

COLECCIÓN
INVESTIGACIÓN

CONTROL DIGITAL DE ORIENTACIÓN, POSICIÓN Y VELOCIDAD BASADO EN MOVIMIENTOS DE LA CABEZA PARA UN PROTOTIPO DE SIMULACIÓN DE SILLA DE RUEDAS

Aura Ximena González Cely
Mauro Callejas Cuervo
Manuel Andrés Vélez Guerrero



CONTROL DIGITAL DE ORIENTACIÓN, POSICIÓN Y VELOCIDAD BASADO EN MOVIMIENTOS DE LA CABEZA PARA UN PROTOTIPO DE SIMULACIÓN DE SILLA DE RUEDAS

Aura Ximena González Cely
Mauro Callejas Cuervo
Manuel Andrés Vélez Guerrero

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
2022



Control digital de orientación, posición y velocidad basado en movimientos de la cabeza para un prototipo de simulación de silla de ruedas / Orientation, position and velocity digital control based on head movements for a wheelchair simulation prototype / González Cely, Aura Ximena; Callejas Cuervo, Mauro; Vélez Guerrero, Manuel Andrés. Tunja: Editorial UPTC, 2022. 149 p.

ISBN (impreso) 978-958-660-623-3

ISBN (ePub) 978-958-660-624-0

1. Control inteligente. 2. Prototipo de silla de ruedas. 3. Control clásico. 4. Captura de movimiento de la cabeza. 5. Escala de Usabilidad del Sistema. 6. Modelamiento robot.

(Dewey 629.8 /21) (Thema TGX - Destrezas y oficios de la ingeniería)



Uptc[®]
Universidad Pedagógica y
Tecnológica de Colombia



Primera Edición, 2022

50 ejemplares (impresos)

Control digital de orientación, posición y velocidad basado en movimientos de la cabeza para un prototipo de simulación de silla de ruedas.

Orientation, position and velocity digital control based on head movements for a wheelchair simulation prototype.

ISBN (impreso) 978-958-660-623-3

ISBN (ePub) 978-958-660-624-0

Colección de Investigación UPTC No. 231

Proceso de arbitraje doble ciego

Recepción: noviembre de 2021

Aprobación: septiembre de 2021

© Aura Ximena González Cely, 2022

© Mauro Callejas Cuervo, 2022

© Manuel Andrés Vélez Guerrero, 2022

© Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, 2022

Editorial UPTC

Edificio Administrativo – Piso 4

La Colina, Manzana 7, Casa 5

Avenida Central del Norte No. 39-115, Tunja, Boyacá

comite.editorial@uptc.edu.co

www.uptc.edu.co

Rector, UPTC

Óscar Hernán Ramírez

Comité Editorial

Enrique Vera López, Ph. D.

Zaida Zarely Ojeda Pérez, Ph. D.

Yolima Bolívar Suárez, Mg.

Carlos Mauricio Moreno Téllez, Ph. D.

Pilar Jovanna Holguín Tovar, Mg.

Nelsy Rocío González Gutiérrez, Ph. D.

Manuel Humberto Restrepo Domínguez, Ph. D.

Óscar Pulido Cortés, Ph. D.

Edgar Nelson López López, Mg.

Editora en Jefe

Lida Esperanza Riscanevo Espitia, Ph. D.

Coordinadora Editorial

Andrea María Numpaque Acosta, Mg.

Corrección de Estilo

Nicolás López Blanco

Diagramación formato digital

Andrés A. López Ramírez

andres.lopez@uptc.edu.co

Libro financiado por la Vicerrectoría de Investigación y Extensión - Dirección de Investigaciones de la UPTC. Se permite la reproducción parcial o total, con la autorización expresa de los titulares del derecho de autor. Este libro es registrado en Depósito Legal, según lo establecido en la Ley 44 de 1993, el Decreto 460 del 16 de marzo de 1995, el Decreto 2150 de 1995 y el Decreto 358 de 2000.

Impreso y hecho en Colombia / Printed and made in Colombia.

Libro resultado de investigación con SGI 2657.

González-Cely, A., Callejas-Cuervo, M. & Vélez-Guerrero, M. (2022). *Control digital de orientación, posición y velocidad basado en movimientos de la cabeza para un prototipo de simulación de silla de ruedas*. Editorial UPTC.

doi: <https://doi.org/10.19053/9789586606233>

Resumen

Las diversas técnicas, métodos y tecnologías para la implementación de sistemas de control que pueden ser utilizados en sistemas de movilidad humana, como una silla de ruedas de accionamiento eléctrico o un prototipo de simulación de la misma, se han recolectado y analizado a través de una detallada revisión bibliográfica. A partir de ella, se han encontrado diferentes tipos de técnicas de instrumentación y control, especialmente las que implican movimientos corporales para accionar dispositivos de asistencia. La implementación del sistema de captura de movimiento utilizado en esta investigación permitió que los movimientos de la cabeza ejecutaran acciones de control en siete direcciones: hacia adelante, hacia atrás, hacia la derecha, hacia la izquierda, hacia atrás a la derecha, hacia atrás a la izquierda y la función de parada, para manejar un prototipo de simulación de silla de ruedas mediante una interfaz gráfica.

A partir del desarrollo de proyectos de captura de movimiento biomecánico en el Grupo de Investigación en Software GIS, surgió la motivación para realizar una investigación que se refleja en este libro. Se tiene como objetivo conocer los fundamentos teóricos y experimentales para el diseño e implementación de controladores digitales de posición, velocidad y orientación y, realizar una validación de los conceptos con la simulación de los procesos y después implementar el sistema en hardware y software utilizando un lenguaje de programación de alto nivel.

El desarrollo de este libro sienta un precedente en este ámbito de investigación al utilizar un sistema de captura de movimiento y diversas técnicas de control clásico e inteligente. Mediante la aplicación de la lógica difusa, se demuestra la viabilidad de accionar el prototipo de silla de ruedas en diferentes direcciones en función de la orientación de la cabeza, obteniendo las respuestas del sistema en tiempo real. Además, mediante el uso de técnicas de control clásicas, se evidencia la respuesta óptima del sistema, comparando y evaluando los resultados obtenidos.

En el ámbito de la salud, este libro presenta un desarrollo tecnológico para mejorar la movilidad de las personas con discapacidades en las extremidades

inferiores o superiores mediante el uso de los movimientos de la cabeza y el análisis de estas señales para impulsar un prototipo de simulación.

Desde el punto de vista de la ingeniería, concretamente de la ingeniería electrónica y la ingeniería de sistemas, se aplican conceptos teóricos y prácticos de las técnicas de control, discutiendo las teorías que se han presentado en la literatura y mejorando las implementaciones para que el sistema sea más rápido y responda mejor a las intenciones del usuario. Además, se utiliza la aplicación de sistemas basados en la lógica difusa y el uso del multiparalelismo para determinar la posición, la velocidad y la orientación del prototipo en tiempo real.

A través de esta investigación surgen trabajos futuros, como generar la completa autonomía del sistema para que las personas con condición de cuadriplejía puedan operarlo, y la implementación del sistema en una silla de ruedas física vaya más allá del prototipo de simulación.

Palabras Clave: Control inteligente; Prototipo de silla de ruedas; Control clásico; Captura de movimiento de la cabeza; Escala de Usabilidad del Sistema; modelamiento robot.

Abstract

Several techniques, methods, and technologies for implementing control systems that can be used in human mobility systems, such as an electric-powered wheelchair or a prototype, have been collected and analyzed through a detailed bibliographic review. From the above, we have found different instrumentation and control techniques, especially those involving body movements for driving assistance devices. The motion capture system implemented in this research included head movements executing control actions in seven directions: forward, backward, right, left, back to the right, back to the left and stop function. These movements allow driving a wheelchair simulation prototype through a graphical interface.

From the development of biomechanical motion capture projects in the GIS Software Research Group, the motivation to carry out research emerged is reflected in this book. The objective is to clearly and concisely understand the theoretical and experimental basis for the design and implementation of digital controllers of position, speed and orientation. Also, this book explains the simulation of the processes and implement the system in hardware and software using a high-level programming language.

The development of this book sets a precedent in this field of research by using a motion capture system and various techniques of classical and intelligent control. By applying fuzzy logic, the feasibility of operating the prototype wheelchair in different directions depending on the head's orientation is shown, obtaining responses from the system in real-time. Furthermore, by using classic control techniques, the optimal response of the system is evident by comparing and evaluating the results obtained.

From the health field, this book presents a technological development to improve the mobility of people with disabilities in the lower and/or upper limbs by using head movements and analyzing these signals to drive a simulation prototype.

From an engineering point of view, specifically from electronic engineering and systems engineering, theoretical and practical control techniques are applied. Furthermore, the theories that have been presented in the literature are

discussed. The implementations were improved so that the system is faster and has a better response to the user's intentions. In addition, the application of systems based on fuzzy logic and multiparallelism to determine the prototype's position, speed, and direction in real-time is used.

Through this research, future work emerges, such as generating the complete autonomy of the system for people with quadriplegia and implementing the system in a wheelchair beyond the prototype simulation.

Keywords: Intelligent control; Wheelchair prototype; Classical control; Head motion capture; System Usability Scale; Robot modelling..

Contenido

Abreviaturas

Introducción

1. Fundamentación teórica para la instrumentación, modelado y técnicas de control

1.1 Conceptos generales

1.1.1 Desviación estándar

1.1.2 Instrumentación electrónica

1.1.3 Función de transferencia

1.1.4 Planta

1.1.5 Sistema

1.1.6 Sistema de control realimentado

1.1.7 Representación en el espacio de estados

1.1.8 Control clásico

1.1.9 Control moderno

1.1.10 Control inteligente

1.1.11 Sistemas MicroElectroMecánicos (MEMS)

1.1.12 Ángulos Euler para el procesamiento de los movimientos de la cabeza

1.1.13 Filtro

1.1.14 Filtrado digital

1.1.15 Control automático

1.1.16 Control Proporcional-Derivativo PD

1.1.17 Modelo difuso Takagi-Sugeno

1.1.18 Protocolo de datagrama de usuario

1.1.19 Escala de Usabilidad del Sistema (EUS)

1.2 Estado del arte acerca de sistemas de control de orientación

2. Metodología para el diseño e implementación de controladores digitales

2.1 Identificación mediante una revisión sistemática de la literatura los tipos de controladores digitales principales que usan Unidades de Medición Inercial Magnéticas (IMU) y que utilicen los movimientos de la cabeza para el control de sillas de ruedas eléctricas

2.2 Instrumentación y modelado del prototipo de simulación de la silla de ruedas, estableciendo el principio para el diseño del controlador

2.3 Diseño e implementación del controlador digital teniendo en cuenta la estrategia o técnica seleccionada mediante la revisión inicial, utilizando un lenguaje de programación de alto nivel y desplegado en el hardware específico diseñado para el proyecto

2.4 Evaluación del rendimiento del sistema controlado mediante un plan de pruebas de laboratorio que compruebe las características de diseño y ejecución realizadas

3. Resultados de la investigación

3.1 Instrumentación electrónica del prototipo y configuración del sistema de captura de movimiento

3.1.1 Instrumentación del prototipo de simulación de silla de ruedas en cuanto al hardware del sistema

3.1.2 Instrumentación del prototipo de simulación de silla de ruedas en cuanto al software del sistema

3.1.3 Configuración del sistema de captura de movimiento

3.2 Modelado teórico e identificación del sistema mediante el modelo paramétrico del motor DC

3.2.1 Fundamentación teórica para diseño del modelo matemático

3.2.2 Modelo matemático del prototipo de silla de ruedas

3.2.3 Identificación del sistema con el modelo paramétrico del motor DC

3.3 Diseño e implementación de los controladores de posición, velocidad y orientación para el prototipo de simulación de silla de ruedas

3.3.1 Control manual mediante el uso de una interfaz gráfica

3.3.2 Control clásico y difuso de posición

3.3.3 Control difuso de velocidad

3.3.4 Control difuso de orientación con velocidad constante

3.3.5 Control difuso de orientación con velocidad variable

3.3.6 Control de orientación a velocidad constante con sistema de seguridad 114

3.4 Evaluación y validación del sistema

3.4.1 Elaboración del protocolo de pruebas del controlador electrónico

3.4.2 Validación del protocolo de pruebas del controlador electrónico

3.4.3 Elaboración del protocolo de pruebas para ser implementado por participantes

3.4.4 Validación del protocolo de pruebas para ser implementado por participantes

4. Discusión

4.1 Respuesta del sistema electrónico

4.1.1 Control de posición

4.1.2 Control de velocidad

4.1.3 Control de orientación

4.2 Experiencia de usuario

5. Conclusiones

Referencias

Abreviaturas

CAD	Controlador Análogo Digital (Analog Digital Controller)
CAN	Controlador de Red de Zona (Controller Area Network)
CDA	Controlador Digital Análogo (Digital Analog Controller)
DC	Corriente Continua (Direct current)
DMP	Procesador Digital de Movimiento (Digital Movement Processor)
EE-PROM	Memoria de solo lectura programable y borrrable eléctricamente (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory)
EUS	Escala de Usabilidad del Sistema (System Usability Scale)
FIFO	Primero en entrar, primero en salir (first-in, first-out)
GIS	Grupo de Investigación en Software (Software Research Group)
GSM	Sistema Global para las comunicaciones Móviles (Global System for Mobile communications)
GUI	Interfaz Gráfica de Usuario (Graphic User Interface)
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado (Integrated Development Environment)
IMU	Unidad Inercial de Movimiento (Inercial Movement Unit)
IP	Protocolo de Internet (Internet Protocole)
LTI	Sistema Lineal e Invariante (Linear Time-Invariant)
MEMS	Sistemas MicroElectroMecánicos (Microelectromechanical Systems)
MIMO	Múltiple Entrada Múltiple Salida (Multiple Input Multiple Output)
MISO	Múltiple Entrada Única Salida (Multiple Input Single Output)
MPU	Unidad Múltiple de Proceso (Multiple Process Unit)
OMS	Organización Mundial de la Salud (World Health Organization)
PD	Proporcional-Derivativo
PI	Proporcional-Integral

PID	Proporcional-Integral-Derivativo
PWM	Modulación de ancho de pulso (Pulse Width Modulation)
RAM	Memoria de acceso remoto (Random Access Memory)
RPM	Revoluciones por minuto
RTC	Reloj en tiempo real (Real Time Clock)
SISO	Única Entrada Única Salida (Single Input Single Output)
SIMO	Única Entrada Múltiple Salida (Single Input Multiple Ouput)
SoC	Sistema en un-Chip (System on a Chip)
UDP	Protocolo de Datagrama de Usuario (User Datagram Protocol)

Introducción

En el desarrollo de este libro se discute el diseño e implementación de un controlador de posición, velocidad y orientación en un prototipo de silla de ruedas que utiliza una interfaz gráfica, sistemas inerciales y algoritmos de control digital para la navegación. Este trabajo contribuye al conocimiento sobre el uso de los sensores inerciales en otros tipos de análisis más allá de la recopilación de información a nivel biomecánico, influyendo en el proceso de asistencia a la rehabilitación de personas con discapacidad, teniendo en cuenta la importancia de las herramientas de asistencia y características como el ambiente, la seguridad del paciente y la comodidad como lo menciona el capítulo cuatro del reporte mundial de discapacidad (Health Organization, 2011). Dentro de las características de esta investigación se resalta el control manual y automático del prototipo. El control manual implica el uso de botones para fijar una velocidad y luego dirigir el prototipo de simulación ejecutando dichos comportamientos.

El control automático utiliza sensores inerciales situados en la cabeza del usuario que permiten al prototipo moverse en siete direcciones: hacia delante, hacia atrás, hacia la derecha, hacia la izquierda, hacia atrás a la derecha, hacia atrás a la izquierda y detenerse. Este control de orientación puede utilizarse con una velocidad constante o con una velocidad variable en función de la inclinación de la cabeza en cualquier dirección. La regulación automática de la posición y la velocidad se basa en una medida de referencia determinada por el usuario y, posteriormente, impulsa el prototipo en una dirección específica a la velocidad deseada.

Las sillas de ruedas hacen parte de las ayudas tecnológicas que permiten mejorar la movilidad física cuando una persona se encuentra en condición de discapacidad, haciendo referencia a la deficiencia del desempeño funcional. “La discapacidad es el término genérico para deficiencias, limitaciones de actividad y restricciones de participación, que se refiere a los aspectos negativos de la interacción entre un individuo (con una condición de salud) y los factores contextuales de ese individuo (Health Organization, 2011).

Las causas de las deficiencias del desempeño funcional del cuerpo humano están vinculadas a problemas en la gestación, el nacimiento de la persona,

lesiones de la médula espinal y disfunciones orgánicas. Las deficiencias también se relacionan con el comportamiento sedentario (Ganz, Hammam, & Pritchard, 2020), la parálisis cerebral, diplejía, luxaciones, contracturas y escoliosis (Sol, Verschuren, de Groot, & de Groot, 2017), así como la espina bifida (Wright, 2000). También implican defectos del tubo neural, que se relaciona con los defectos congénitos del cerebro, la columna vertebral y la médula espinal (Busby et al., 2005). Además, las patologías que afectan a los niños tienen los mismos patrones de comportamiento que las patologías en los adultos jóvenes y otros rangos de edad.

En consecuencia, se hace hincapié en la importancia de proponer herramientas para mejorar la movilidad de las personas, tales como las ayudas tecnológicas a modo de mecanismos de asistencia.

El problema de movilidad es una situación que impacta a nivel local, nacional y mundial. Según las últimas hojas informativas de la OMS publicadas en diciembre de 2020 “se estima que más de mil millones de personas viven con algún tipo de discapacidad. Esto corresponde a aproximadamente el 15% de la población mundial, con hasta 190 millones (3.8%) de personas de 15 años o más que tienen dificultades importantes y que a menudo requieren servicios de salud. El número de personas que viven con discapacidad está aumentando, en parte debido al envejecimiento de la población y al aumento de las enfermedades crónicas” (Morad, Kandel, & Merrick, 2004). En Colombia, para el año 2019, el Registro de Localización y Caracterización de Personas en condición de discapacidad reportaba 1'298.738 personas. “Las personas con discapacidad registradas en Colombia, se concentran principalmente en Bogotá (18.5%), Antioquia (13.8%), y Huila (5.0%), Santander (4.7%), y Cali (4.2%)” (Alzate Julio César, Cárdenas Mariana, & Caro Santiago Alberto, n.d.).

Más específicamente y a nivel regional dentro de Colombia, en el departamento de Boyacá, se reporta un total de 41.869 personas que padecen algún tipo de deficiencia a partir del rendimiento funcional de sus extremidades, concerniente al 3.27% de la población total en el departamento. El porcentaje que presentan deficiencias en extremidades superiores e inferiores es del 53.9% de la totalidad de personas que reportan discapacidades físicas, es decir, 22.586 personas; de las cuales 11.123 son mujeres y 11.358 son hombres, sabiendo que esta condición prevalece más en los hombres. El 1.65% de las personas en condición de discapacidad física son de la ciudad de Tunja,