คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

****

ชื่อโครงการวิจัย

การตรวจสอบการล้มในผู้สูงอายุโดยตรวจสอบรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางมวล

(Falling Detection for Elderly by Detection the Pattern of Center of Mass)

คณะผู้วิจัย

ผศ.ดร.ธเนศ เคารพาพงศ์	หัวหน้าโครงการ
รศ.ดร. มิตรชัย จงเชี่ยวชำนาญ	ผู้ร่วมโครงการ
ผศ.พญ.วิภาวรรณ ลีลาสำราญ	ผู้ร่วมโครงการ
นายภาวินทร์ จาวยญ	ผู้ร่วมโครงการ

โครงการนี้ได้รับทุนวิจัยจากงบประมาณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ประจำปีงบประมาณ 2554

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนารองเท้าสำหรับผู้สูงอายุเพื่อใช้การตรวจสอบท่าทางการเดินที่ผิดปกติ อันเป็นสาเหตุที่นำไปสู่การล้มของผู้สูงอายุ ในงานวิจัยประยุกต์ใช้ตัวตรวจวัดหลายชนิดติดตั้งในรองเท้า คือ ตัวตรวจจัดความเร่ง และตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุม ตัวตรวจวัดแรงกด ตัวตรวจวัดความโค้งงอ ซึ่งตัวตรวจวัดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพแตกต่างกันไป เนื่องจากการเดินของมนุษย์มีความซับซ้อนการศึกษาหรือการวัดด้วยตัวตรวจรู้ชนิดเดียวนั้นไม่เพียงพอ ในงานวิจัยนี้จึงนำข้อมูลจากหลายชนิดตัวตรวจรู้มาศึกษาและวิเคราะห์ท่าทางการเดินของมนุษย์ โดยแบ่งการศึกษาการเดินออกเป็นสองช่วงคือช่วงที่เท้าสัมผัสพื้น และช่วงที่เท้าไม่สัมผัสพื้น โดยใช้ตัวตรวจวัดที่เหมาะสมตามช่วงของการเดิน ซึ่งในช่วงที่เท้าสัมผัสพื้น ตัวตรวจวัดแรงกดและตัวตรวจวัดความโค้งงอ โดยตัวตรวจรู้แรงกดสามารถนำมาประมาณทางเดินของจุดโมเมนต์ศูนย์ของการเดินได้ซึ่งเมื่อมนุษย์มีการเดินแบบปกติทางเดินของจุดโมเมนต์ศูนย์จะมีรูปแบบใกล้เคียงกันในแต่ละก้าว และผลการทดสอบตัวตรวจวัดความโค้งงอไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ได้เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเพียงเล็กน้อยเมื่อผู้ทดสอบทำการเดิน ส่วนในช่วงที่เท้าไม่สัมผัสพื้นนั้น ตัวตรวจวัดความเร่ง และตัวตรวจวัดความเร็วเชิงมุม ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานโดยอาศัยความสัมพันธ์ของรูปแบบทางเดินของความเร่งทั้งสามแกน เมื่อมนุษย์มีท่าทางการเดินปกติรูปแบบทางเดินของทั้ง 3 แกน ของความเร่ง และความเร็วเชิงมุม จะมีรูปแบบใกล้เคียงกันในแต่ละก้าว หลังจากศึกษาความสัมพันธ์ของสัญญาณจากตัวตรวจรู้ต่างๆในเบื้องต้นแล้ว ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์การประมวลผลแบบเครือข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการศึกษาจำแนกการเดินที่ปกติและผิดปกติ จากสัญญาณของตัววัดแรงกดใต้ฝ่าเท้าในช่วงที่เท้าสัมผัสพื้นซึ่งผลการทดลองมีความถูกต้องประมาณ 90%. โดยมีผู้เข้าร่วมทดสอบ 10 คนอายุระหว่าง 18-25 มีความสูงในช่วง 150-175 ซม. และมีน้ำหนักระหว่าง 40 – 75 กก. และในขณะที่เท้าไม่สัมผัสพื้นนั้นในงานวิจัยประยุกต์การประมานเชิงเส้น มาตรวจสอบการเดินที่ปกติและไม่ปกติ โดยอาศัยข้อมูลจากรูปแบบทางเดินของทั้ง 3 แกน ของความเร่ง และความเร็วเชิงมุม ซึ่งในการทดลองตรวจสอบวงรอบการก้าวจำนวน 74 ก้าวด้วยวิธีนี้ผลการตรวจสอบมีความถูกต้องประมาณ 85%

Abstract

This research presents the development of in-shoes multisensory for detected the abnormal gait in elderly people. As the cause that led to fall in the elderly. Numerous sensor types was installed in the shoes, such as the acceleration sensor, gyroscope, pressure sensors, bending sensor, which different features and performances in each type. Due to the complex of human walking, studies or measurements with a single sensor may not be enough. So, in this study took data from multi-sensory to study and analyze human gait, by divided into two phases, 1st when the foot touch the ground and 2nd when the foot do not touch the ground. Pressure sensors and bending sensor was applied to measurement, when the foot touches the ground. Data from pressure sensor are estimated Zero Moment Point (ZMP), ZMP are similarly every gait cycle of normal walking. The signal from bending sensor has small varying when human walk we cannot use to compare between normal and normal gait. During the foot not touching the ground, acceleration sensor was applied to study and classification, normal and abnormal gait. A three-axis accelerometer is installed at each foot to collect all three-axis data in Cartesian coordinate. Polynomial surface fitting technique is applied to the measured trajectory and classify. These data are subsequently transformed to spherical coordinate to form a 3-D gait trajectory. After studying the relationship of the signal from those sensors. In this research, artificial neural networks were used to study and classify normal and abnormal gait form pressure sensors signal, which is accurate about 90%. The 10 volunteers age between 18- 25 year, high 150-175 cm. weight 40 – 75 kg that came for experiment. In the experimental of three-axis accelerometer and gyroscope data, around 74 gait cycles are tested and compare with simulation data, which is accurate about 85% of preliminary.

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ....15

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ....16

1.2 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ....16

1.3 ทฤษฎีและหลักการ....16

1.4 ขอบเขตของการวิจัย....16

1.5 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย....17

บทที่ 2 ทฤษฎี หลักการ....18

2.1 การล้มในผู้สูงอายุ....18

2.2 วงรอบการก้าว (Gait Cycle)....19

2.3 โมเมนต์ศูนย์ (Zero Moment Point)....20

2.4 การตรวจวัดตำแหน่งและระยะการเดินในมนุษย์....22

2.5 การตรวจวัดแรงกระแทกจากการเดิน....22

2.6 การเดิน....23

2.7 ลักษณะการเดินของมนุษย์โดยปกติ....24

2.8 การเดินและการเคลื่อนไหวร่างกายมนุษย์ ทางชีวกลศาสตร์....25

2.9 การตรวจการเดินปกติ....27

2.10 การวิเคราะห์องศาอิสระของมนุษย์....27

2.11 ความเร่งกับการเดินของมนุษย์....27

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย....31

3.1 การทดลองเก็บข้อมูลการเดินโดยใช้ตัวตรวจรู้แรงกดที่ฝ่าเท้า....31

3.1.1 วงจรปรุงแต่งแรงดันของเซนเซอร์ *FSR* 32

3.1.2 ตำแหน่งในการติดติดตั้งตัวตรวจรู้ 33

3.1.3 การติดตั้ง ตัวตรวจรู้ ลงบนรองเท้า 34

3.2 การทดลองการวัดความเร่งของเท้าขณะเดิน 36

3.2.1 ลักษณะการตั้งของตัวตรวจรู้แรงบิด *2* แกน และผลการตอบสนองที่ได้ 37

3.2.2 ลักษณะการตั้งของตัวตรวจรู้แรงบิด *1* แกน และผลการตอบสนองที่ได้ 37

3.2.3 ซอฟต์แวร์ในการทดลอง 39

3.3 การทดลองตรวจจับความผิดปกติของการเดิน 40

3.3.1 การตรวจจับการเดินที่ผิดปกติโดยใช้ตัวตรวจรู้แรงกดที่ฝ่าเท้า 41

3.3.2 การจำลองการเดินปกติและตรวจจับการเดินที่ผิดปกติโดยใช้ตัวตรวจรู้ความเร่งที่เท้า 42

บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผล 44

4.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นของตัวตรวจจับแรงกดใต้ฝ่าเท้า 44

4.1.1 การเก็บข้อมูลเบื้องต้นของบริเวณที่ติดตั้งตัวตรวจรู้ 44

4.1.2 การนำคำนวณหาจุดศูนย์กลางมวล 45

4.1.3 การทดสอบเก็บข้อมูลทั้งสองเท้าและการหาจุดศูนย์กลางมวลรูปแบบที่ *1* 47

4.1.4 การเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการทดลองทั้งสองแบบ 51

4.2 การทดสอบกับตัวตรวจรู้ความเร่ง 60

4.2.1 การทดสอบเดินกับผู้ทดสอบ 61

4.2.2 ความสัมพันธ์ของตัวตรวจรู้ความเร่งที่เท้าทั้งสามแกน 81

4.2.3 ส่วนติดตัวตรวจรู้ความเร่งที่ปลายเท้า 81

4.2.4 ส่วนติดตัวตรวจรู้ความเร่งที่ส้นเท้า 85

4.3 การตรวจจับการเดินที่ผิดปกติ....88

4.3.1 การตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ตัวตรวจรู้แรงกดใต้ฝ่าเท้า....88

4.3.2 การตรวจจับความผิดปกติโดยใช้ตัวตรวจรู้ความเร่งที่เท้า....92

บทที่ 5 อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ....96

เอกสารอ้างอิง....97

ภาคผนวก....101

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 เฟสของการก้าว [15] 19

รูปที่ 2 เฟสของการก้าว [21] 19

รูปที่ 3 เฟสของการก้าว [6] 20

รูปที่ 4 (a) ZMP ของฝ่าเท้า [22] (b) การคำนวณ ZMP [16] 20

รูปที่ 5 ตำแหน่งของตัวตรวจรู้ตัวที่ i เมื่ออ้างอิงกับขอบเท้าที่จุด 0 21

รูปที่ 6 แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของมุมในส่วนของ สะโพกขวา สะโพกซ้าย เข่าขวา และเข่าซ้าย เมื่อมีการเดินแบบต่อเนื่อง 23

รูปที่ 7 ลักษณะการเดินของมนุษย์โดยปกติทั่วไป 25

รูปที่ 8 แสดงความเร่งแนวตั้งฉากของการเดินของมนุษย์ 28

รูปที่ 9 แสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงของมุมกับเวลา ในการเดินของคน จากกลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 7 ตัวอย่าง 29

รูปที่ 10 Force sensors 31

รูปที่ 11 flex sensor 31

รูปที่ 12 วงจรแบ่งและขยายแรงดันที่ใช้ในการทดสอบ 32

รูปที่ 13 วงจรแปลงสัญญาณที่ใช้ในการทดสอบการทำงานของเซนเซอร์ Flex sensor 32

รูปที่ 14 รูปแบบการทดลองที่ 1 33

รูปที่ 15 รูปแบบการทดลองที่ 2 33

รูปที่ 16 รูปแบบการทดลองที่ 3 33

รูปที่ 17 รูปแบบการทดลองที่ 4 34

รูปที่ 18 ตำแหน่งที่ทำการติดตั้ง ตัวตรวจรู้และรองเท้าที่ใช้ทดลอง 34

รูปที่ 19 ตัวตรวจรู้ที่ติดตั้งลงบนรองเท้า 35

รูปที่ 20 รองเท้าแบบที่สองที่ใช้ในการทดลอง 35

รูปที่ 21 ตัวอย่างการทดลองเก็บข้อมูล 35

รูปที่ 22 ตัวตรวจรู้ต่อกับบอร์ด FT232R 38

รูปที่ 23 พื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ 38

รูปที่ 24 ซอฟแวร์ในการบันทึกข้อมูลและวีดิโอ เพื่อทำการวิเคราะห์ผล 38

รูปที่ 25 แอปพลิเคชันที่ใช้ในการส่งข้อมูล 39

รูปที่ 26 ตัวอย่างของแอปพลิเคชั่นส่วนของเวลา 40

รูปที่ 27 ตัวอย่างข้อมูลจากตัวตรวจรู้ 40

รูปที่ 28 neural แบบอินพุตเดี่ยว 41

รูปที่ 29 ระบบ neural network ที่นำมาตรวจสอบความผิดปกติของการเดิน 41

รูปที่ 30 ประสิทธิภาพของ training function. 42

รูปที่ 31 ท่าทางของเท้าในขณะสวิงเฟส 42

รูปที่ 32 ขนาดของความเร่งขณะก้าวในสวิงเฟส 43

รูปที่ 33 ขั้นตอนการโมเดลวงรอบการก้าวแบบปกติ 43

รูปที่ 34 ตำแหน่งของตัวตรวจรู้ 44

รูปที่ 35 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 1 45

รูปที่ 36 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 2 45

รูปที่ 37 ระยะห่างของ ตัวตรวจรู้ แต่ละตัวจากจุดกำเนิด 46

รูปที่ 38 การแสดงจุดศูนย์กลางมวล 46

รูปที่ 39 ตำแหน่งของตัวตรวจรู้ที่ใช้ในการทดสอบแบบที่ 1 47

รูปที่ 40 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 1 47

รูปที่ 41 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 2 48

รูปที่ 42 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 3 48

รูปที่ 43 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 4 48

รูปที่ 44 หาตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางมวลบนขาข้างซ้ายของผู้ทดสอบที่ 1 49

รูปที่ 45 ตำแหน่งของ ตัวตรวจรู้ ที่ใช้ในการทดสอบแบบที่ 2 50

รูปที่ 46 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 1 50

รูปที่ 47 ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบครั้งที่ 2 50

รูปที่ 48 หาตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางมวลบนขาข้างซ้ายของผู้ทดสอบที่ 1 51

รูปที่ 49 ข้อมูลจาก ตัวตรวจวัดความโค้งงอ 56

รูปที่ 50 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลของผู้ทดสอบที่หนึ่ง 58

รูปที่ 51 การหาตำแหน่งการเปลี่ยนแปลงของจุดศูนย์กลางมวลบนขาข้างขวาของผู้ทดสอบที่ 1 58

รูปที่ 52 การติดตั้งตัวตรวจรู้แรงกด 59

รูปที่ 53 ต้นแบบวงจรของอุปกรณ์สำหรับตรวจสอบท่าทางการเดินที่ผิดปกติของมนุษย์ 59

รูปที่ 54 ตัวตรวจรู้ความเร่งในเท้าขวา 60

รูปที่ 55 ตัวตรวจรู้ความเร่งในเท้าซ้าย 60

รูปที่ 56 ตัวตรวจรู้แรงบิดในเท้าขวา 60

รูปที่ 57 ตัวตรวจรู้แรงบิดเท้าซ้าย 61

รูปที่ 58 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 1 61

รูปที่ 59 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 1 61

รูปที่ 60 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 1 62

รูปที่ 61 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 1 62

รูปที่ 62 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 2 63

รูปที่ 63 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 2 63

รูปที่ 64 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 2 64

รูปที่ 65 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 2 64

รูปที่ 66 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 3 65

รูปที่ 67 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 3 65

รูปที่ 68 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 3 66

รูปที่ 69 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 3 66

รูปที่ 70 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 4 67

รูปที่ 71 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 4 67

รูปที่ 72 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 4 68

รูปที่ 73 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 4 68

รูปที่ 74 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 5 69

รูปที่ 75 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 5 69

รูปที่ 76 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 5 70

รูปที่ 77 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 5 70

รูปที่ 78 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 6 71

รูปที่ 79 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 6 71

รูปที่ 80 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 6 72

รูปที่ 81 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 6 72

รูปที่ 82 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 7 73

รูปที่ 83 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 7 73

รูปที่ 84 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 7 74

รูปที่ 85 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 7 74

รูปที่ 86 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 8 75

รูปที่ 87 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 8 75

รูปที่ 88 กราฟแรงบิดในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 8 76

รูปที่ 89 กราฟแรงบิดในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 8 76

รูปที่ 90 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 9 77

รูปที่ 91 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 9 77

รูปที่ 92 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 9 78

รูปที่ 93 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 9 78

รูปที่ 94 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 10 79

รูปที่ 95 กราฟความเร่งในเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 10 79

รูปที่ 96 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 10 80

รูปที่ 97 กราฟความเร่งในเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 10 80

รูปที่ 98 ผลของ Butter-Worth Filter 81

รูปที่ 99 กราฟความเร่งเท้าขวาที่ผ่าน Butter-Worth Filter ผู้ทดสอบคนที่ 1 ตามแนวแกน X, Y และ Z..... 81

รูปที่ 100 กราฟความเร่งเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกนทั้งสาม..... 82

รูปที่ 101 กราฟความเร่งเท้าขวา 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Y..... 82

รูปที่ 102 กราฟความเร่งเท้าขวา 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน Y และ Z..... 82

รูปที่ 103 กราฟความเร่งเท้าขวา 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Z..... 83

รูปที่ 104 กราฟความเร่งหลังผ่าน Butter-Worth Filter เท้าซ้ายผู้ทดสอบคนที่ 1 ตามแนวแกน X, Y และ Z83

รูปที่ 105 กราฟความเร่งเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกนทั้งสาม..... 83

รูปที่ 106 กราฟความเร่งเท้าซ้าย 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Y 84

รูปที่ 107 กราฟความเร่งเท้าซ้าย 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน Y และ Z..... 84

รูปที่ 108 กราฟความเร่งเท้าซ้าย 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Z..... 84

รูปที่ 109 กราฟความเร่งเท้าขวาหลังผ่าน Butter-Worth Filter ผู้ทดสอบคนที่ 1 ตามแนวแกน X,Y และ Z. 85

รูปที่ 110 กราฟความเร่งเท้าขวาของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกนทั้งสาม..... 85

รูปที่ 111 กราฟความเร่งเท้าขวา 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Y..... 86

รูปที่ 112 กราฟความเร่งเท้าขวา 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน Y และ Z..... 86

รูปที่ 113 กราฟความเร่งเท้าขวา 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Z..... 86

รูปที่ 114 กราฟความเร่งเท้าซ้ายหลังผ่าน Butter-Worth Filter ผู้ทดสอบคนที่ 1 ตามแนวแกน X, Y และ Z 87

รูปที่ 115 กราฟความเร่งเท้าซ้ายของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อเปรียบเทียบกับแนวแกนทั้งสาม..... 87

รูปที่ 116 กราฟความเร่งเท้าซ้าย 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Y 87

รูปที่ 117 กราฟความเร่งเท้าซ้าย 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน Y และ Z..... 88

รูปที่ 118 กราฟความเร่งเท้าซ้าย 3 ก้าวของผู้ทดสอบคนที่ 1 เมื่อหาความสัมพันธ์ของแนวแกน X และ Z..... 88

รูปที่ 119 ข้อมูลที่นำมาเทรนให้กับ นิวรอน..... 89

รูปที่ 120 ข้อมูลที่นำมาทำการทดลองซึ่งมีการเดินผิดปกติรวมอยู่ด้วย..... 89

รูปที่ 121 ทางเดิน ของ ZMP ของก้าวที่ 1..... 90

รูปที่ 122 ทางเดิน ของ ZMP ของก้าวที่ 2..... 90

รูปที่ 123 ทางเดิน ของ ZMP ของก้าวที่ 3..... 90

รูปที่ 124 ทางเดิน ของ ZMP ของก้าวที่ 4..... 91

รูปที่ 125 ทางเดิน ของ ZMP ของก้าวที่ 5 91

รูปที่ 126 แผนภาพการตรวจสอบความผิดปกติของการเดิน 92

รูปที่ 127 วงรอบความสัมพันธ์ของสัญญาณความเร่งทั้งสามแกนในการก้าวขึ้น 93

รูปที่ 128 ความผิดพลาดในแต่ละจุดข้อมูลในช่วงการแกว่งเท้าขึ้น 93

รูปที่ 129 วงรอบความสัมพันธ์ของสัญญาณความเร่งทั้งสามแกนในการก้าวลง 94

รูปที่ 130 ความผิดพลาดในแต่ละจุดข้อมูลในช่วงการแกว่งเท้าลง 94

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 สาเหตุที่ก่อให้เกิดการล้ม 18

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลขาข้างขวาของผู้ทดสอบที่หนึ่ง 52

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลขาข้างขวาของผู้ทดสอบที่สอง 53

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลขาข้างขวาของผู้ทดสอบที่สาม 54

ตารางที่ 5 ข้อมูลที่ได้จากตัวตรวจรู้ความโค้งงอ 55

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบจุดศูนย์กลางมวลขาข้างซ้ายของผู้ทดสอบที่ห้า 56

ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของแบบจำลองและข้อมูลจริง 92

ตารางที่ 8 ร้อยละของค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากแบบจำลองและข้อมูลจริง 95