ระบบช่วยการขับรถยนต์ในทางโค้งโดยการประมวลผลภาพ

Curve-Driving Support System Using Image Processing

ดร. โกสินทร์ จำนงไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ

Kosin Chamnongthai, PhD.

Assistant Professor

King Mongkut's Institute of Technology Thonburi, Bangkok

บทคัดย่อ

ในเวลาที่คนขับรถขับเข้าทางโค้ง ตาของคนขับรถจะรับภาพ 2 มิติเข้ามา แล้วทำการคำนวณหารูปร่างเชิง 3 มิติของถนน เพื่อคาดคะเนความเร็วที่เหมาะสมในการเข้าทางโค้ง แต่ถ้าความเร็วของรถยนต์นั้นเกินกว่าความเร็วสูงสุดที่ผู้ออกแบบถนนกำหนดไว้ รถยนต์อาจถูกแรงหนีศูนย์กลางเหวี่ยงออกไปนอกทางโค้งได้ ซึ่งปัจจุบันอุบัติเหตุประเภทนี้เกิดขึ้นมาก ในบทความนี้ขอเสนอระบบช่วยการขับรถยนต์เข้าทางโค้งอย่างปลอดภัยโดยการประมวลผลภาพเส้นขาวบนถนนที่เห็นจากด้านหน้าของรถยนต์ เพื่อหารัศมีและมุมเอียงของทางโค้ง และใช้รัศมีและมุมเอียงของทางโค้งนี้ในการหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้จากตารางซึ่งกำหนดขึ้นตามกฎหมายเกี่ยวกับการสร้างถนน แล้วนำไปเปรียบเทียบกับความเร็วขณะที่รถยนต์กำลังวิ่ง ซึ่งถ้ารถยนต์วิ่งเร็วเกินกำหนดและอยู่ในสภาพอันตราย ระบบจะเตือนให้ผู้ขับทราบ และจากการทดลองกับทางด่วนบางส่วนในกรุงเทพฯ ทำให้ทราบว่าระบบนี้สามารถเตือนในเวลาที่รถยนต์วิ่งเกินความเร็วที่เหมาะสมได้

ABSTRACT

The driver's eyes recieve 2 dimentional image of the road and convert it into 3 dimentional shape during his drive. When the vehicle runs on curve, appropriate speed is estimated from curve's radius. But if the speed of vehicle is higher than maximum-speed which is determined by road's designer, the vehicle will be thrown outside by centrifugal force. And nowadays this kind of accident is often occured. In this paper, Curve-Driving Support System Using Image Processing is presented. The system processes images of white line (or dash line) on the road for extracting its radius and bank. Then maximum-speed for running on the curve is determined by look-up table according to road-construction law. When the vehicle is in danger such as over maximum-speed running, alarm will be on. And experiments on a part of Bangkok's highway reveal that this approach outperforms detection of over maximum-speed running.

1. บทนำ

ในการขับรถยนต์บนถนน ผู้ขับรถจะใช้ตาในการรับภาพถนนและใช้สมองในการกำหนดความเร็ว ทิศทาง ฯลฯ ของรถยนต์ ซึ่งการทำงานของตาและสมองจะเป็นไปอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ประสาทสัมผัสอื่นๆ เช่น ที่บริเวณมือและเท้าจะทำหน้าที่บังคับพวงมาลัยและคันเร่งเสมอเพื่อบังคับเครื่องยนต์และรถยนต์ โดยคำสั่งจากสมอง จึงเห็นได้ว่าอวัยวะต่างๆ ถูกใช้อย่างหนักเพื่อการขับรถยนต์ ทำให้บางครั้งผู้ขับรถเกิดความเมื่อยล้า และก่อให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้

ในต่างประเทศ เช่น สหรัฐอเมริกา เยอรมัน ญี่ปุ่น ฯลฯ ได้มีความพยายามที่จะลดอุบัติเหตุบนท้องถนนที่เกิดจากคนขับ โดยมีโครงงานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างรถยนต์ซึ่งวิ่งได้เองตามลำพังโดยไม่ต้องมีคนขับ ยกตัวอย่างเช่น ในสหรัฐอเมริกา นักวิจัยจากหลายสถาบันพยายามวิจัยในโครงงานเกี่ยวกับ ALV (Autonomous Land Vehicle)[1] ในญี่ปุ่นมีความพยายามที่จะคำนวณหาข้อมูล 3 มิติของถนนจากข้อมูลภาพ[2,3,4] ส่วนในเยอรมันมีนักวิจัยที่พยายามใช้เทคนิคการประมวลผลภาพในการขับรถยนต์ โดยมีการทดลองใช้รถยนต์วิ่งบนถนนจริงในหลายๆ สภาพ[5] ฯลฯ ซึ่งโครงงานวิจัยเหล่านี้มีเป้าหมายในการสร้างระบบขับรถยนต์ให้วิ่งเองโดยลำพังเพื่อลดอุบัติเหตุ

ส่วนโครงงานวิจัยนี้ มีจุดประสงค์ที่จะลดอุบัติเหตุที่เกิดจากการขับรถโดยมนุษย์ในทางโค้งด้วยความเร็วสูงเกินกำหนด ซึ่งสันนิษฐานได้ว่าเกิดจากการที่คนขับมองภาพทางโค้งแล้วคาดคะเนความเร็วที่เหมาะสมผิด โดยบทความนี้ขอเสนอระบบช่วยการขับรถยนต์เข้าทางโค้งอย่างปลอดภัยโดยการประมวลผลภาพเส้นขาวบนถนน เพื่อคำนวณหามุมเอียงและรัศมีของทางโค้ง แล้วหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้ในทางโค้งนั้นจากตารางเทียบซึ่งถูกคำนวณและรวบรวมไว้ก่อนแล้วตามกฎหมายเกี่ยวกับการสร้างถนน เมื่อรถยนต์วิ่งบนทางโค้งด้วยความเร็วที่สูงกว่าความเร็วสูงสุดที่คำนวณไว้ ระบบจะทำการเตือนผู้ขับรถยนต์ และจากการทดลองกับภาพต่อเนื่องของทางโค้งบนทางด่วน

บางส่วนในกรุงเทพฯ ทำให้ทราบว่าระบบนี้สามารถรู้จำทางตรงและทางโค้ง และสามารถคำนวณรัศมีของทางโค้ง และเตือนในเวลาที่รถยนต์ วิ่งเกินความเร็วที่เหมาะสมได้

2 แนวความคิดพื้นฐาน

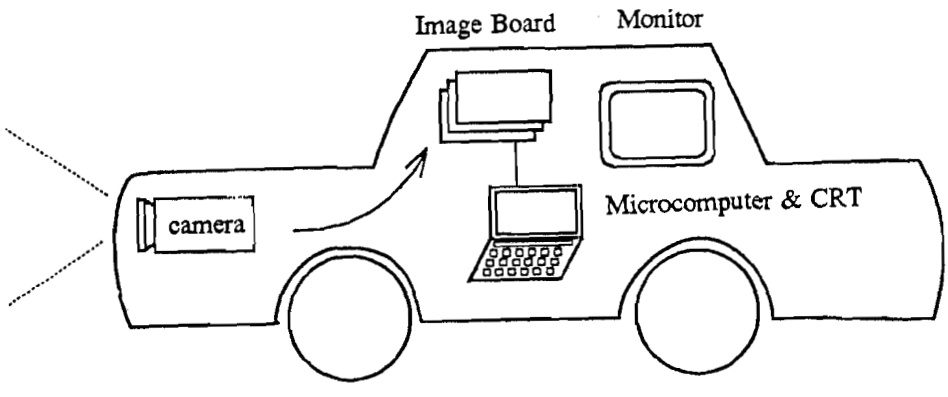
เวลาที่ผู้ขับรถยนต์ขับรถเข้าทางโค้ง ผู้ขับจะกำหนดความเร็วและทิศทางของรถยนต์จากภาพถนนหรือภาพเส้นขาวบนถนน และทำการปรับค่าทั้ง 2 เสมอ ให้รถยนต์สามารถวิ่งไปในกรอบของทางได้ โดยมิได้มีการคำนวณเป็นตัวเลขที่แน่นอน แต่เนื่องจากถนน (โดยเฉพาะทางด่วน) ถูกออกแบบและสร้างตามมาตรฐานการก่อสร้างทางซึ่งหน่วยงานของรัฐที่เกี่ยวข้องเป็นผู้กำหนดขึ้น เช่น ในญี่ปุ่น[7] สหรัฐอเมริกา[8] ฯลฯ มีการกำหนดมาตรฐานต่างๆ เกี่ยวกับถนนโดยผู้ก่อสร้างถนนจะต้องปฏิบัติตาม ดังนั้นถ้านำเอาความรู้ที่เกี่ยวกับมาตรฐานที่ถูกกำหนดเป็นแบบแผนในการออกแบบและสร้างถนนมาช่วยในการประมวลผลภาพถนนเพื่อคำนวณความเร็วสูงสุดที่วิ่งได้ของรถยนต์แล้ว เราจะสามารถทราบความเร็วสูงสุดเป็นตัวเลขที่แน่นอนของทางโค้งแต่ละทางโค้งได้ตั้งแต่รถยนต์เริ่มเข้าทางโค้ง และตลอดเวลาที่รถยนต์วิ่งอยู่บนทางโค้ง ซึ่งจะช่วยในการกำหนดความเร็วและทิศทางของรถยนต์ให้แก่ผู้ขับ โดยเฉพาะสำหรับนักขับรถยนต์มือใหม่ นักขับรถยนต์ที่ยังไม่ชินกับถนนนั้นๆ เป็นต้น ในบทความนี้จึงขอเสนอการนำความรู้เกี่ยวกับมาตรฐานของถนนมาเป็นข้อมูลอ้างอิงเพื่อคำนวณหาความเร็วสูงสุดที่รถสามารถวิ่งได้ในทางโค้ง

3 ระบบทางฮาร์ดแวร์และซอฟท์แวร์

ระบบช่วยขับรถยนต์ในทางโค้งประกอบด้วยอุปกรณ์และหน่วยต่างๆ โดยแบ่งอย่างกว้างๆ ได้เป็น ระบบทางฮาร์ดแวร์และทางซอฟท์แวร์ ดังนี้

3.1 ฮาร์ดแวร์

ทางฮาร์ดแวร์มีโครงสร้างและส่วนประกอบดังแสดงในรูปที่ 1 ดังนี้



รูปที่ 1 ระบบทางฮาร์ดแวร์

3.1.1 กล้อง เป็นหน่วยป้อนข้อมูลภาพถนน โดยติดตั้งที่ด้านหน้าของรถยนต์

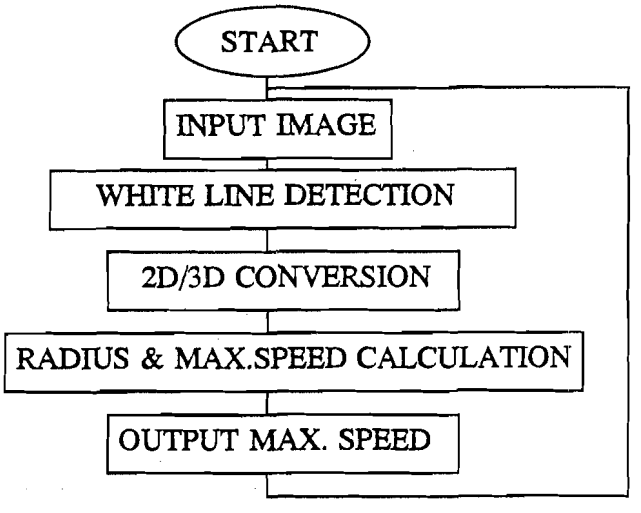
3.1.2 หน่วยความจำข้อมูลภาพ เป็นหน่วยที่รับสัญญาณภาพแบบอะนะล็อกมาแปลงเป็นสัญญาณดิจิตอล และเก็บไว้ในหน่วยความจำภาพเฉพาะเพื่อรอการประมวลผลจากซีพียู

3.1.3 ซีพียู เป็นหน่วยประมวลผลภาพซึ่งถูกเก็บที่ 3.1.2 และจะแสดงผลการประมวลผลที่จอภาพ (CRT) เช่น รัศมีของทางโค้ง ความเร็วสูงสุดที่รถยนต์สามารถวิ่งได้ ฯลฯ

3.1.4 มอนิเตอร์ เป็นหน่วยแสดงภาพของข้อมูลภาพที่ถูกเก็บใน 3.1.2 เพื่อแสดงให้เห็นขบวนการประมวลผลภาพ

3.2 ซอฟท์แวร์

มีโครงสร้างของระบบดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 ลำดับของขบวนการและโครงสร้างระบบทางซอฟท์แวร์

3.2.1 การป้อนข้อมูลภาพ

เป็นการป้อนข้อมูลภาพของถนนซึ่งเป็นความสว่างแล้วแปลงให้เป็นสัญญาณอะนะล็อกโดยกล้องที่ติดตั้งหน้ารถยนต์

3.2.2 การดึงภาพเส้นขาวบนถนน

เป็นขบวนการแยกภาพเส้นขาวออกจากภาพถนนและภาพอื่นๆ เพื่อหาตำแหน่งที่แท้จริงของเส้นขาว (รายละเอียดกล่าวใน 3.1)

3.2.3 การคำนวณหาตำแหน่งในเชิง 3 มิติ

เป็นการแปลงตำแหน่งบนภาพซึ่งเป็นข้อมูลเชิง 2 มิติของเส้นขาว ให้เป็นตำแหน่งใน 3 มิติ (รายละเอียดกล่าวใน 3.2)

3.2.4 การคำนวณหารัศมีของทางโค้ง

เป็นการคำนวณรัศมีจากตำแหน่งของเส้นขาวซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของเส้นรอบวงในเชิง 3 มิติ (รายละเอียดกล่าวใน 3.3)

3.2.5 การคำนวณหาความเร็วสูงสุด

เป็นการคำนวณหาความเร็วสูงสุดที่รถยนต์สามารถวิ่งได้โดยไม่ถูกแรงหนีศูนย์กลางดึงให้หลุดพ้นออกไปจากทางโค้ง โดยใช้รัศมีและกฎข้อบังคับในการออกแบบสร้างทางเป็นข้อมูลในการคำนวณ (รายละเอียดกล่าวใน 3.4)

3.2.6 การแสดงผลและการเตือน

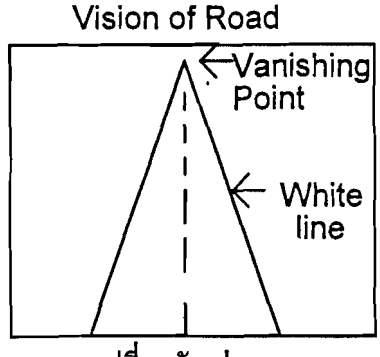
เป็นขบวนการแสดงความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้ และระบบจะเตือนให้ผู้ขับรถยนต์ลดความเร็วลง ในกรณีที่ความเร็วที่รถยนต์กำลังวิ่งเร็วกว่าความเร็วสูงสุดที่คำนวณได้ เช่น โดยการเปล่งเสียงเตือน กระพริบไฟให้สว่างบนจอ เป็นต้น

4 วิธีการ

4.1 การดึงภาพเส้นขาว

ก่อนอื่นระบบจะทำการประมวลผลเบื้องต้น(Pre-process)กับภาพถนนที่ถูกป้อนเข้ามาและเก็บอยู่ในหน่วยความจำ กล่าวคือ ทำการแปลงให้เป็นภาพ 2 ค่า (Binarization)[6] เพื่อแยกเส้นขาวกับถนนและฉากด้านหลังออกอย่างสิ้นเชิง แล้วทำขบวนการทำเส้นให้บาง (Thinning)[6] โดยทำให้ความกว้างของเส้นขาวเป็น 1 พิกเซล เพื่อสะดวกในการกำหนดตำแหน่งของเส้นขาว

หลังจากที่ผ่านการประมวลผลเบื้องต้นแล้ว ระบบจะสแกนหาตำแหน่งของเส้นขาวทั้งด้านซ้าย และขวาโดยเริ่มจากด้านล่างของภาพขึ้นไปด้านบน เนื่องจากธรรมชาติของภาพเส้นขาวบนถนนจะทอดยาวออกจาก 2 ด้านของตัวรถยนต์ไปข้างหน้าและไปรวมที่จุดไกลจุดหนึ่ง(Vanishing Point) (ดังในรูปที่ 3) แล้วเก็บตำแหน่งของเส้นตรงที่สแกนได้เหล่านี้เป็นข้อมูลภาพ (2มิติ) ของเส้นขาว

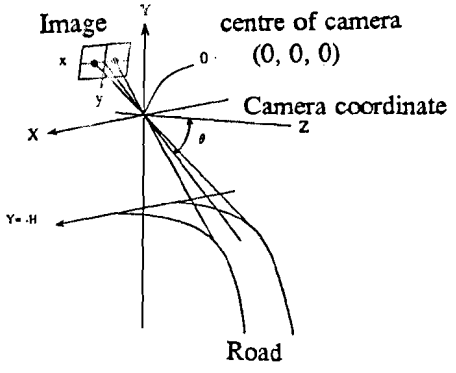


รูปที่ 3 ตัวอย่างภาพถนน

4.2 การแปลงข้อมูลภาพให้เป็นข้อมูลเชิง3มิติ

การแปลงข้อมูลภาพ (2มิติ) ให้เป็นข้อมูลเชิง 3 มิติ กระทำได้ดังนี้

สมมุติให้แกนภาพเป็น (x,y) และแกนกล้องเป็น (X,Y,Z) ดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แกนภาพและแกนกล้อง

โดยแกนทั้ง 2 มีความสัมพันธ์ดังนี้

$x = FX / (Z \cos\theta - Y \sin\theta)$ 4.1

$y = F (Y\cos\theta + Z \sin\theta) / (Z \cos\theta - Y \sin\theta)$ 4.2

โดย F: ระยะโฟกัส θ: มุมก้มของกล้อง

แต่เนื่องจากกล้องที่ติดตั้งในระบบนี้มองตรงขนานกับพื้นดิน($\theta = 0$) ดังนั้น

$x = FX / Z$ 4.3

$y = FY / Z$ 4.4

หรือ

$X = xZ / F$ 4.5

$Z = FY / y$ 4.6

4.3 การคำนวณหารัศมีของทางโค้ง

การคำนวณหารัศมีของทางโค้งกระทำได้โดยการคำนวณทางตรีโกณมิติ โดยมีค่าที่ทราบก่อนดังในรูปที่ 5 คือ (X_1,Z_1), (X_2,Z_2), (X_3,Z_3), และตำแหน่งของ A,B,C

ดังนั้น เราสามารถคำนวณรัศมีได้ตามลำดับดังนี้

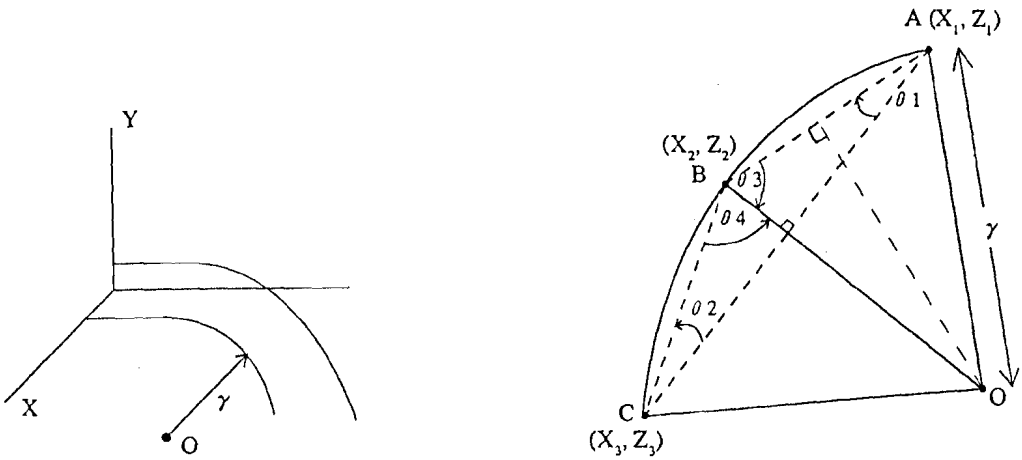
1: หาความยาวด้าน AB, BC, AC จากตำแหน่งของจุด A, B, C

2: หามุม θ_1, θ_2 จากตำแหน่งของจุด A, B, C

3: เนื่องจากเป็นสามเหลี่ยมมุมฉาก หามุม θ_3 จาก θ_1 และหามุม θ_4 จาก θ_2

4: หาระยะ γ หรือด้าน AO จากมุม θ_3 กับด้าน AB

4.4 การคำนวณหาความเร็วสูงสุดของรถยนต์บนทางโค้ง



รูปที่ 5 การคำนวณรัศมีของทางโค้ง

ความเร็วสูงสุดของรถยนต์บนทางโค้งกำหนดได้ดังนี้

สมมุติให้ Z: แรงหนีศูนย์กลาง (kg)

v: ความเร็วของรถยนต์ (m/s)

g: ความเร่งของแรงดึงดูดโลก ($\approx$ 9.8)

G: น้ำหนักทั้งหมดของรถยนต์

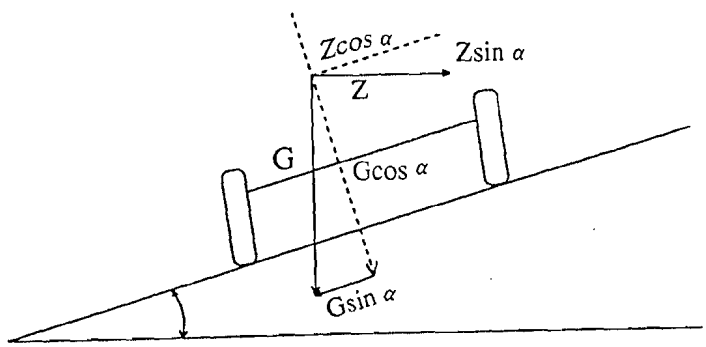
f: พารามิเตอร์ของแรงเสียดทานระหว่างยางรถยนต์กับพื้นถนนที่มีต่อการลื่นในแนวขวาง

i: ความชันของถนน (=tan α)

R: รัศมีของทางโค้ง (m)

แรงหนีศูนย์กลางสามารถคำนวณดังในรูปที่ 6 ได้ดังนี้[7]

$$Z = Gv^2 / gR \qquad 4.7$$



รูปที่ 6 แรงที่กระทำต่อรถยนต์ในระหว่างวิ่งบนทางโค้ง

น้ำหนักทั้งหมดของรถยนต์ G และแรง Z จะกระทำต่อจุดศูนย์ถ่วงของรถยนต์ ดังนั้น เงื่อนไขที่ไม่ทำให้รถยนต์ลื่น

$$Z\cos\alpha - G\sin\alpha \leq f(Z\sin\alpha + G\cos\alpha) \quad 4.8$$

ถ้าหารด้วย $\cos\alpha$ และแทนค่า $Z = (Gv^2) / (gR)$ และ $\tan\alpha = i$ แล้ว

$$v^2 / (gR) - i \leq f(((v^2 i) / gR) + 1)$$

$$v^2 \leq gR(f + i) / (1 - fi) \text{ หรือ } R \geq (v^2 / g)((1 - fi) / (f + i))$$

และ เนื่องจาก ค่าของ fi เล็กมากเมื่อเทียบกับ 1 ดังนั้น สามารถกล่าวได้ดังนี้

$$v^2 \leq gR(f + 1) \text{ หรือ } R \geq v^2 / (g(f + i)) \quad 4.9$$

ถ้าแสดงความเร็ว(v)ในการออกแบบด้วย km/h แล้ว เนื่องจาก $v^2 / (v^2 / g) = 3.6^2 \times 9.81 \approx 127$ สามารถกล่าวได้ว่า

$$v^2 \leq 127R(f + 1) \text{ หรือ } R \geq v^2 / (127(f + i)) \quad 4.10$$

ดังนั้น ความเร็วสูงสุด $v = \sqrt{127R(f + 1)}$

5. การทดลองและผลการทดลอง

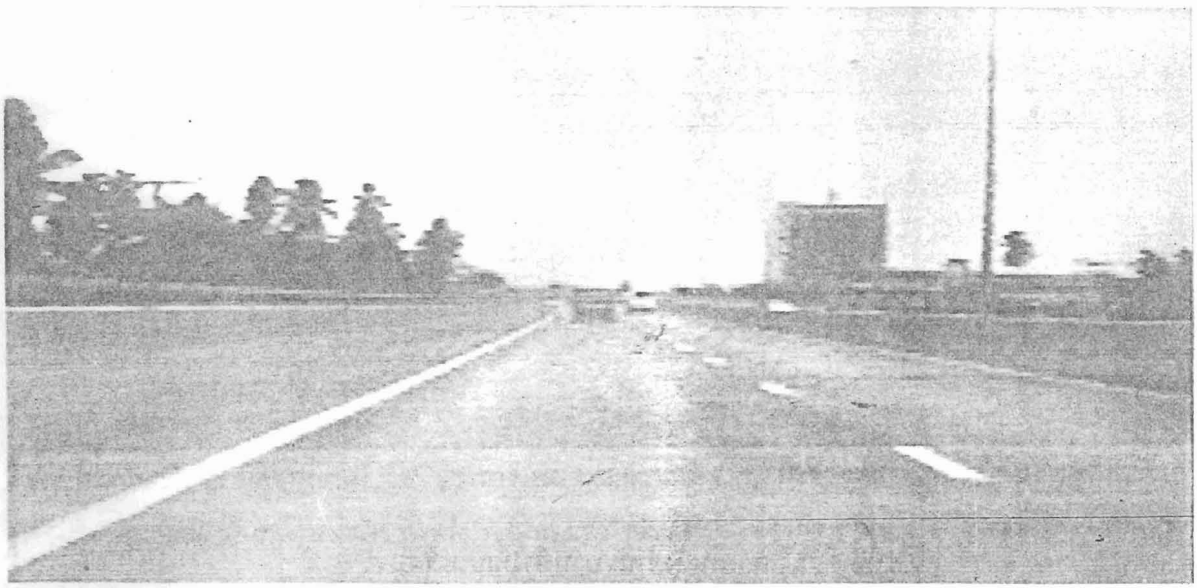
เพื่อเป็นการพิสูจน์ความน่าจะเป็นไปได้ในการใช้งานของวิธีการและแนวความคิดที่เสนอในบทความนี้ ได้มีการทดลองกับภาพทางด่วนช่วงถนนเพชรบุรีถึงดาวคะนอง โดยมีเงื่อนไขดังแสดงในตาราง 1 ดังนี้

ตาราง 1 เงื่อนไขในการทดลอง

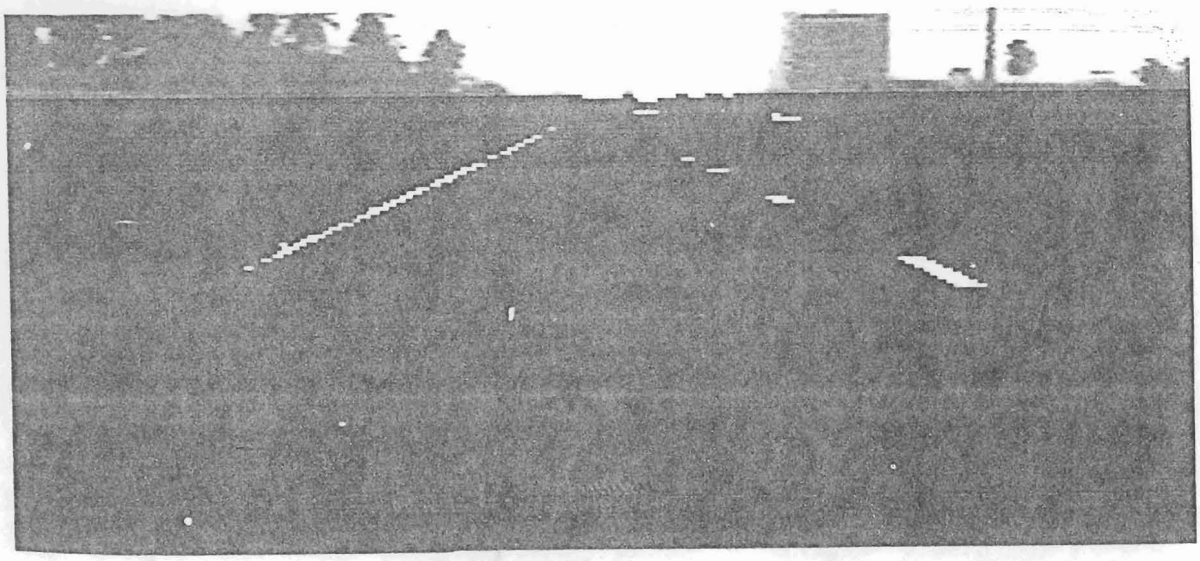
กล้อง	ความสูง	1.3 เมตร
	มุมก้ม	0 องศา
	ความยาวโฟกัส	100 เมตร
ภาพ	ขนาดภาพ 1 เฟรม	512 × 512 พิกเซล
	ระดับความสว่างต่อ1 พิกเซล	256
รถยนต์	ความเร็ว	60-120 กม.ต่อ ชม.

จากการบันทึกภาพบนทางด่วนในวันหยุดที่มีรถยนต์วิ่งน้อยและอากาศสดใส แล้วนำมาทดลองประมวลผลภาพอย่างต่อเนื่อง ปรากฏว่าระบบสำหรับทดลองที่สร้างขึ้นตามวิธีดังกล่าวสามารถทำการประมวลผลภาพของถนนและดึงเอาตำแหน่งของเส้นขาว และแปลงเป็นข้อมูล 3 มิติได้ รัศมีที่ได้จากการคำนวณถูกนำไปเทียบเพื่อหาความเร็วสูงสุดที่สามารถวิ่งได้บนทางโค้ง ดังตัวอย่างในรูปที่ 7a เป็นตัวอย่างภาพถนนซึ่งมีความโค้งไม่มากนัก เมื่อผ่านขบวนการดึงเฉพาะเส้นขาวออกมา ภาพที่ได้จะเปลี่ยนไปดังรูปที่ 7b หลังจากนั้นเมื่อผ่านการทำให้บาง ภาพจะเปลี่ยนไปดังรูป 7c และเมื่อสแกนหาตำแหน่งของเส้นขาวบนภาพ ตำแหน่งที่ได้ถูกแสดงบนจอภาพของคอมพิวเตอร์ (CRT)

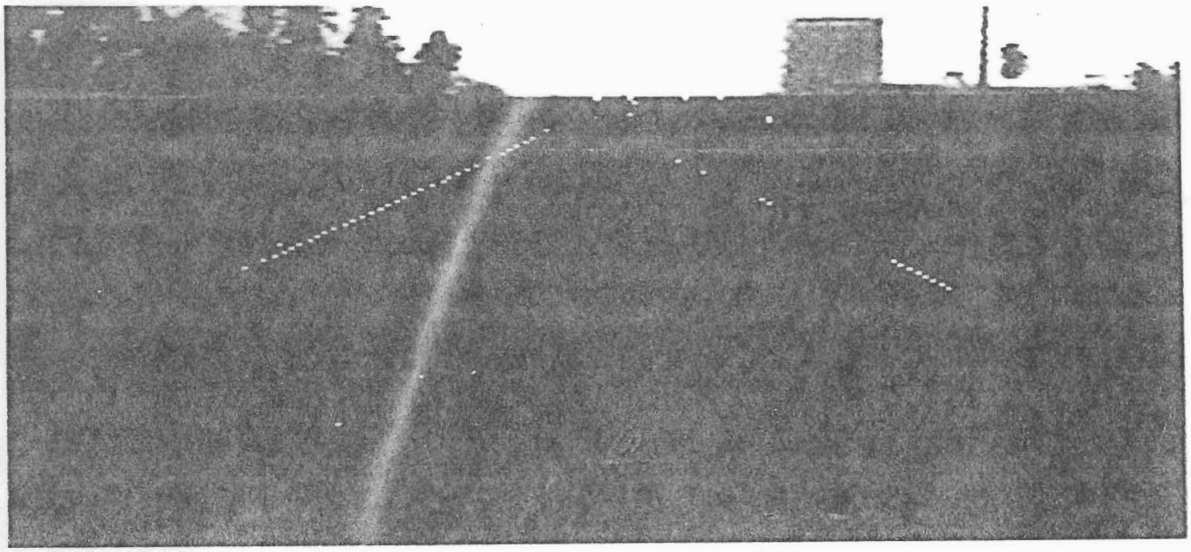
ดังรูป 7d ในท้ายที่สุด เมื่อผ่านขบวนการแปลงเป็นข้อมูลเชิง 3 มิติ และคำนวณหารัศมีของทางโค้ง รัศมีที่ได้ของตัวอย่างภาพนี้คือ 801.50721 เมตร และความเร็วสูงสุดที่วิ่งได้คือ 150 กม ต่อ ชม.



รูปที่ 7a ตัวอย่างของภาพถนน



รูปที่ 7b ภาพถนนหลังผ่านขบวนการแยกเส้นขาว



รูปที่ 7c ภาพถนนหลังผ่านขบวนทำให้เป็นเส้นบาง

รูปที่ 7d บนจอภาพของคอมพิวเตอร์ซึ่งแสดงตำแหน่งของเส้นขาวที่ได้

6 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ระบบสามารถประมวลผลภาพถนน เพื่อรู้จำว่าเป็นทางตรงหรือทางโค้ง และคำนวณหาความเร็วสูงสุดที่รถยนต์สามารถวิ่งได้บนทางโค้ง แต่ค่าความผิดพลาดยังมิได้มีการประเมิน เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลที่แน่นอนเกี่ยวกับรัศมีของทางโค้งบนทางด่วน ซึ่งต้องอาศัยความร่วมมือกับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ส่วนงานวิจัยที่สำควรจะกระทำในอนาคตมีดังนี้

6.1 ประเมินค่าความผิดพลาดของรัศมีของทางโค้งที่คำนวณได้กับรัศมีจริง

6.2 ทำการทดลองในสภาพอากาศที่ไม่ดีหรือสภาพแสงสว่างที่ไม่ดี เช่น เวลาฝนตก เวลาที่แสงแดดอ่อน เป็นต้น

7 สรุป

บทความนี้เสนอระบบช่วยขการขับรถยนต์ในทางโค้งโดยการประมวลผลภาพเส้นขาวบนถนน แล้วคำนวณหาตำแหน่งในเชิง 3 มิติของถนน รัศมีของทางโค้ง และความเร็วสูงสุดที่รถยนต์สามารถวิ่งได้บนทางโค้งนั้นๆ และจากผลการทดลองกับภาพทางด่วนบางส่วนของกรุงเทพฯแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

1 Thorpe C., Hebert M. H., Kanade T. and Shafer S. A., *Vision and Navigation for The Carnegie-Melon Nablab*, IEEE. Trans. Pattern Anal. and Machine Intell., PAMI-10.3, pp.362-373 (May 1988)

2 Tetsuya Kobayashi, Masataka Chiba, Nobuyuki Tanba, Shinji Ozawa, *On-line Estimation of Road parameters from Road Images*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. J 75 D-II, No.1 pp 67-75, Jan.1992 (Japanese)

3 Kazunori Nohsoh and Shinji Ozawa, *A Simultaneous Estimation of Vehicle Location and Camera Motion Deduced from Road configuration and Continuous Road Images*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. J 77 D-II, No.4 pp 764-773, Apr.1994 (Japanese)

4 Shinji Negishi, Masataka Chiba, Shinji Ozawa, *Automatic Tracking of Highway road Edge Based on Vehicle Dynamics*, The Institute of Electronics, Information and Communication Engineers, Vol. J 77 D-II, No.5 pp 931-939, May.1994 (Japanese)

5 Graefe, V. , Vision for Intelligent Road Vehicles, Proceedings, IEEE Symposium on Intelligent Vehicles, Tokyo, pp.135-140

6 ชัยชาญ มัคคุ้น และ โกสินทร์ จำนงไทย, *วิธีการรู้จำลายนิ้วมือโดยใช้ตำแหน่งจุดแยก*, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 16, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พย. 2536, หน้า 641-645

7 *Explaination and Usage of Road Structure Law*, Japanese Association of Road, Feb.1983

8 *A Policy on Geometric Design of Rural Highways*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1965