

ADQUISICIÓN DE VARIABLES ARTICULARES DE EXTREMIDAD INFERIOR, POR  
MEDIO DE UN SISTEMA DE TARJETAS INERCIALES

CAMILO RAMOS MOYANO

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ  
2014

ADQUISICIÓN DE VARIABLES ARTICULARES DE EXTREMIDAD INFERIOR, POR  
MEDIO DE UN SISTEMA DE TARJETAS INERCIALES

CAMILO RAMOS MOYANO

Trabajo de grado para optar por el título de:  
Maestría en Ingeniería Electrónica

Trabajo dirigido por:  
Ph.D Luis Eduardo Rodríguez Cheu.

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BOGOTÁ  
2014

**1. Fecha de Recepción:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Firma del Estudiante**

\_\_\_\_\_

**Firma del Director del Trabajo Dirigido**

**Fecha de presentación:** \_\_\_\_\_

**2. Aprobado:** \_\_\_\_\_ **Aplazado:** \_\_\_\_\_ **Rechazado:** \_\_\_\_\_

**Jurado 1:** \_\_\_\_\_

**Jurado 2:** \_\_\_\_\_

**Jurado 3:** \_\_\_\_\_

**3. Observaciones:**

---

---

---

---

---

**Notas:**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
1. PROBLEMA	12
2. OBJETIVOS	18
3. MARCO REFERENCIAL	19
3.1 LABORATORIOS DE MARCHA	19
3.1.1 Aspectos que se evalúan en un laboratorio de marcha	19
3.2 TÉCNICAS DE ADQUISICIÓN DE VARIABLES	19
3.2.1 Captura electromecánica	19
3.2.2 Captura electromagnética	20
3.2.3 Captura térmica	20
3.2.4 Captura óptica	21
3.2.5 Captura por fibra óptica	21
3.2.6 Captura por ultrasonido	22
3.2.7 Sistemas inerciales	22
3.3 CUADRO COMPARATIVO DE LOS SISTEMAS DE CAPTURA DE MOVIMIENTO	23
3.4 ANÁLISIS DE MARCHA	25
3.4.1 Ciclo de la marcha	26
3.4.2 Análisis cinemático de la marcha en el plano sagital	27
3.4.2.1 Fase I de la marcha	28

3.4.2.2	Fase II de la marcha	31
3.4.2.3	Fase III de la marcha	33
3.5	MÉTODOS DE CAPTURA USADOS EN LABORATORIOS DE MARCHA EN COLOMBIA	34
3.5.1	CIREC- Colombia	34
3.5.2	Instituto Roosevelt- Colombia	36
3.5.3	BIOMED- Colombia	36
3.5.4	Laboratorio de marcha de la UN-Colombia	38
4.	DISEÑO METODOLÓGICO	41
4.1	PARTES DEL PROYECTO	41
4.1.1	Fase I Diseño del Hardware	42
4.1.1.1	Selección de las tarjetas	42
4.1.1.2	Protocolo de comunicaciones I2C	45
4.1.1.3	Sensores Internos de la tarjeta GY-85	48
4.1.2	Fase II Diseño del software	52
4.1.2.1	Software ARDUINO	53
4.1.2.2	Software labVIEW	54
4.1.3	Implementación final (Fase III)	56
5.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO	57
5.1	VALIDACIÓN MANUAL	57
5.1.1	Articulación de cadera	58
5.1.2	Articulación de rodilla	59
5.1.2.1	Evaluación de extensión de rodilla	60
5.1.2.2	Evaluación de flexión de rodilla	60
5.1.3	Articulación de tobillo	61
5.1.4	Resultados de la validación con goniómetro comercial	62

5.2	VALIDACIÓN CON EQUIPO DE CAPTURA DE MOVIMIENTO CON CÁMARAS – BTS.	63
	5.2.1 Comparación de datos entre BTS y el sistema inercial	65
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
5.4	ALCANCES	71
6.	DISCUSIÓN	72
7.	CONCLUSIONES	75
8.	BIBLIOGRAFÍA	77

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Traje electromecánico.	20
Figura 2. Traje de captura por fibra óptica, shapewrap III de Measurand.	21
Figura 3. Traje de captura por sistemas inerciales.	22
Figura 4. Fases durante la marcha.	26
Figura 5. Estructura temporal del ciclo de marcha humana.	27
Figura 6. Plano sagital del cuerpo humano.	27
Figura 7. Ángulos de la articulación de tobillo en la fase I.	28
Figura 8. Ángulos de la articulación de rodilla en la fase I.	29
Figura 9. Ángulos de la articulación de cadera en la fase I.	30
Figura 10. Ángulos de la articulación de tobillo en la fase II.	31
Figura 11. Ángulos de la articulación de rodilla en la fase II.	32
Figura 12. Ángulos de la articulación de Cadera en la fase II.	33
Figura 13. Ángulos de la articulación de cadera en la fase III.	34
Figura 14. Sistema de calibración THOR2.	35
Figura 15. Protocolo Software Smart Analyzer.	38
Figura 16. Área de la pasarela con cámaras ya ubicadas.	39
Figura 17. Laboratorio de marcha.	40
Figura 18. Etapas de diseño, implementación y validación del proyecto	41
Figura 19. Arquitectura de la etapa de hardware, la comunicación entre bloques de hardware, se realiza por protocolo serial o.	42
Figura 20. Tarjeta GY 85	45
Figura 21. Líneas usadas por el protocolo I2C.	46
Figura 22. Conexión de las tarjetas al protocolo I2C	46
Figura 23. Diagrama de conexión final del hardware de adquisición de datos con las 4 IMU GY-85	47
Figura 24. División del software por tareas a realizar	53
Figura 25. Distribución del software en el ARDUINO UNO.	54
Figura 26. Tareas realizadas en labVIEW.	55
Figura 27. Goniómetro usado para medición de ángulos articulares.	57
Figura 28. Medición de ángulos de la cadera con el goniómetro	58
Figura 29. Ubicación de las tarjetas del sistema INERCIAL	59



Figura 30. Medición con goniómetro de extensión de rodilla	60
Figura 31. Medición con goniómetro de flexión de rodilla	61
Figura 32. Medición con goniómetro de la articulación de tobillo	62
Figura 33. Laboratorio de marcha (BTS) usado como elemento validador	63
Figura 34. Ubicación de marcadores de los dos sistemas INERCIAL y BTS.	64
Figura 35. Ángulos articulares tomados	64
Figura 36. Grafica de la variación de ángulos de rodilla en la toma realizada con el BTS. Donde se muestran los puntos de evaluación.	66
Figura 37. Grafica de la variación de ángulos de tobillo en la toma realizada con el BTS. Donde se muestran los puntos de evaluación.	66
Figura 38. Datos de error en las mediciones de ángulos articulares de rodilla en la etapa de validación en tres mediciones diferentes.	70
Figura 39. Datos de error en las mediciones de ángulos articulares de tobillo en la etapa de validación en tres mediciones diferentes	70

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cuadro evaluativo de las posibles soluciones.	15
Tabla 2. Cuadro comparativo de diferentes técnicas, para la adquisición de variables biomecánicas	23
Tabla 3. Análisis de articulación de tobillo en la fase I	28
Tabla 4. Análisis de articulación de rodilla en la fase I	29
Tabla 5. Análisis de articulación de cadera en la fase I	30
Tabla 6. Análisis de articulación de tobillo en la fase II	31
Tabla 7. Análisis de articulación de rodilla en la fase II	32
Tabla 8. Análisis de articulación de cadera en la fase II	32
Tabla 9. Análisis de articulación de tobillo en la fase III	33
Tabla 10. Análisis de articulación de rodilla en la fase III	33
Tabla 11. Análisis de articulación de Cadera en la fase III	34
Tabla 12. Tabla comparativa de IMU comerciales.	44
Tabla 13. Mapa de registros del acelerómetro ADXL345L.	49
Tabla 14. Mapa de registros del giroscopio ITG-3205A.	51
Tabla 15. Lista de registros del Magnetómetro HMC5883L.	52
Tabla 16. Resultados de la validación de datos con goniómetro	63
Tabla 17. Validación de las mediciones del sistema Inercial Vs. BTS comercial. <b>Primera medición.</b>	67
Tabla 18. Validación de las mediciones del sistema Inercial Vs. BTS comercial. <b>Segunda medición.</b>	68
Tabla 19. Validación de las mediciones del sistema Inercial Vs. BTS comercial. <b>Tercera medición.</b>	69

*Dedicado a:  
Mi familia y a mi novia,  
Quienes han sido fuente de amor y apoyo incondicional en este proceso.*

*En especial a mi madre, quien me ha enseñado que en la vida todo se puede superar.*

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a Dios por darme la oportunidad de terminar una nueva etapa profesional en mi vida. A mi familia que fueron, son y serán mi más grande motivo de alegría. A mi novia por apoyarme y comprenderme en momentos de mucho estrés.

Quiero agradecer a la Escuela Colombiana de Ingeniería y a cada uno de los docentes que me apoyaron y enseñaron a lo largo de estos dos años de estudio. A mi tutor de tesis le agradezco la entrega y compromiso que tuvo con la ejecución de este proyecto.