

CONTROL ÓPTIMO LQR PARA ORIENTAR LA PLATAFORMA MÓVIL DE UN ROBOT PARALELO DE 2GDL EXPERIMENTAL

OPTIMAL LQR CONTROL TO ORIENT THE MOVING PLATFORM OF AN EXPERIMENTAL 2DOF PARALLEL ROBOT

Jack Lut Aguirre Valverde¹, Marco Antonio Becerra Pérez², Cristian Rafael Columna Zavaleta³, Sthefanny Beatriz Reyna Rodríguez⁴, Josmell Henry Alva Alcántara⁵, Edgar André Manzano Ramos⁶

¹²³⁴⁵⁶Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ingeniería, Escuela Académica Profesional de Ingeniería Mecatrónica, Av. Juan Pablo II s.n., Trujillo, La libertad, Perú, jaguirrev@unitru.edu.pe mbecerra@unitru.edu.pe ccolumnaz@unitru.edu.pe sreynar@unitru.edu.pe josalva@unitru.edu.pe emanzano@unitru.edu.pe

RESUMEN

El control de la orientación es una de las partes cruciales al momento de diseñar sistemas con una plataforma móvil, como en el caso de simuladores de vuelo o antenas de comunicación, ya que este control debe brindar precisión y estabilidad al sistema. El presente proyecto propone desarrollar el diseño de un sistema de control en base al regulador óptimo cuadrático lineal, con el objetivo de controlar la orientación de la plataforma móvil de un robot paralelo de 2 grados de libertad experimental. Nuestra metodología inicia con la construcción del robot paralelo, para luego poder obtener el modelo matemático que represente la dinámica del mismo, el cual nos permitirá realizar el control del sistema mediante el uso del regulador cuadrático lineal (LQR), con la finalidad de obtener respuestas rápidas y minimizar la aparición de sobre picos, obteniendo movimientos suaves; y, con ello, lograr la estabilidad completa del sistema. Este sistema de control propuesto se validará mediante datos de la orientación, obtenidos desde un sensor acelerómetro, con los cuales se verificará que el sistema mantenga una correcta orientación, evitando la generación de vibraciones en la plataforma móvil y haciendo una comparación con un controlador PID.

Palabras clave: LQR, robot paralelo experimental, orientación, 2 GDL.

ABSTRACT

The orientation control is one of the crucial parts when designing systems with a mobile platform, as in the case of flight simulators or communication antennas, since this control must provide precision and stability to the system. This project proposes to develop the design of a control system based on the linear quadratic optimal regulator, with the aim of controlling the orientation of the mobile platform of an experimental parallel robot with 2 degrees of freedom. Our methodology begins with the construction of the parallel robot, to then be able to obtain the mathematical model that represents its dynamics, which will allow us to control the system through the use of the linear quadratic regulator (LQR), in order to obtain faster answers and minimize overshooting, obtaining smooth movements; and, with this, achieve complete system stability. This proposed control system will be validated by orientation data, obtained from an accelerometer sensor, with which it will be verified that the system maintains a correct orientation, avoiding the generation of vibrations in the mobile platform and doing a comparison with a PID controller.

Keywords: LQR, experimental parallel robot, orientation, 2 DOF.

*Autor para correspondencia: jaguirrev@unitru.edu.pe







INTRODUCCIÓN

El control de la orientación de una plataforma con respecto al espacio en el que esta se encuentra, permite el desarrollo de funcionalidades esenciales para diversas aplicaciones. Esto se puede notar en los sistemas de posicionamiento automático de antenas, que es un factor crucial al momento de la transmisión de información, pues un correcto posicionamiento optimiza dicho proceso (Saputra 2019), o en el diseño de simuladores de vuelo, que permiten a los pilotos entrenar dentro de cabinas especiales que tratan de recrear el comportamiento real que tendría un avión en condiciones normales o de falla (Limache 2010).

Por lo tanto, se puede señalar que el diseño de controladores para posicionar plataformas móviles, se muestra como un campo de interés general, por lo que existen muchos antecedentes donde se han propuesto diseños a pequeña escala que permiten impulsar las investigaciones afines a este tema dentro de las universidades, realizando proyectos como el sistema bola plato, del cual se han realizado diversas propuestas de diseño que permitan un control preciso y sencillo de la plataforma. Estos diseños parten desde mecanismos simples (Awtar 2002), hasta el uso de robots paralelos de varios grados de libertad, puesto que este tipo de robots permiten una mayor exactitud en el posicionamiento (Parandian 2015), aunque esta también depende de la exactitud de los actuadores y del tipo de control que se utilice.

Cuando se diseñan el controlador para orientar una plataforma móvil, es común encontrar trabajos que utilicen controladores PID básicos (Awtar 2002), aunque, con el origen del control moderno, se ha buscado obtener los parámetros óptimos que generen una mejor respuesta del sistema, dando paso al control óptimo. Es así que el regulador óptimo cuadrático lineal (LQR por sus siglas en inglés), que es el más común dentro de los controladores óptimos, se presenta como una opción viable para el control de plataformas móviles (Farzana 2019).

En base a ello, el presente proyecto propone diseñar un sistema de control en base al regulador óptimo cuadrático lineal para controlar la orientación de una plataforma móvil experimental de 2 grados de libertad basado en un sistema de robot paralelo.

MÉTODOS

El desarrollo de la investigación tiene la siguiente estructura:

Construcción de la planta

Diseño la parte mecánica

La planta se puede dividir en piezas móviles, como la plataforma y los eslabones, y en piezas fijas, como la columna. Todas las piezas son diseñadas en el software SolidWorks e impresas en 3D; mientras que las articulaciones esferoidales de la plataforma, las cuales proporcionan los grados de libertad del robot, se construyen a partir de los elementos rodantes de

un rodamiento rígido de bolas. Es así que se desarrollan los prototipos de la planta, como el que se muestra en la Fig. 1.



Figura 1. Prototipo de articulación esférica.

Selección de componentes electrónicos

Los actuadores utilizados son servomotores MG90S los cuales son sido elegidos por su tamaño reducido y por presentar mayor torque que los SG90.



Figura 2. Servomotor MG90S.

El sensor utilizado es el acelerómetro MPU6050 debido a su facilidad de uso y bajo costo.



Figura 3. Acelerómetro MPU6050.

Por último, la tarjeta de desarrollo utilizada para

la adquisición de datos y para el control del sistema es una tarjeta Arduino Uno R3, la cual se muestra en la Fig. 4, dado que cuenta con una cantidad suficiente de pines, librerías necesarias y una sencilla comunicación con la PC.



Figura 4. Placa Arduino UNO.

Implementación de la planta

Como siguiente etapa de la construcción, se realiza el acoplamiento de cada una de las piezas diseñadas, como se puede observar en la Fig. 5, además de realizar la conexión y calibración de ambos servomotores para generar el movimiento de cada eslabón, de manera que uno afecte la inclinación de la plataforma en el eje “X” y el otro, a la inclinación en el eje “Y”.



Figura 5. Plataforma móvil implementada.

Adquisición de datos:

Etapa 1: Preparación de la planta

Para realizar la identificación de la planta, primero se debe considerar como la integración de dos sistemas independientes: un sistema correspondiente a la inclinación en el eje “X” y el otro, en el eje “Y”.

Luego, se procede a conectar la planta y los servomotores a la placa Arduino Uno; así como una fuente de poder, que proporcione la corriente a los servomotores.

A continuación, se realiza la adquisición de los datos en base a los ángulos de inclinación y mediante la comunicación serial, utilizando el sensor de inclinación MPU6050 y un botón para tener un mejor control y sincronización al momento de realizar el experimento.

Etapa 2: Ejecución del algoritmo para la adquisición

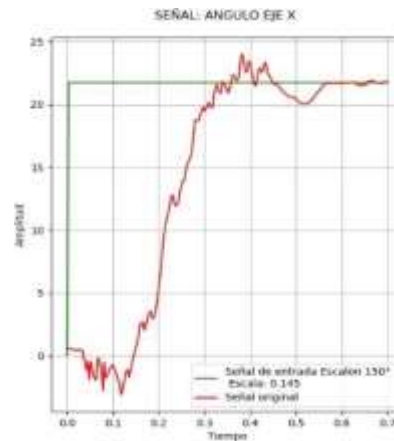
El algoritmo desarrollado envía una señal de entrada tipo escalón cambiando repentinamente la señal que controla el ángulo del servomotor desde un valor de 0 a 150° y, al mismo tiempo, envía datos

a través del puerto serie sobre el grado de inclinación (ángulo en el eje “X” o ángulo en el eje “Y”) en cada instante de tiempo de muestreo.

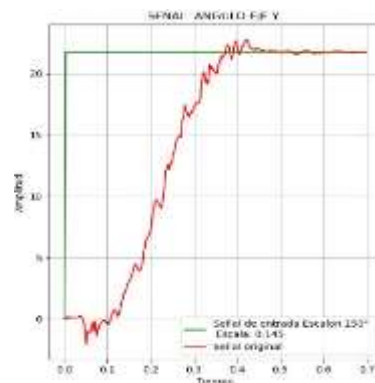
Es importante resaltar que este proceso de adquisición de datos se realiza tomando información directamente del sensor; es decir, sin

aplicar algún filtro, ya que la etapa del filtrado es una etapa post – adquisición, lo que permite una reducción en el coste computacional.

Posteriormente, repetimos el mismo procedimiento para el segundo servomotor y almacenamos los datos.



(a)



(b)

Figura 6. Datos registrados para el (a) eje “X” (b) eje “Y”

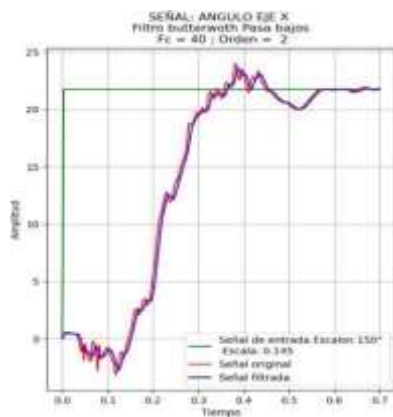
Se puede observar en la Fig. 6 la gráfica de los 2 ejes con su respectiva señal de entrada la cual es escalada para una mejor visualización de la señal de salida pues esta varía de 0° a 150° mientras que

la señal de salida para ambos casos está en un rango de -4° a 22° aproximadamente.

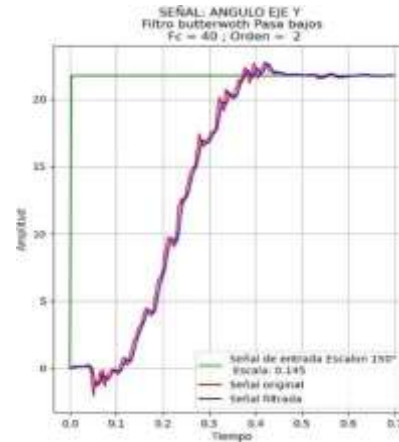
Identificación de sistemas

El primer paso en esta etapa es el filtrado de los datos adquiridos, donde es necesaria una comparación visual del comportamiento de cada filtro sobre los datos. Esto se realiza con la finalidad de encontrar el filtro que mejor se adapte a evitar los picos, los retardos temporales y que presente un menor desfase, debido a la necesidad de implementar el filtro para su funcionamiento en tiempo real.

Es así que, al analizar el comportamiento de diferentes filtros, se obtiene que el de tipo Butterworth de segundo orden cumple con los requisitos de mejor manera; por lo tanto, fue el que se aplicó a los datos previamente adquiridos. De esta manera, se obtienen las gráficas mostradas en la Fig. 7, tanto para el eje X como para el eje Y.



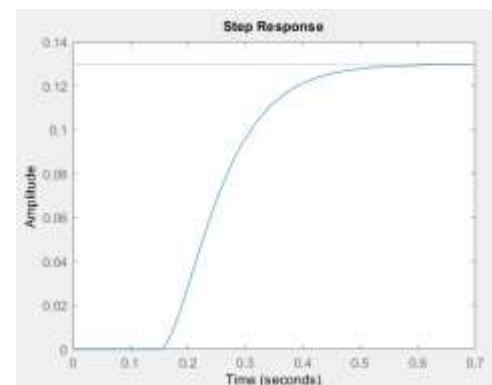
(a)



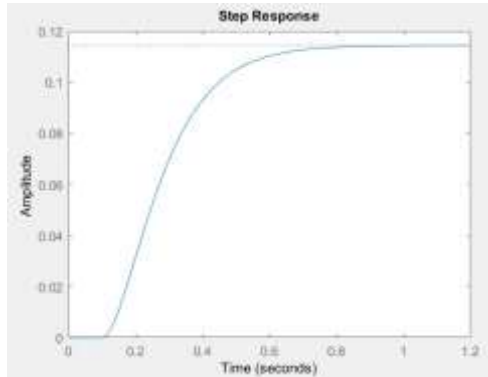
(b)

Figura 7. Filtro Butterworth aplicado a los datos del (a) eje “X” (b) eje “Y”.

Luego del proceso de filtrado, se hace uso de la herramienta System Identification Toolbox del software Matlab para obtener la función de transferencia que más se aproxime al comportamiento dinámico del sistema.



(a)



(b)

Figura 8. Función de transferencia del (a) eje “X”
(b) eje “Y”.

Discretización de sistemas

Después de obtener las funciones de transferencia que representen la orientación de la plataforma en ambos ejes, procedemos a realizar el proceso de discretización. Este proceso puede realizarse con retenedores de orden cero, retenedores de primer orden o con la transformada bilineal; donde la elección del método dependerá de la similitud que se observe en la representación, con respecto al comportamiento dinámico del sistema en tiempo continuo. Cabe resaltar que este proceso se aplicara para el control PID a modo de comparación mientras que en el siguiente paso se obtendrá las ecuaciones de estado y posteriormente se realizara la discretización.

Obtención de ecuaciones de estado

Tal y como se mencionó en el paso anterior, se procederá a obtener la ecuación en espacio de estados en su forma observable dado que esto nos permitirá aplicar el control LQR de forma más

sencilla. Para ello, mediante la teoría se definió la forma observable de una ecuación de espacio de estados a partir de la función de transferencia en continua y posteriormente mediante los algoritmos de Matlab se discretizo la ecuación de espacio de estados en tiempo continuo.

Diseño del controlador LQR con observador

Para el diseño del controlador, y teniendo en cuenta las variables que se desean controlar para cada planta, se desarrolla un sistema de control multivariable que permita obtener las matrices del controlador y las ganancias de los estados que se necesitan realimentar.

Inicialmente es necesario definir las matrices de ponderación Q y R, las cuales están asociadas a la función de costo del sistema de control. Cabe resaltar que cada matriz debe ser cuadrada diagonal, donde la matriz Q indica la importancia de cada una de las variables de estado en el control y la matriz R indica la importancia de las entradas.

Debido a contar con cuatro variables de estado, la matriz Q deberá ser cuadrada diagonal de dimensiones 4x4.

Además, considerando que las ecuaciones en espacio de estados se obtuvieron gracias a la forma canónica observable, la variable de estado número cuatro será la que nos interese controlar; por lo tanto, dentro de la matriz de ponderación Q, el valor asociado a esta variable deberá ser mayor con respecto a los otros tres valores. Por

otro lado, como se cuenta con una sola entrada para cada planta, la matriz R será un valor numérico (en este caso 1, asociando la importancia básica de la entrada para cada planta).

Luego de definir las matrices de ponderación, se hace uso del comando “dlqr” del software Matlab para obtener las ganancias asociadas a cada variable de estado, las cuales permitirán realizar el control del sistema.

Posteriormente, se diseñan los observadores (estimadores) del sistema que permitirán realizar la medición de las variables de estado de cada planta. Para ello se hace uso del método de posicionamiento de polos, donde se plantean los polos del observador como una potencia cúbica de los polos de la planta discretizada.

A continuación, se utiliza la fórmula de Ackerman con el comando “acker” del software Matlab, para obtener el vector L que permite ajustar la salida de la planta estimada con respecto a la planta original.

Comparación con controlador PID

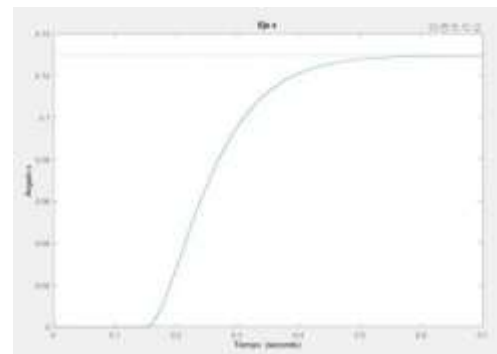
Finalmente, y a modo de comparar resultados se diseñará rápidamente un controlador PID discreto con el uso del toolbox de Matlab para cada uno de los sistemas y se aplicará a la función de transferencia discretizada lo cual nos permitirá diferenciar y estudiar las respuestas entre un controlador PID y un óptimo LQR analizando sus pros y contras entre el modo convencional para

controlar estos sistemas (PID) y el que se propone en la presente investigación.

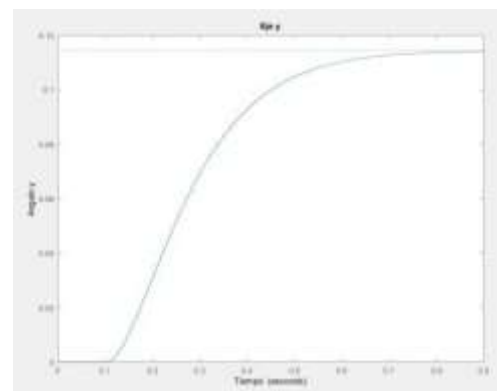
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Discretización de sistemas

Aplicando el retenedor de orden 0 a la planta identificada se puede observar los siguientes sistemas discretos, los cuales, tal y como se puede visualizar en la Fig. 9, no solo están bien aproximados, sino que también tienden a parecerse a un sistema continuo dado el tiempo de muestreo bastante pequeño que se utilizó.



(a)



(b)

Figura 9. Función de transferencia discretizada de (a) eje “x” (b) eje “y”.

Obtención de ecuaciones de estado

Las ecuaciones de estado discretas que se obtuvieron fueron las que se observan en la Fig. 10 y tal y como se planteó estas tienen una forma que nos permite aplicar un control LQR pues la salida solo depende de una variable de estado.

```

A =
      x1      x2      x3      x4
x1      1      -0.000703      -0.6090      -442.4
x2      0.003      0.9999      -0.1300      -84.14
x3      4.453e-06      0.00299      0.9905      -6.157
x4      4.253e-09      4.173e-06      0.002676      0.7892

B =
      u1
x1      64.29
x2      -4.732
x3      0.1131
x4      0.000161

C =
      x1      x2      x3      x4
y1      0      0      0      1

D =
      u1
y1      0
    
```

(a)

```

A =
      x1      x2      x3      x4
x1      1      -0.0005376      -0.5268      -334.9
x2      0.003      0.9999      -0.1293      -82.5
x3      4.492e-06      0.002989      0.9893      -6.872
x4      4.236e-09      4.15e-06      0.002655      0.7754

B =
      u1
x1      43.55
x2      -2.114
x3      0.03297
x4      4.719e-05

C =
      x1      x2      x3      x4
y1      0      0      0      1

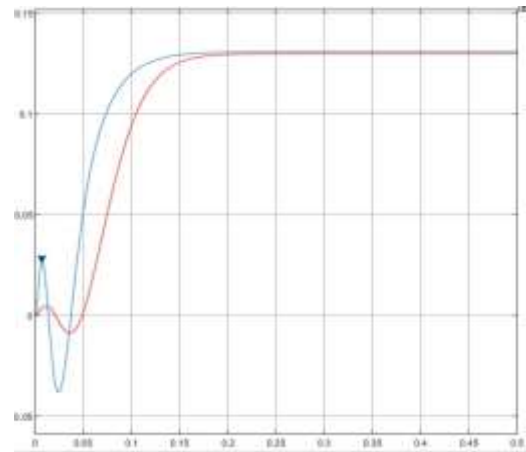
D =
      u1
y1      0
    
```

(b)

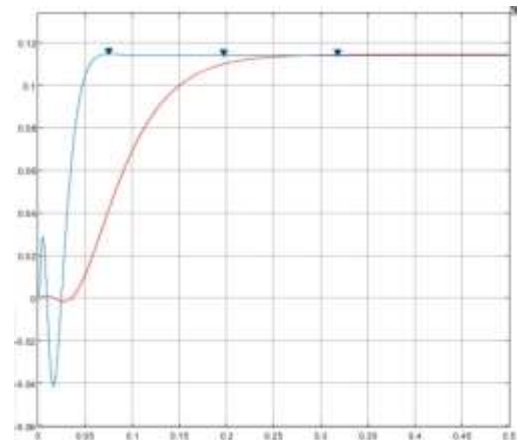
Figura 10. Ecuación de espacio estados (a) eje “X” (b) eje “Y”.

Diseño del controlador LQR

Para ambas señales, tanto en el eje “x” como en el eje “y”, se les aplicó el controlador LQR que mejor se ajustó a ellas, obteniendo las señales mostradas en la Fig. 9, en las cuales es notorio que la estabilización de las señales toma un menor tiempo con respecto a las señales originales, a pesar de verse afectadas por picos en la parte inicial de las mismas.



(a)

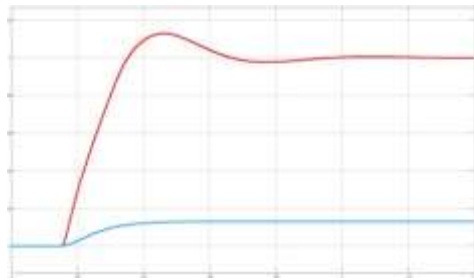


(b)

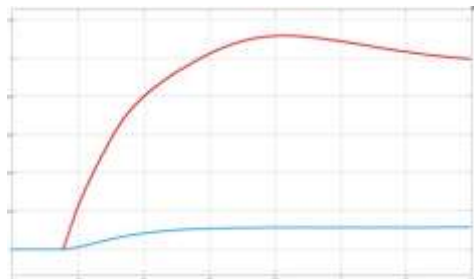
Figura 11. Señal controlada (a) eje “X” (b) eje “Y”.

Comparación con controlador PID

A modo de comparación, se diseñó un controlador PID con ayuda del toolbox de Matlab, obteniendo las respuestas mostradas en la Fig. 12. En estas figuras se pueden observar correcciones en el error estacionario de la planta; sin embargo, la estabilización toma una mayor cantidad de tiempo para alcanzar el valor de set point indicado.



(a)



(b)

Figura 12. Coeficientes de las ecuaciones de

espacio de estado del (a) eje “X” (b) eje “Y”.

CONCLUSIONES

Un controlador óptimo LQR tiene mayores beneficios en el tiempo de respuesta mejorando la rapidez de establecimiento sin embargo en sistemas con ganancia estática diferente de la unidad, como en la planta propuesta, no son capaces de corregir directamente el error estacionario. Es posible corregir sistemas con una buena respuesta transitoria, pero con error estacionario considerable escalando la entrada del sistema a la cual la salida al establecerse tendrá el mismo valor. Además, un controlador PID aplicado a una plataforma móvil nos da una respuesta con un error estacionario prácticamente nulo sin embargo es más difícil conseguir parámetros de rendimiento óptimos o mejores respecto al tiempo de respuesta como si lo hace el LQR.

CONFLICTO DE INTERÉS

El autor no tiene conflicto de interés de ninguna índole.

REFERENCIAS

- A. C. Limache, P. S. Rojas, y M. H. Murillo, “Diseño De Un Moderno Simulador De Vuelo En Tiempo Real”, vol. XXIX, pp. 15–18, 2010, [En línea] http://fich.unl.edu.ar/sinc/sinc-publications/2010/LRM10/sinc_LRM10.pdf
- H. M. Saputra, A. Nurhakim, y M. Mardanies, “Design of Servo Motor Controller Device for Antenna Stabilization Based on PID Controller”, 2019 Int. Conf. Comput. Control. Informatics its Appl. Emerg.

Trends Big Data Artif. Intell. IC3INA 2019, pp. 162–165, 2019, doi: <http://10.1109/IC3INA48034.2019.8949577>

J. Farzana Pasha y S. J. Mija, “Asymptotic Stabilization and Trajectory Tracking of 4 DOF Ball Balancer using LQR”, IEEE Reg. 10 Annu. Int. Conf. Proceedings/TENCON, vol. 2019- October, pp. 1411–1415, 2019, doi: <http://10.1109/TENCON.2019.8929327>

S. Awtar, C. Bernard, N. Boklund, A. Master, D. Ueda, y K. Craig, “Mechatronic design of a ball-on-plate balancing system”, Mechatronics, vol. 12, núm. 2, pp. 217–228, 2002, doi: [http://10.1016/S0957-4158\(01\)00062-9](http://10.1016/S0957-4158(01)00062-9)

Y. Parandian, H. Z. Arabshahi, A. Nasr, y S. A. A. Moosavian, “Time optimized digital image processing of ball and plate system using artificial neural network”, Int. Conf. Robot. Mechatronics, ICROM 2015, pp. 146–151, 2015, doi: <http://10.1109/ICRoM.2015.7367775>