal unitaria en el i -ésimo punto de contacto y μ es el coeficiente de fricción entre los dedos y el objeto. Por conveniencia, eq. (8) puede expresarse como:

$$\mathbf{f}_i^T (I - (1 + \mu^2) \hat{\mathbf{n}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^T) \mathbf{f}_i \leq 0 \quad (9)$$

y extendiendo la ineq (9) para los n dedos se obtiene:

$$\mathbf{F}^T (I - (1 + \mu^2) \mathcal{N}) \mathbf{F} \leq 0 \quad (10)$$

donde $\mathcal{N} = \text{diag}(\hat{\mathbf{n}}_1 \cdot \hat{\mathbf{n}}_1^T, \dots, \hat{\mathbf{n}}_n \cdot \hat{\mathbf{n}}_n^T)$ es la matriz diagonal a bloques de $\hat{\mathbf{n}}_i \cdot \hat{\mathbf{n}}_i^T$ de los n dedos.

Usando la eq. (6), la eq. (10) puede ser reformulada como:

$$\mathcal{T}^T \mathbf{B} \mathcal{T} \leq 0 \quad (11)$$

donde $\mathbf{B} = \mathcal{J}^\dagger (I - (1 + \mu^2) \mathcal{N}) (\mathcal{J}^\dagger)^T$.

Si se formula un problema de optimización para balancear la contribución de fuerza entre las manos o para minimizar la fuerza ejercida por los dedos en función de los torques articulares, las eq. (7) y (11) pueden ser utilizadas como restricciones del problema y el máximo torque articular τ_{max} puede utilizarse como límites superiores e inferiores de las variables que se optimizarán, de forma que el problema de optimización puede ser expresado como:

$$\begin{aligned} & \underset{\mathcal{T}}{\text{minimizar}} \quad \Phi \\ & \text{sujeto a} \quad -\tau_{max} \leq \mathcal{T} \leq \tau_{max} \\ & \quad \mathcal{T}^T \mathbf{B} \mathcal{T} \leq 0 \\ & \quad \left\| \mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \mathcal{T} + \mathbf{w}_e \right\|^2 = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde Φ es una representación genérica de una función de coste.

4.2. FUNCIONES DE COSTE

Dos funciones de coste diferentes fueron seleccionadas para realizar la optimización de las fuerza

de contacto. La primera permite una distribución uniforme de las fuerza entre los dedos de las manos, lo que significa que para una prensión bimanual si cada mano usa el mismo número de dedos, las fuerzas que aportan las mano deberían estar balanceadas. Esta función de coste está basada en la minimización de la norma infinito (L_∞) del vector de torque \mathcal{T} dividido entre el máximo torque articular τ_{max}

$$\Phi_0 = \left\| \frac{\mathcal{T}}{\tau_{max}} \right\|_{L_\infty} \quad (13)$$

La segunda función de coste permite minimizar la magnitud del vector de torques \mathcal{T} que eventualmente podría minimizar las fuerzas ejercidas por los dedos. Sin embargo, a diferencia de la primera función de coste, ésta no puede asegurar una distribución proporcional de las fuerzas entre los dedos de las manos. Esta función de coste está basada en la minimización de la norma de mínimos cuadrados (L_2) del vector de torque \mathcal{T} ,

$$\Phi_1 = \|\mathcal{T}\|_{L_2} \quad (14)$$

Para resolver el problema con el menor tiempo de computo posible, se utilizó un algoritmo basado en gradientes descendentes [19] implementado en el paquete NLOpt [11]. Por tal motivo es necesario formular los gradientes de las funciones de coste y de las restricciones del problema calculando sus derivadas parciales en función de \mathcal{T} .

El gradiente de la función de coste Φ_0 es:

$$\nabla \Phi_0 = \begin{cases} \frac{\tau_i}{\tau_{max}}, & \text{if } \tau_i = \tau_{max_i}, \\ 0, & \text{en otro caso.} \end{cases} \quad (15)$$

y el gradiente de la función de coste Φ_1 es:

$$\nabla \Phi_1 = 2\mathcal{T} \quad (16)$$

y los gradientes de las restricciones de la eq. (12) son:

$$\begin{aligned} \nabla c_1 &= 2\mathcal{T}^T \mathbf{B} \\ \nabla c_2 &= 2(\mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \mathcal{T} + \mathbf{w}_e)^T \mathbf{G}(\mathcal{J}^\dagger)^T \end{aligned} \quad (17)$$

4.3. INDICE DE DISTRIBUCIÓN DE FUERZA

Con la finalidad medir la distribución de fuerzas entre las manos que intervienen en una prensión bimanual se ha propuesto el Índice de Distribución de Fuerza (IDF):

$$FDI = \frac{H_1^f}{H_2^f} \quad (18)$$

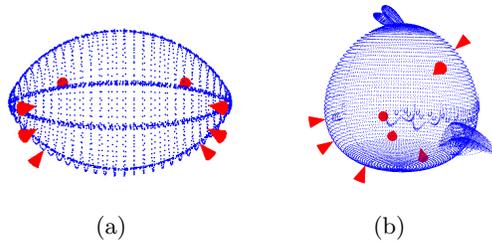


Figura 3: Puntos de contacto para un balón de rugby y un juguete.

donde $H_j^f = \sum_{i=0}^{n/2} \|\mathbf{f}_i\|$ es la suma de las magnitudes de las fuerzas ejercidas por los dedos de la mano j , $j \in \{1, 2\}$ con $j = 1$ correspondiente a la mano con la menor sumatoria, i.e $H_1^f < H_2^f$. IDF indica la distribución de la fuerza entre las manos, cuando este índice tiende a uno significa que las fuerzas están balanceadas entre las dos manos y tiende a cero cuando la contribución de fuerza de cada mano está en desequilibrio.

5. EXPERIMENTACIÓN

Para demostrar el desempeño del enfoque propuesto, se han usado dos objetos, un balón de rugby y un juguete. Para cada objeto se calculó una presión bimanual (ver Fig. 3-a y 3-b). Para cada presión se calcularon las fuerzas de contacto optimizando las funciones de coste Φ_1 y Φ_2 con el peso original del objeto. Posteriormente se recalcularon las fuerzas de contacto en 9 ocasiones añadiendo 100 g al peso del objeto en cada una.

Las Tablas 1 y 2 muestran las fuerzas de contacto resultantes para contrarrestar las fuerzas generalizadas $\mathbf{w}_e^{Rug} = [0, 0, -2,13858, 0, 0, 0]^T$ y $\mathbf{w}_e^{Toy} = [0, 0, -3,500, 0, 0, 0]^T$ causados por el peso del balón de rugby y el juguete respectivamente.

El tiempo promedio para calcular las fuerzas de contacto es de 150 y 1500 ms, respectivamente para cada objeto.

La Fig. 4 muestra la contribución de fuerza de cada mano así como el Índice de Distribución de Fuerza (IDF) resultantes después de optimizar Φ_0 y Φ_1 para la presión bimanual del balón de rugby y del juguete. En las figuras 4-a y 4-b, se muestran las contribuciones de fuerza para las presiones bimanuales correspondientes a cada objeto. En ellas se muestran cuatro líneas: dos líneas continuas coloreadas en rojo y azul representan la contribución de fuerza de la mano izquierda y derecha respectivamente obtenidas a través de la optimización de la función de coste Φ_0 y dos líneas punteadas coloreadas en magenta y cian representan la distribución de las

fuerzas utilizando la función de coste Φ_1 . Como se puede apreciar, las líneas continuas presentan un patrón similar en cada iteración, indicando una distribución uniforme de las fuerzas entre las dos manos. Por otra parte, las líneas punteadas muestra una disparidad considerable entre ellas, sin embargo las magnitudes de las fuerzas son menores en comparación con las observadas en las líneas continuas.

Las figuras 4-c y 4-d, muestran el IDF para las dos funciones de coste. La línea roja representa los resultados obtenidos con Φ_0 y la línea azul los obtenidos con Φ_1 . La línea roja siempre se encuentra por encima de 0.8 indicando que existe una buena distribución de fuerzas entre las manos que realizan la presión bimanual, lo cual es coherente con los resultados mostrados por las líneas continuas azul y roja en las gráficas 4-a y 4-b). Sin embargo, la línea azul está por debajo de 0.5 en casi todos los casos, indicando una pobre distribución de fuerza entre las manos. Debido a que la configuración articular de las manos depende de la localización de los puntos de contacto sobre el objeto, la aportación de fuerza que cada mano puede hacer puede variar considerablemente. Por lo tanto si la presión bimanual es simétrica las contribuciones de fuerza de las manos serán proporcionales obteniendo un IDF muy cercano a 1.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

En este trabajo se ha presentado un método para optimizar las fuerzas de contacto para presiones bimanuales considerando los límites de los torques articulares de las manos. El método está basado en la optimización de la distribución de fuerzas entre las manos y la minimización de las fuerzas ejercidas por los dedos. La optimización se realizó utilizando dos funciones de coste diferentes. La primera minimiza permite balancear la contribución de fuerza entre las manos que intervienen en una presión bimanual. La segunda función de coste minimiza los torques articulares lo que eventualmente podría minimizar las fuerzas ejercida por los dedos de las manos.

Adicionalmente, se ha presentado un Índice de Distribución de Fuerza para medir el grado de distribución de la fuerza entre las manos que intervienen en una presión bimanual.

Los experimentos muestran buenos resultados utilizando cualquiera de las dos funciones de coste, con un tiempo de computo promedio de 150 y 1500 ms para cada objeto respectivamente. Finalmente el IDF ha mostrado que la función de

Tabla 1: Fuerzas de contacto resultantes para compensar el peso $\mathbf{w}_e = [0, 0, -2,13858, 0, 0, 0]^T$ del balón de rugby

\mathbf{f}^T	x	y	z	m_x	m_y	m_z
\mathbf{f}_1^T	1.682	-1.824	-0.903	-0.009	-0.040	0.063
\mathbf{f}_2^T	1.326	0.204	0.061	0.005	-0.013	-0.060
\mathbf{f}_3^T	-0.444	5.552	0.594	0.347	0.057	-0.270
\mathbf{f}_4^T	-0.504	-3.376	1.043	-0.223	0.068	0.112
\mathbf{f}_5^T	0.979	-1.378	1.945	0.132	-0.055	-0.105
\mathbf{f}_6^T	-1.435	1.792	-0.182	-0.058	-0.030	0.158
\mathbf{f}_7^T	-2.023	2.605	-0.950	-0.035	0.060	0.239
\mathbf{f}_8^T	0.419	-3.575	0.531	-0.164	-0.040	-0.143
$(\Sigma \mathbf{f})_{Rug}^T$	0.000	0.000	2.139	-0.004	0.006	-0.006
\mathbf{w}_e^{Rug}	0.000	0.000	-2.138	0.000	0.000	0.000

Tabla 2: Fuerzas de contacto resultantes para compensar el peso $\mathbf{w}_e = [0, 0, -3,500, 0, 0, 0]^T$ del juguete

\mathbf{f}^T	x	y	z	m_x	m_y	m_z
\mathbf{f}_1^T	1.838	-1.307	-0.618	0.525	-0.054	0.224
\mathbf{f}_2^T	0.955	0.364	0.269	0.047	0.019	-0.234
\mathbf{f}_3^T	-1.471	0.108	1.170	0.008	0.086	-0.010
\mathbf{f}_4^T	-1.320	0.304	0.822	-0.048	0.043	-0.102
\mathbf{f}_5^T	1.531	1.321	-0.222	-0.047	0.036	0.168
\mathbf{f}_6^T	-1.282	0.130	0.572	0.030	-0.032	0.076
\mathbf{f}_7^T	-0.148	-0.183	1.238	0.002	-0.082	-0.007
\mathbf{f}_8^T	-0.102	-0.737	0.218	-0.517	-0.010	-0.120
$(\Sigma \mathbf{f})_{Toy}^T$	0.001	-0.001	3.449	0.003	0.007	-0.005
\mathbf{w}_e^{Toy}	0.000	0.000	-3.500	0.000	0.006	-0.006

coste Φ_0 efectivamente permite una distribución uniforme de las fuerzas entre las manos. Por otra parte, utilizando la función de coste Φ_1 el IDF muestra una pobre distribución de fuerzas entre las manos. Sin embargo Φ_1 muestra que las fuerzas ejercidas son menores que las obtenidas a través de la optimización de Φ_0 .

Vale la pena remarcar que cuando los puntos de prensión de cada mano se encuentran distribuidos sobre el objeto de forma simétrica, el IDF podría alcanzar fácilmente valores muy cercanos a uno. Sin embargo, cuando la prensión bimanual no es simétrica, la distribución de la fuerza podría no estar totalmente balanceada pero existe un comportamiento uniforme en la contribución de fuerza de cada mano, es decir, que la fuerza ejercida por cada mano aumenta o disminuye proporcionalmente de acuerdo con la magnitud de la fuerza externa que actúa sobre el objeto.

Como trabajo futuro se planea: 1) implementar el enfoque propuesto junto con un controlador híbrido de posición-fuerza con la finalidad de realizar experimentación real, y, 2) generalizar el enfoque propuesto a casos en donde cada mano usa diferente número de dedos.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Gobierno de España a través de los proyectos DPI2013-40882-P y DPI2016-80077-R. A. Rojas-de-Silva fue parcialmente apoyado por la beca doctoral mexicana CONACyT 313768.

Referencias

- [1] M. Aicardi, G. Cannata, and G. Casalino. Grasp force planning for the coordinated Manipulation of Rigid Objects. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 1525–1530, May 1992.
- [2] A. Bicchi. Force distribution in multiple whole-limb manipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 2, pages 196–201, May 1993.
- [3] A. Bicchi and D. Prattichizzo. New Issues in the Kineto-Statics, Dynamics, and Control of Whole-Hand Manipulation. In T. Takamori and K. Tsuchiya, editors, *Robotics, Mechatronics and Manufacturing*

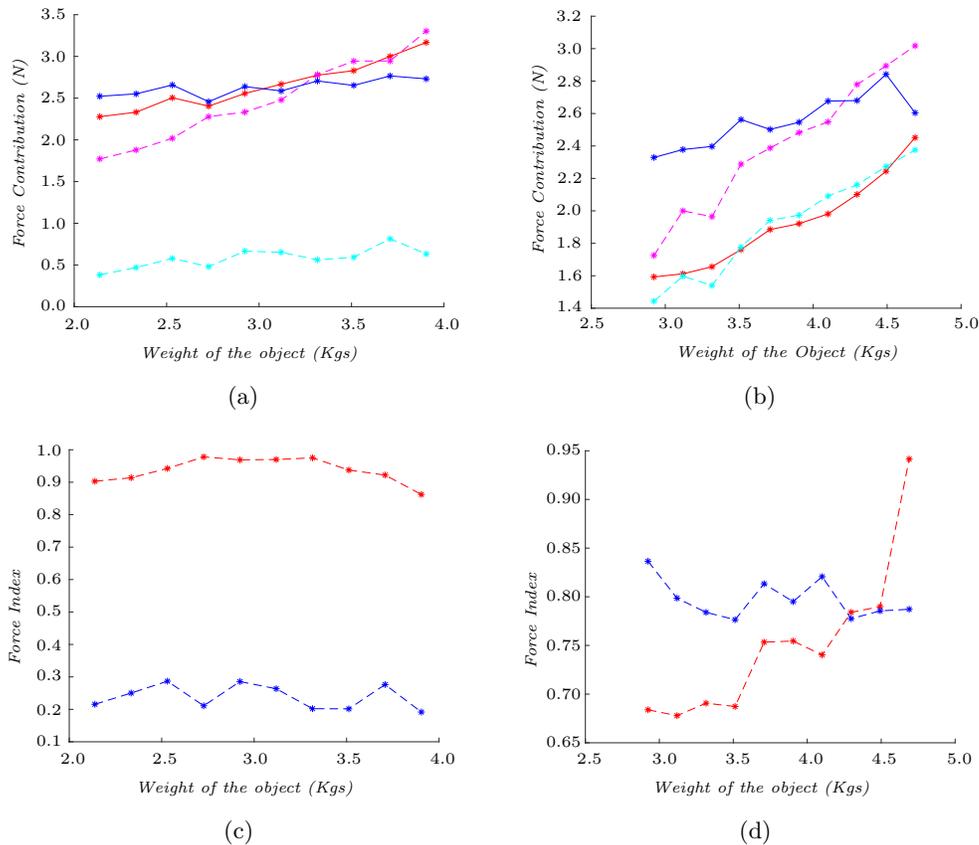


Figura 4: Gráficas de los resultados de la optimización de las fuerzas utilizando las funciones de coste Φ_0 y Φ_1 . a) y b) Contribución de fuerzas de cada mano para la presión correspondiente al balón de rugby y del juguete respectivamente: Las líneas continuas coloreadas en rojo y azul representan las contribuciones de fuerza de cada mano obtenidas a través de la optimización de Φ_0 y las líneas punteadas coloreadas en magenta y cyan representa las contribuciones de fuerzas obtenidas a través de la optimización de Φ_1 . c) y d) Índice de Distribución de Fuerza (IDF), la línea roja muestra los resultados obtenidos utilizando la función de coste Φ_0 y la línea azul muestra los resultados obtenidos utilizando la función de coste Φ_1

- Systems*, pages 373–3790. North Holland, Amsterdam, 1993.
- [4] M. Buss, H. Hashimoto, and J. B. Moore. Dextrous Hand Grasping Force Optimization. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(3):406–418, Jun 1996.
- [5] M. Buss, L. Faybusovich, and J. B. Moore. Dikin-type algorithms for dextrous grasping force optimization. *International Journal of Robotic Research*, 17(8):831–839, 1998.
- [6] D. P. Chevallier and S. Payandeh. On Computing the Friction Forces Associated with Three-Fingered Grasp. *International Journal of Robotics Research*, 13(2):119–126, 1994.
- [7] J. Cornella, R. Suárez, R. Carloni, and C. Melchiorri. Grasping force optimization using dual methods. In *8th World Congress of the International Federation of Automatic Control (IFAC)*, volume 39, pages 629–634, 2006.
- [8] L. Han, J. C. Trinkle, and Z. X. Li. Grasp analysis as linear matrix inequality problems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 16(6):663–674, Dec 2000.
- [9] U. Helmke, K. Hper, and J. B. Moore. Quadratically converget algorithms for optimal dexterous hand grasping. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 168(2):138–146, 2002.
- [10] Z. Ji and B. Roth. Direct Computation of Grasping Force for Three-Finger Tip-Prehension Grasps. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 110(4):405–413, Dic 1988.
- [11] S. G. Johnson. The nlopt nonlinear-optimization package. URL <http://ab-initio.mit.edu/nlopt>.
- [12] V. Lippiello, B. Siciliano, and L. Villani. A grasping force optimization algorithm for dexterous robotic hands. In *IEEE International Conference on Robotics and*

- Automation (ICRA)*, pages 4170–4175, May 2012.
- [13] G. Liu and Z. Li. Real-time grasping-force optimization for multifingered manipulation: theory and experiments. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 9(1):65–77, March 2004.
- [14] B. Mirtich and J. Canny. Easily computable optimum grasps in 2-D and 3-D. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 739–747, May 1994.
- [15] A. Rojas-de Silva and R. Suárez. Grasping bulky objects with two anthropomorphic hands. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 877–884, Oct 2016.
- [16] J. K. Salisbury and B. Roth. Kinematic and Force Analysis of Articulated Mechanical Hands. *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, 105(1): 35–41, March 1983.
- [17] J. P. Saut, C. Remond, V. Perdereau, and M. Drouin. Online computation of grasping force in multi-fingered hands. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pages 1223–1228, Aug 2005.
- [18] A. M. Sundaram, O. Porges, and M. A. Roa. Planning realistic interactions for bimanual grasping and manipulation. In *IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pages 987–994, Nov 2016.
- [19] K. Svanberg. A class globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations. *SIAM Journal on Optimization*, 12(2):555–573, 2002.
- [20] D. Williams and O. Khatib. The virtual linkage: a model for internal forces in multi-grasp manipulation. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 1, pages 1025–1030, May 1993.
- [21] Z. Xue, M. Schmidt, J. M. Zoellner, and R. Dillmann. Internal force computation of grasped object using joint torques. In *SICE Annual Conference*, pages 2795–2800, Aug 2008.
- [22] T. Yoshikawa. Virtual truss model for characterization of internal forces for multiple finger grasps. In 3, editor, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2389–2395, May 1998.
- [23] Y. Zhang and W. A. Gruver. Definition and force distribution of power grasps. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, volume 2, pages 1373–1378, May 1995.
- [24] Y. Zhang and W. A. Gruver. Force distribution of power grasps based on the controllability of contact forces. In *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century*, volume 1, pages 83–88, Oct 1995.
- [25] Y. Zhang, F. Gao, and W. A. Gruver. Determination of contact forces in grasping. In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, volume 3, pages 1038–1044, Nov 1996.