บทที่ 3

การสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดิน

3.1 คำนำ

การสำรวจด้วยภาพถ่ายแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้สองประเภทใหญ่ ๆ คือ การสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศและการสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดิน

ในการนำเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดินมาประยุกต์กับงานโบราณคดีนั้น ส่วนใหญ่ระยะระหว่างตำแหน่งถ่ายภาพและวัตถุจะไม่เกิน 300 เมตร จึงจัดอยู่ในประเภทของการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ (Close range photogrammetry) (Karara, 1979)

ระบบการทำงานสำหรับเทคนิคการสำรวจด้วยภาพถ่าย เพื่อให้ได้ข้อมูลซึ่งจะใช้ในการวิเคราะห์สัดส่วนพระพุทธรูปสมัยต่าง ๆ มีสองส่วนคือ ส่วนแรกเป็นระบบการบันทึกข้อมูล (Data acquisition system) และส่วนที่สองเป็นระบบการทอนข้อมูลและการประกอบแผนผัง (Data Reduction and Map Compilation System)

ระบบการบันทึกข้อมูลหมายถึง การเก็บข่าวสารข้อมูลดิบ ซึ่งในที่นี้คือการถ่ายภาพอย่างเหมาะสมเท่าที่จำเป็น ซึ่งประกอบด้วยการวางแผนและการเตรียมการ การเลือกใช้กล้องถ่ายภาพและชนิดของฟิล์ม การเลือกมาตราส่วนภาพถ่าย ตำแหน่งถ่ายภาพและการคลุมพื้นที่ การกำหนดตำแหน่งจุดควบคุมภาพถ่าย การถ่ายภาพและอัดล้างภาพถ่าย เป็นต้น

ระบบการทอนข้อมูลหมายถึง การนำภาพที่ได้มาแปลงข้อมูลจากสิ่งซึ่งปรากฏในภาพให้เป็นปริมาณต่าง ๆ ที่ต้องการ เช่น การวัดค่าพิกัด การคำนวณค่าพิกัด การคำนวณสัดส่วนระยะต่าง ๆ การเขียนภาพลายเส้น การเลือกรูปตัดเพื่อคำนวณพื้นที่และปริมาตร และอื่น ๆ

3.2 ระบบการบันทึกข้อมูล

3.2.1 ฟิล์ม

ฟิล์มที่ใช้ในงานสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้มี 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ ฟิล์มสีเนกาทีฟ (Colour Negative film) ฟิล์มสไลด์สี (Colour reversal film or direct

positive) และฟิล์มขาวดำ (panchromatic film)

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์จะรังวัดหาปริมาณต่าง ๆ เชิงเรขาคณิต ดังนั้นจึงเลือกใช้ฟิล์มขาวดำ ทั้งนี้เพราะมีราคาถูกกว่าฟิล์มประเภทอื่น และเมื่อใช้วัดค่าพิกัดจะให้ผลดี กล่าวคือ ความเพี้ยนของจุดภาพจะต่อนข้างน้อย เนื่องจากน้ำยาเคลือบฟิล์ม (Emulsion) มีเพียงชั้นเดียว

ฟิล์มที่ใช้ดังกล่าวมีขนาด (Format) 102 × 127 มม. ซึ่งเป็นฟิล์ม KODAK ROYAL Pan Film 4141 (Estar Thick Base)

3.2.2 กล้องถ่ายภาพ

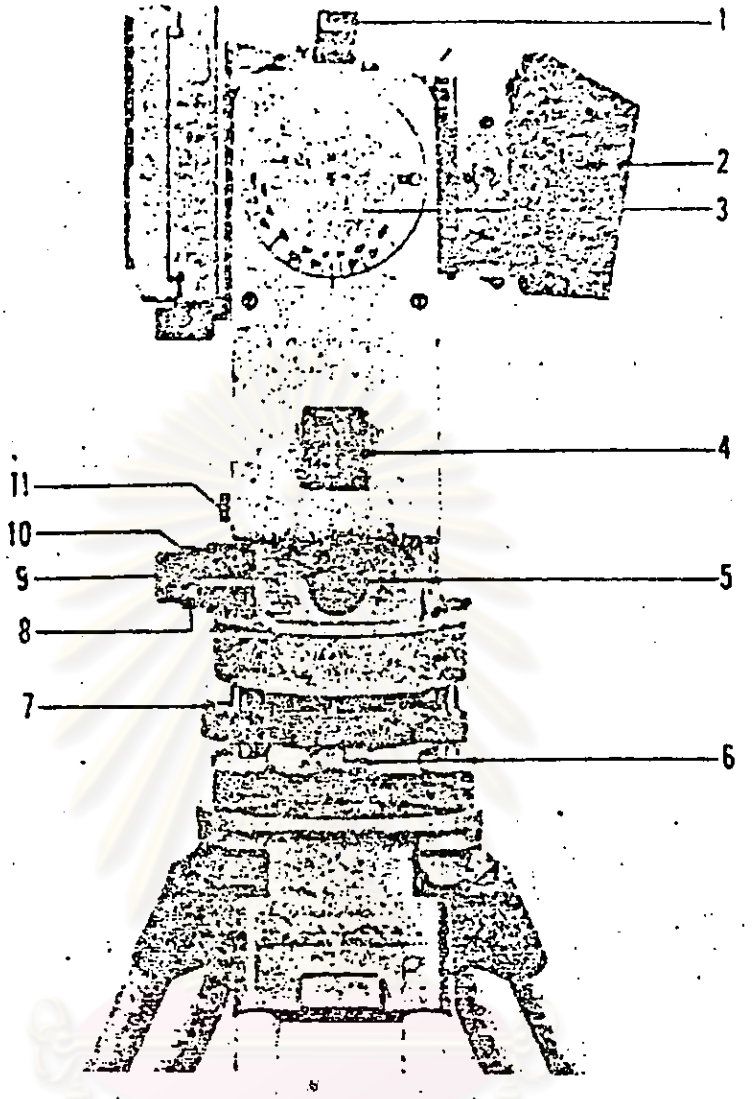
กล้องถ่ายภาพที่ใช้ในการสำรวจด้วยภาพถ่ายระยะใกล้ในปัจจุบันมีสองประเภท คือ กล้องถ่ายภาพแบบรังวัด (Metric Cameras) และกล้องถ่ายภาพทั่วไป (Non-metric Cameras)

กล้องถ่ายภาพแบบรังวัดหมายถึง กล้องถ่ายภาพซึ่งทราบค่าพารามิเตอร์ของการจัดภาพภายใน (Interior Orientation) ซึ่งได้แก่ ระยะมุขยสำคัญ (principal distance) ตำแหน่งของจุดดัชนี (Fiducial marks) ความเพี้ยนของเลนส์ (Lens distortion) เป็นต้น และกล้องถ่ายภาพประเภทนี้พารามิเตอร์ของการจัดภาพภายในมักจะมีเสถียรภาพ นอกจากนี้ยังแบ่งออกเป็นสองแบบคือ กล้องเดี่ยว (Single Camera) และกล้องคู่ (Stereometric Camera)

สำหรับกล้องถ่ายภาพทั่วไปนั้น เนื่องจากไม่ได้ออกแบบเพื่อใช้สำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายโดยเฉพาะ ดังนั้นจึงไม่ทราบค่าการจัดภาพภายในทั้งหมดหรือบางส่วน ไม่มีเครื่องหมายดัชนี และมักจะไม่คงตัว กล้องถ่ายภาพแบบที่ใช้ถ่ายภาพกันทั่ว ๆ ไป ทั้งสมัครเล่นหรืออาชีพก็จัดอยู่ในประเภทนี้

รายละเอียดของกล้องถ่ายภาพทั้งสองประเภทนี้ ผู้สนใจจะศึกษาได้จาก Karara (1979) และ Atkinson (1980)

ในการถ่ายภาพพระพุทธรูปสำหรับงานวิจัยนี้ ใช้กล้องถ่ายภาพแบบรังวัดประเภทหนึ่ง คือ WILD P31 UNIVERSAL TERRESTRIAL CAMERA มีความยาวโฟกัส 99.22 มิลลิเมตร ขนาดของ F-Stop อยู่ในย่าน f/8 ถึง f/22 มีวงแหวน (Intermediate rings) สำหรับ



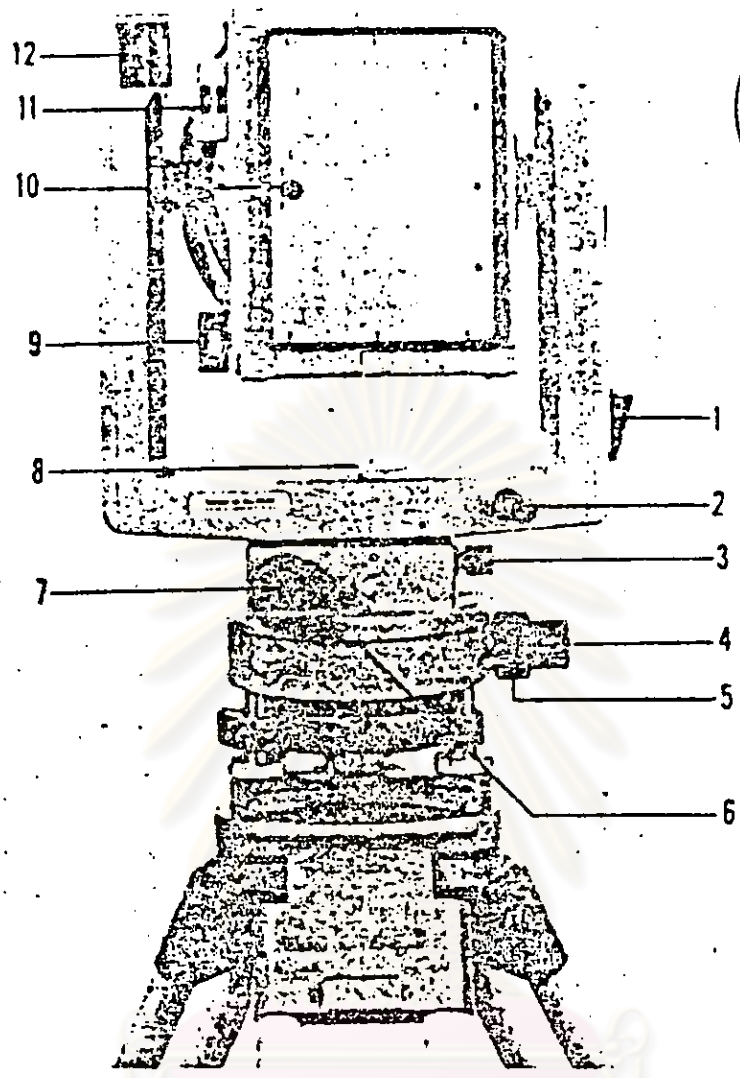
Camera f = 10 cm in camera support

1 Lock for camera rotation
2 Lens hood
3 Tilt indicator
4 Lock for camera tilt
5 Telescope objective
6 Swivel lock in tribrach
7 Circular spirit level
8 Focussing ring of telescope
9 Adjustable eyepiece
10 Ring to tilt line of sight of telescope
11 Azimuth lock for trunnion (fixed stage)

รูปที่ 3.1 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้องถ่ายภาพ

แบบ WILD P31 ด้านข้าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



Camera f = 10 cm (20 cm) rear view
(vertical format, right station)

1 Tilt lock
2 Azimuth lock
3 Telescope clamp
4 Azimuth clamp (lower part)
5 Fine drive, azimuth
6 Fine drive range indicator
7 Telescope
8 Horizontal-angle indicator
9 Pressure-plate knob
10 Flip-out light shade (closed)
11 Exposure-number dials
12 Mirror for spirit level

รูปที่ 3.2 แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของกล้องถ่ายภาพด้านหลัง

เปลี่ยนตามระยะวัตถุ ในที่นี้ใช้วงแหวนสำหรับระยะวัตถุไม่เกิน 1.4 เมตร ทำให้ระยะมุขย-สำคัญ (ระยะภาพ) เปลี่ยนจาก 99.22 มม. เป็น 106.53 มม. (WILD HEERBRUGG, 1980)

3.2.3 เครื่องวัดแสง (Light Meter)

จุดประสงค์ของการใช้เครื่องวัดแสงคือ ต้องการให้ได้ปริมาณของแสงที่พอเหมาะ เพื่อให้ได้ภาพมีความสว่างเหมาะที่จะนำไปใช้งานได้ดี

การใช้เครื่องวัดแสงเป็นจุด (spot meter) เป็นวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยการวัดค่าปริมาณแสงที่องค์พระ แล้วนำค่ามาเฉลี่ยเพื่อตั้งหน้ากล้อง (F-stop) และความเร็วชัต-เตอร์ (shutter speed) ให้เหมาะสมกับปริมาณแสงที่วัดได้ดังกล่าว

3.2.4 แสงไฟช่วยเพิ่มความสว่าง (Flood Light)

แสงไฟช่วยเพิ่มความสว่างที่ใช้มีขนาด 1,000 วัตต์ จำนวน 2 ดวง หลอดไฟดังกล่าวประกอบกับขาตั้ง จะวางในตำแหน่งด้านหลังกล้องถ่ายภาพ และให้แนวของแสงส่องตรงไปยังด้านหน้าของพระพุทธรูป

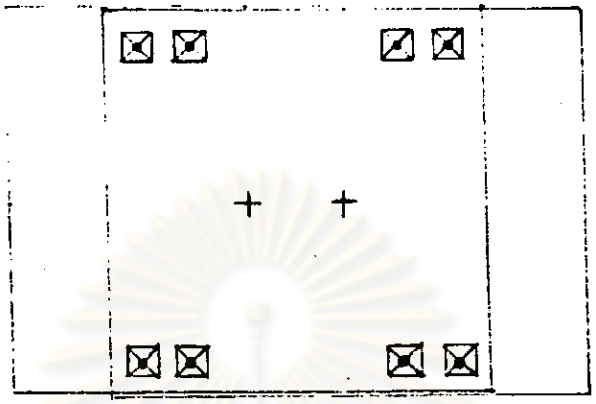
3.2.5 สายวัด

ในการหาค่าพิกัดโดยวิธีวัดข่ายด้านสามเหลี่ยม จำเป็นต้องวัดด้านต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นค่าสังเกต งานวิจัยนี้ใช้สายวัด 3 เมตร ซึ่งได้ทดลองวัดสอบกับบรรทัดเหล็กอินวาร์ของกรมแผนที่ทหาร โดยทำการวัด 100 ครั้ง ณ อุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียส ได้ค่าส่วนเบี่ยง-เบนมาตรฐาน 0.1 มม. เมื่อนำสายวัดนี้ไปใช้งานในบริเวณที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 30 องศาเซลเซียส ทำให้สายวัดนี้ยืดออกประมาณ 0.3 มม.

3.2.6 เป้า (Targets) ของจุดควบคุม

ลักษณะของเป้าดังกล่าวจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 5 × 5 มม.^{2} โดยที่ตรงกลางเป้าจะมีจุด ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.7 มม. ตำแหน่งของเป้าจะอยู่ตามมุมของรูปจำลองทั้งสี่มุม โดยจะติดไว้เป็นคู่ ๆ (Double points) (ดังรูปที่ 3.3)

การติดเป้าในลักษณะดังกล่าวก็เพื่อใช้เป็นจุดควบคุมภาพถ่ายในขั้นตอนการจัดภาพสัม-บูรณ์



รูปที่ 3.3 ภาพแสดงลักษณะและตำแหน่งของเป้าในรูปจำลอง

3.2.7 กรรมวิธีในการถ่ายภาพ

(1) ข้อพิจารณาในการวางแผนก่อนการถ่ายภาพ

ก. มาตราส่วนภาพถ่าย

มาตราส่วนภาพถ่ายคืออัตราส่วนระหว่างระยะภาพต่อระยะวัตถุ สำหรับงานสำรวจด้วยภาพถ่ายภาคพื้นดิน วัตถุจะมีลักษณะความลึกแตกต่างกันค่อนข้างมาก หากจะเปรียบเทียบกับการสำรวจด้วยภาพถ่ายทางอากาศแล้ว ลักษณะภูมิประเทศจะเป็นแบบ ภูมิ-ประเทศแบบภูเขา (Mountainous terrain) ซึ่งทำให้มาตราส่วนเปลี่ยนแปลงไปตามความสูงหรือความลึกของภูมิประเทศดังกล่าว

การกำหนดมาตราส่วนภาพถ่ายต้องคำนึงถึงขีดความสามารถของเครื่องมือในการย่อหรือขยายเพื่อเขียนแผ่นต้นร่าง มาตราส่วนแผ่นต้นร่างและช่วงเส้นชั้นความลึก

งานวิจัยนี้กำหนดให้ระยะวัตถุไม่เกิน 1.4 เมตร ทั้งโครงการ ดังนั้นมาตราส่วนภาพถ่ายจะมีค่าประมาณ 1:14

ข. ตำแหน่งถ่ายภาพ

ในการถ่ายภาพเพื่อจะให้ได้ภาพคู่ซ้อน (Stereo pair) นั้น ต้องกำหนดตำแหน่งถ่ายภาพให้เหมาะสม มิฉะนั้นแล้วเมื่อนำภาพไปทำการจัดภาพสัมพัทธ์ในเครื่องมือเขียนแผนที่จะทำให้เกิดรูปจำลองไม่ดีพอ หรืออาจจะเกินค่าขีดจำกัดของเครื่องมือทางแกน Z (projection distance) เนื่องมาจากลักษณะวัตถุเป็นแบบภูเขาดังกล่าวแล้ว

สิ่งซึ่งใช้พิจารณากำหนดตำแหน่งถ่ายภาพคือ อัตราส่วนระหว่างความยาวฐานต่อระยะวัตถุ (Base/Object distance ratio) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้เลือกอัตราส่วนดังกล่าวให้อยู่ระหว่าง 1:5 ถึง 1:3 เช่น ถ้าเลือกอัตราส่วนเท่ากับ 1:5 ความยาวฐานหรือระยะระหว่างตำแหน่งถ่ายภาพจะมีค่าประมาณ 0.3 เมตร เป็นต้น

นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงการคลุมพื้นที่ (Coverage) ด้วย เพราะต้องให้ได้ภาพซึ่งมีส่วนซ้อนพอเหมาะ เมื่อนำมาสร้างรูปจำลองแล้วจะคลุมวัตถุที่ต้องการวัดทั้งหมด รายละเอียดในการคำนวณร้อยละของส่วนซ้อนจะศึกษาได้จาก WOLF (1974)

ค. จุดควบคุมภาพถ่าย (Control points)

การหาจุดควบคุมภาพถ่ายพอจะแบ่งอย่างกว้าง ๆ ได้ 3 วิธีตาม Wolf (1974) และ Karara (1979) ได้แก่

1. ใช้ตำแหน่งถ่ายภาพเป็นจุดควบคุม ด้วยการวัดตำแหน่งถ่ายภาพรวมทั้งการวางตัวของกล้องถ่ายภาพ (Orientation) โดยโยงเข้ากับระบบพิกัดซึ่งใช้อ้างอิง

2. กำหนดตำแหน่งของจุดควบคุมที่วัตถุหรือรอบ ๆ ตามขอบรูปจำลองเหมือนกับการกำหนดจุดควบคุมภาพถ่ายทางอากาศ

3. ใช้วิธีผสมผสานวิธีที่หนึ่งและวิธีที่สองเข้าด้วยกัน

จุดควบคุมดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ในการจัดภาพสัมบูรณ์ก่อนการเขียนถ่ายทอดรายละเอียดจากเครื่องมือเขียนแผนที่

สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกวิธีที่สอง ซึ่งจุดควบคุมดังกล่าวจะเป็นแบบ Signalization กล่าวคือ จะทำเป้า (Targets) ไปติดไว้ ณ ตำแหน่งซึ่งคาดว่าอยู่ตามมุมของรูปจำลองทั้งสี่มุม ดังรูป 3.3

I16038976

การสำรวจรังวัดจุดควบคุมและการปรับแก้ข่ายด้านสามเหลี่ยมในงานวิจัยนี้ ได้ใช้เทคนิคลีสท์สแควร์ในการปรับแก้ โดยเลือกแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ซึ่งเรียกว่า แบบสมการ-ค่าสังเกต (Method of observation equations)

การคำนวณปรับแก้โดยเทคนิคลีสท์สแควร์ พอสรุปจาก วิชา (2524) ได้ดังนี้

แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์

$$La = F(Xa) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 3.1$$

สมการค่าสังเกต

$$V = AX + L \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 3.2$$

สมการปกติ (Normal equations)

$$NX + U = 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 3.3$$

หรือ $$X = -N^{-1}U \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 3.4$$

ค่า a posteriori variance of unit weight

$$\hat{\sigma}_o^2 = V'PV/(n-u) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 3.5$$

โดยที่

La : เวคเตอร์ค่าปรับแก้ (Adjusted Value) ของค่าสังเกตภายหลังการปรับแก้

Xa : เวคเตอร์ค่าปรับแก้ของพารามิเตอร์ภายหลังการปรับแก้

V : เวคเตอร์ของเศษคงเหลือ (residuals)

A : สัมประสิทธิ์แมทริกซ์ของพารามิเตอร์

X : ค่าตรวจแก้ (Correction) สำหรับปรับแก้ค่าประมาณของพารามิเตอร์

L : เวคเตอร์ของผลต่างระหว่าง เวคเตอร์ของค่าประมาณ (Lo) และเวคเตอร์ของค่าสังเกต (Lb) = Lo - Lb

N : สัมประสิทธิ์แมทริกซ์มีค่าเท่ากับ A'PA

U : สัมประสิทธิ์แมทริกซ์มีค่าเท่ากับ A'PL

P : แมทริกซ์น้ำหนักของค่าสังเกต

$\hat{\sigma}_o^2$: ค่าความแปรปรวนภายหลังจากการปรับแก้

n : จำนวนค่าสังเกต (Observations)

u : จำนวนพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า

(2) ขั้นตอนในการวางแผนและเตรียมการถ่ายภาพ

ก. การตั้งกล้องถ่ายภาพ

การถ่ายภาพในลักษณะปกติ (Normal case) ต้องตั้งระดับฟองกลมและระดับฟองยาวก่อน จากนั้นจึงปรับกล้องให้ระนาบของพื้นภาพและวัตถุขนานกันโดยสร้างแนวฐานให้ขนานกับวัตถุแล้วใช้กล้องเล็งแนว (Telescope) เล็งไปยังเป้าซึ่งตั้งได้ระดับในตำแหน่งถ่ายภาพที่สอง เมื่อกล้องได้แนวตั้งฉากระหว่างวัตถุกับตำแหน่งถ่ายภาพที่สองแล้ว จึงยึดให้แน่น

ข. การจัดแสงและตรวจสอบภาพที่ปรากฏ

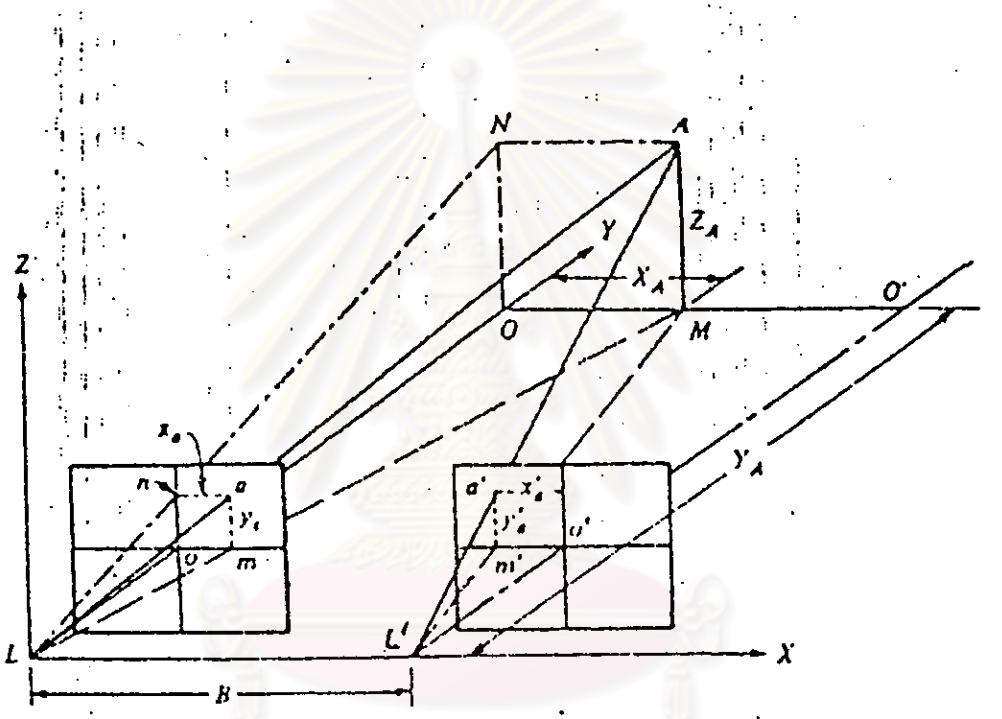
เมื่อตั้งระดับกล้องได้แล้ว จึงนำแสงไฟช่วยมาตั้งไว้ด้านหลังกล้อง โดยให้กล้องถ่ายภาพอยู่ระหว่างไฟทั้งสองดวง ทดสอบภาพที่ปรากฏด้วยกระจกฝ้า (Ground glass screen) ถ้ามีเงาทอดมาด้านข้างพระพุทธรูปมากเกินไป ควรเปลี่ยนตำแหน่งของไฟช่วย หรือถ้าหากภาพที่ปรากฏนั้นไม่ครอบคลุมวัตถุ ควรจะทำการตั้งกล้องใหม่

ค. การบรรจุฟิล์ม, ตั้งหน้ากล้อง, การถ่ายภาพและล้างภาพ

หลังจากที่ทดสอบภาพที่ปรากฏแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือการบรรจุฟิล์ม ซึ่งฟิล์มดังกล่าวเป็นแผ่น (sheet film) ซึ่งบรรจุในที่บรรจุฟิล์ม (film cassette) ตั้งหน้ากล้องและความเร็วชัตเตอร์ ตามเครื่องวัดแสง ขึ้นชัตเตอร์โดยสังเกตจุดสีเหลืองมาอยู่ในตำแหน่ง ready แล้วจึงกดชัตเตอร์ถ่ายภาพ ฟิล์มที่ทำปฏิกริยากับแสงแล้วจะนำไปล้างด้วยน้ำยา (developer) แบบ KODAK D76

3.2.8 การวัดระยะระหว่างจุดควบคุมภาพถ่าย

ในการหาค่าพิกัดโดยวิธีวัดข่ายด้านสามเหลี่ยมนั้น จำเป็นต้องทราบระยะของด้านทั้งสาม เพื่อคำนวณหาค่าพิกัดของจุดอื่นที่สัมพันธ์กัน ดังรูป 3.4 L และ L' คือตำแหน่งถ่ายภาพ ซึ่งทราบค่าพิกัดและความยาวฐาน B สมมุติว่าจุด M เป็นจุดควบคุมซึ่งต้องการหาค่า



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์สามมิติของภาพถ่ายภาคพื้นดิน (จากหนังสือวิศวกรรมก้าวหน้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีที่ 5 ฉบับที่ 1, กุมภาพันธ์ 2527)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิกัด ดังนั้นระยะที่ต้องวัดคือ LM และ L'M สำหรับจุดควบคุมอื่น ๆ ก็ทำเช่นเดียวกัน

เพื่อเป็นการตรวจสอบและป้องกันความผิดพลาด นอกจากระยะดังกล่าวแล้ว ยังต้องวัดระยะระหว่างจุดควบคุมด้วย กล่าวคือ ถ้าจุด O, M, A, N เป็นจุดควบคุม ระยะที่ต้องวัดเพิ่มคือ OM, NA เป็นต้น ค่าวัดเพิ่ม (Redundancies) นี้ นอกจากใช้ในการตรวจสอบค่าผิดแล้ว ยังใช้ในการปรับแก้โดยเทคนิคลีสท์สแควร์ด้วย ถ้าค่าดังกล่าวมีมากในทางทฤษฎีจะทำให้ผลจากการปรับแก้มีความเชื่อถือสูงขึ้น

สำหรับความสูงของจุดควบคุมกระทำโดยวัดจากพื้นห้องไปยังจุดควบคุมจนครบทุกจุด

3.2.9 การจดบันทึกรายละเอียดต่าง ๆ

รายละเอียดที่ต้องบันทึกภายหลังการถ่ายภาพคือ ค่าความยาวด้านต่าง ๆ ของข่ายด้านสามเหลี่ยม แผนผังคร่าว ๆ ของตำแหน่งถ่ายภาพ วัตถุ การเลือกใช้ค่าหน้ากล้อง ความเร็วชัตเตอร์ วันเวลาที่ถ่ายภาพ เวลาเริ่มถ่ายภาพ เวลาซึ่งถ่ายภาพเสร็จ ชนิดของฟิล์ม หมายเลขกล้อง ข้อสังเกตต่าง ๆ ขณะถ่ายภาพ เป็นต้น ทั้งนี้เพื่อที่จะใช้ประโยชน์หรือตรวจสอบได้เมื่อเกิดปัญหาขึ้นภายหลัง

3.3 <u>ระบบการทอนข้อมูลและการประกอบแผนผัง</u>

ระบบการทอนข้อมูลและการประกอบแผนผังจะใช้เครื่องมือเขียนแผนที่จากภาพคู่สามมิติ (Stereoscopic Plotting Instruments) วัดค่าพิกัดรูปจำลอง และเขียนถ่ายทอดรายละเอียด ส่วนการเก็บข้อมูลค่าพิกัดเพื่อคำนวณพื้นที่รูปตัดของพระพุทธรูปใช้เครื่องมือ GEOS

เครื่องมือเขียนแผนที่ซึ่งใช้ในงานวิจัยนี้คือ WILD A7 ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถใช้ได้ทั้งภาพถ่ายทางอากาศและภาพถ่ายภาคพื้นดิน

อุปกรณ์ที่จะต่อกับเครื่องมือเขียนแผนที่คือโต๊ะเขียนแผนที่ (plotting table) ซึ่งตอนบนของโต๊ะดังกล่าวมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ เครื่องลงพิกัด (coordinatograph)

การต่อเครื่องมือเขียนแผนที่ไปยังโต๊ะเขียนแผนที่จะใช้เฟืองทด (Gears) เพื่อย่อหรือขยายมาตราส่วนรูปจำลองกับมาตราส่วนของตัวอย่างพระพุทธรูปที่ต้องการเขียนเป็นภาพลายเส้นหรือภาพเส้นขั้นให้ได้ตามต้องการ

สำหรับเครื่องลงพิกัดนอกจากใช้เขียนภาพลายเส้นดังกล่าวแล้ว ยังใช้เป็นเครื่องลงค่าพิกัดตำแหน่งของจุดควบคุมหรือใช้ดีเส้นกริดของแผ่นต้นร่างด้วย

สำหรับขั้นตอนต่าง ๆ ในระบบการทอนข้อมูลมีดังนี้

3.3.1 การเตรียมเครื่องมือเขียนแผนที่และอุปกรณ์ประกอบ

ในขั้นแรกที่ปฏิบัติคือ ตั้งค่าควงหมุน (Elements) ต่าง ๆ ให้อยู่ในตำแหน่งศูนย์ (Set Zero Position) ตั้งค่าระยะมุขยสำคัญ (Principal distance) ของเครื่องมือเขียนแผนที่ให้เท่ากับระยะมุขยสำคัญหรือระยะภาพที่ได้จากข้อ 3.2.2 คือมีค่า 106.53 มม. แล้วใส่ฟิล์ม ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เนกาทีฟลงบนแผ่นกระจกรองรับฟิล์ม (plate carrier)

หลังจากนั้นก็เป็นการตั้งระยะฐานของเครื่องมือ (Instrument base) โดยประมาณเพื่อให้ได้มาตราส่วนรูปจำลองสามมิติโดยประมาณ และจากอัตราขยายระหว่าง ภาพถ่ายรูปจำลอง และแผนผัง จะทำให้ทราบเพื่องทดที่ต่อไปยังโต๊ะเขียนแผนที่

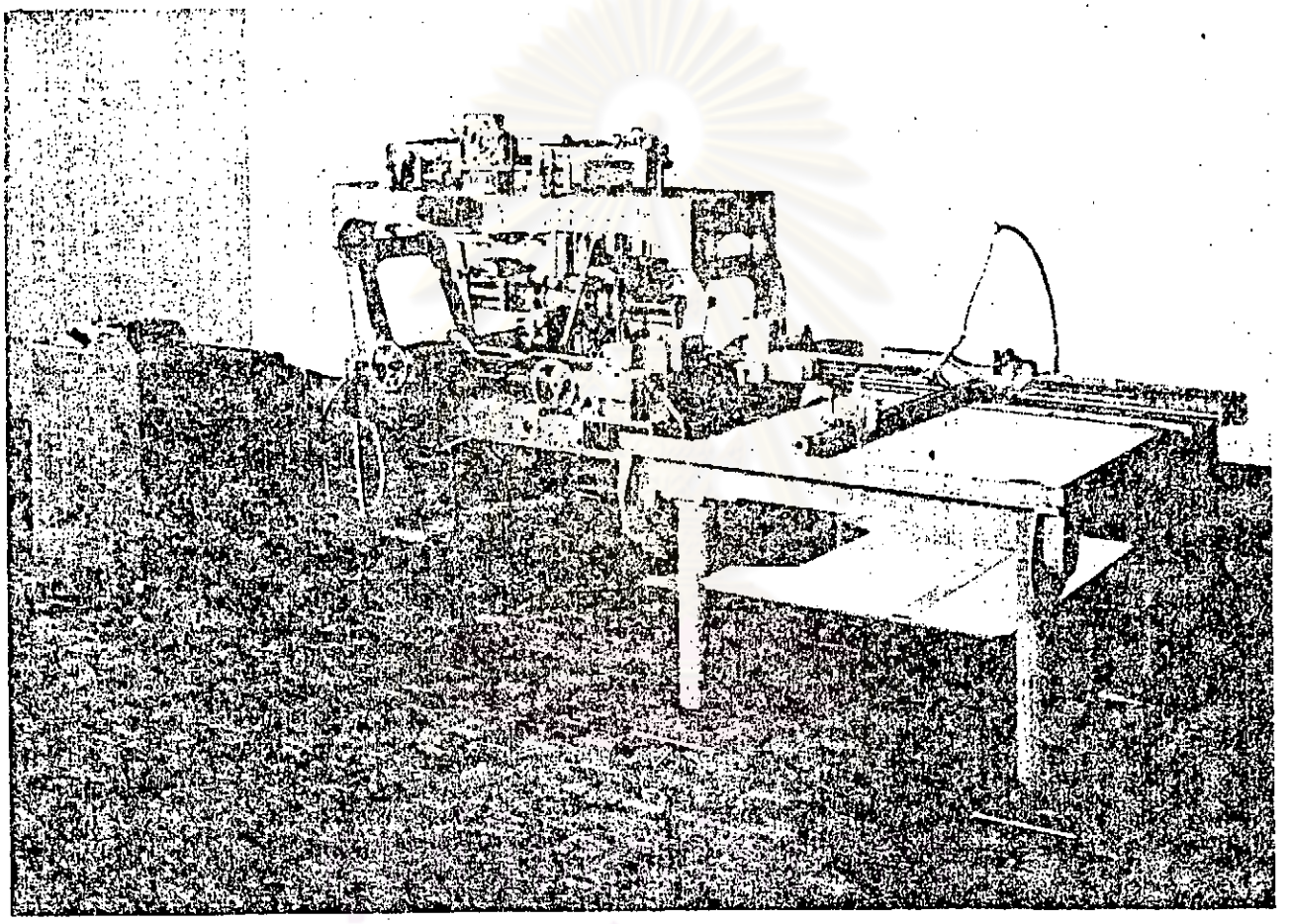
ในการเลือกมาตราส่วนเพื่อเขียนตัวอย่างพระพุทธรูปบนแผ่นต้นร่างนี้ ได้พิจารณาขนาดตัวอย่างของพระพุทธรูปที่จะเขียนเพื่อให้ได้ภาพแผนผังที่เหมาะสมกับการนำมาใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกมาตราส่วน 1:5 สำหรับพระพุทธรูปแบบทวารวดี ศรีวิชัย สุโขทัย อยุธยา และรัตนโกสินทร์ และมาตราส่วน 3:5 สำหรับพระพุทธรูปแบบลพบุรี และเชียงแสน

3.3.2 การจัดภาพสัมพัทธ์

จุดประสงค์การจัดภาพสัมพัทธ์คือ การใช้เครื่องมือเขียนแผนที่สร้างรูปจำลองสามมิติ โดยจัดให้คู่ภาพสามมิติมีสภาวะในลักษณะสัมพันธ์กัน เหมือนกับขณะถ่ายภาพ

เงื่อนไขซึ่งทำให้การจัดภาพเป็นไปตามสภาวะดังกล่าวคือ แต่ละจุดในรูปจำลองสามมิติและจุดฉายแสง (projection centers) ทั้งสองอยู่บนระนาบเดียวกัน และมีลักษณะเหมือนกับระนาบที่เกิดจากจุดในภูมิประเทศที่สมนัยกับจุดนั้นและตำแหน่งถ่ายภาพทั้งสอง (Wolf, 1974)

ในการสร้างรูปจำลองสามมิติ ถ้าทำให้คู่ของลำแสง (a pair of rays) ตัดกัน ณ จุดมาตรฐาน (Standard points) อย่างน้อยห้าคู่ จะทำให้ลำแสงคู่อื่น ๆ ทั้งรูปจำลอง-



WILD A7 Autograph with large drawing table and Coordinate Printer

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างของเครื่องมือเขียนแผนที่แบบ WILD A7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สามมิติติดกันด้วย ซึ่งหมายถึงการไม่มีระยะเหลื่อมทาง y (y-Parallax) ในรูปจำลองดังกล่าว การขจัดระยะเหลื่อมทาง y สำหรับการจัดภาพสัมพัทธ์ตามวิธี ASP (1966) ทำดังนี้

(1) ตั้งคันลำแสง (space rod) ด้านซ้ายให้อยู่ในแนวดิ่งที่จุด L และขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ by'

(2) ที่จุด B ด้านซ้ายของรูปจำลองสามมิติ (รูปที่ 3.6) ขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ κ' แล้วอ่านค่า κ' สมมุติให้เท่ากับ κ'_1

(3) ที่จุด A ด้านขวาของรูปจำลองสามมิติ ขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ κ' แล้วอ่านค่า κ' สมมุติให้เท่ากับ κ'_2 ตั้งค่า $\kappa' = (\kappa'_1 + \kappa'_2)/2$

(4) ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 3 จนกระทั่งจุดเหล่านี้ไม่มีระยะเหลื่อมทาง y

(5) ที่จุด C ตอนล่างของรูปจำลองสามมิติ ขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ bz'

(6) ที่จุด F ตอนบนของรูปจำลองสามมิติ ขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ ω'

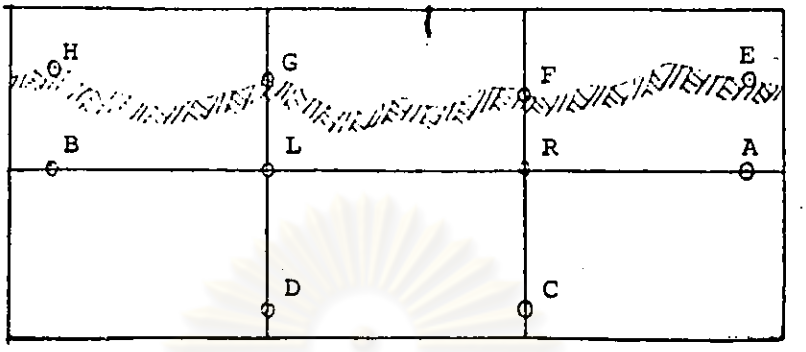
(7) ทำซ้ำจากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 6 จนกระทั่งจุดเหล่านี้ไม่มีระยะเหลื่อมทาง y

(8) ตรวจสอบระยะเหลื่อมทาง y ที่เกิดจากความคลาดเคลื่อนของ bz' บริเวณตอนล่างของรูปจำลองสามมิติ

(9) ที่จุด E ตอนบนของรูปจำลองสามมิติ ขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ ϕ' แล้วอ่านค่า ϕ' สมมุติให้เท่ากับ ϕ'_1

(10) ที่จุด H ตอนบนของรูปจำลองสามมิติ ขจัดระยะเหลื่อมทาง y โดยใช้ ϕ' แล้วอ่านค่า ϕ' สมมุติให้เท่ากับ ϕ'_2 ตั้งค่า $\phi' = (\phi'_1 + \phi'_2)/2$

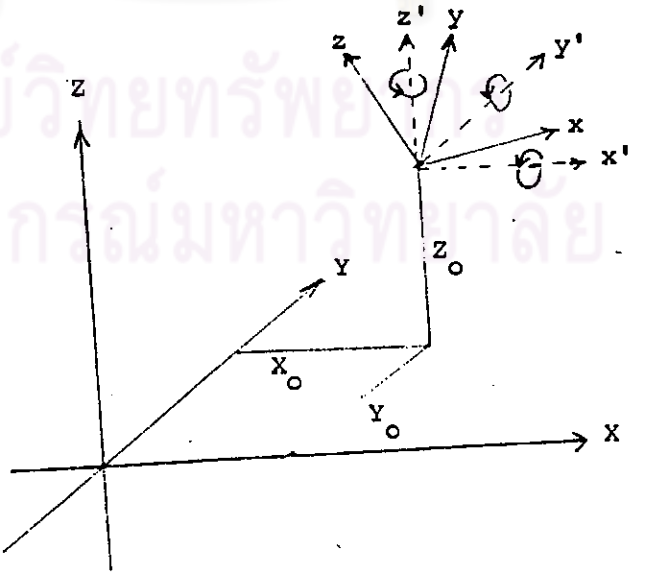
(11) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 10 จนกระทั่งไม่มีระยะเหลื่อมทาง y ในรูปจำลองสามมิติ



รูปที่ 3.6 รูปจำลองสามมิติของภูมิประเทศ

3.3.3 การวัดจุดควบคุมและจุดซึ่งนำไปใช้คำนวณค่าพิกัดและปริมาณอื่น ๆ

การวัดจุดควบคุมซึ่งปรากฏในรูปจำลอง (ดังรูป 3.8) จะเป็นจุดซึ่งต้องใช้ความระมัดระวังในการวัดเป็นอย่างมาก รวมทั้งการกำหนดชื่อด้วย ทั้งนี้เพราะค่าพิกัดของจุดควบคุมที่วัดได้ในรูปจำลอง (Model coordinates) จะถูกนำไปสร้างสมการค่าสังเกต (Observation equations) เพื่อการปรับแก้ค่าพิกัดรังวัดของรูปจำลองให้เป็นค่าพิกัดภูมิประเทศ และหาตัวไม่ทราบค่า (Unknown Parameters) สำหรับการแปลงค่าพิกัดจุดอื่น ๆ ด้วย



รูปที่ 3.7 แสดงระบบพิกัดของรูปจำลองและระบบพิกัดภูมิประเทศ

สมการในการแปลงค่าพิกัดสามมิติแบบคงรูป (Three dimensional conformal transformation) เขียนในรูปแมทริกซ์จะได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_i = \lambda . R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_i + \begin{bmatrix} X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad \ldots\ldots 3.6$$

โดยที่

$\begin{bmatrix} X & Y & Z \end{bmatrix}'_i$: ค่าพิกัดในภูมิประเทศของจุดที่ i (i = 1,.....n)

λ : ค่าตัวประกอบมาตราส่วน (Scale factor)

R : แมทริกซ์ของการหมุน (Rotation matrix)

$\begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}'_i$: ค่าพิกัดของรูปจำลองสามมิติ

$\begin{bmatrix} X_o & Y_o & Z_o \end{bmatrix}'$: ค่าที่เลื่อนไปจากจุดศูนย์กำเนิดของพิกัดภูมิประเทศ (Shifts)

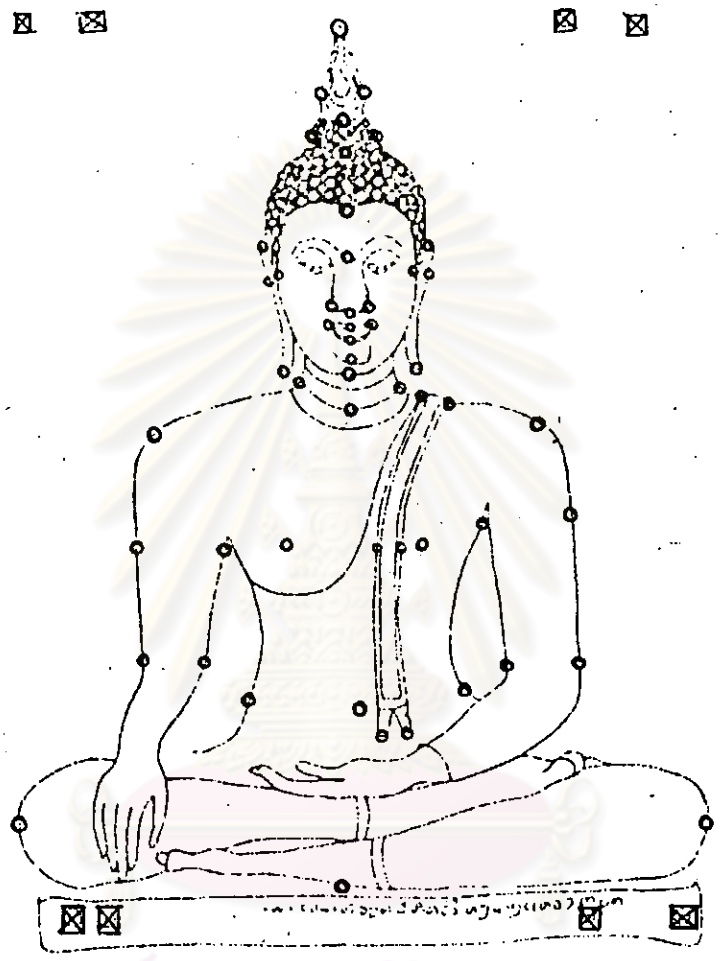
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากสมการ 3.6 เมื่อผ่านการแปลงค่าในขั้นต้น (preliminary transformation) รวมทั้งประมาณค่ามาตราส่วนใกล้เคียงกับ 1 และค่ามุมหมุนมีค่าน้อยมาก สามารถเขียนสมการค่าสังเกตในรูปของสมการที่ถูกทำให้เป็นเชิงเส้น ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & -z & 0 & 1 & 0 & 0 \\ y & -x & 0 & z & 0 & 1 & 0 \\ z & 0 & x & -y & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \\ \Delta K \\ \Delta\phi \\ \Delta\omega \\ X_o \\ Y_o \\ Z_o \end{bmatrix} \quad \ldots 3.7$$

สมการ 3.7 ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์เพื่อใช้แปลงค่าพิกัด รายละเอียดและการพิสูจน์สูตรจะศึกษาได้จาก WOLF (1974) และ Amer (1978)

สำหรับการวัดจุดสำคัญ (Key points) บนองค์พระพุทธรูป จะทำหลังจากการวัดตำแหน่งจุดควบคุมเสร็จ จุดดังกล่าวในรูปจำลองมีลักษณะเป็นจุดธรรมชาติ (Natural points)



รูปที่ 3.8 แสดงตำแหน่งจุดควบคุมและจุดบนองค์พระ

⊠ : จุดควบคุมภาพถ่าย

○ : จุดบนองค์พระซึ่งใช้คำนวณปริมาณต่าง ๆ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ซึ่งกำหนดขึ้นดังแสดงไว้ในรูป 3.8 อันได้แก่ จุดระหว่างความยาวและความกว้างพระรัศมี จุดระหว่างความยาวและความกว้างพระเทตุมาลา จุดระหว่างความยาวและความกว้างพระ-พักตร์ และจุดอื่น ๆ ซึ่งใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้สัดส่วนที่แสดงไว้ในภาคผนวก จ เป็นต้น

การวัดค่าพิกัดของจุดควบคุมและจุดที่จะใช้ในการคำนวณสัดส่วนพระพุทธรูป จะกระทำหลังจากการจัดภาพสัมพัทธ์เสร็จแล้ว และวัดอย่างน้อยสองเที่ยวค่าต่างของการวัดทั้ง 2 เที่ยว ไม่ควรเกิน 0.05 มม. แล้วจึงนำค่าเฉลี่ยของการวัดดังกล่าวไปใช้ในการแปลงค่าพิกัด

3.3.4 การแปลงค่าพิกัดรูปจำลองเป็นพิกัดวัตถุ

ในการศึกษาเปรียบเทียบสัดส่วนพระพุทธรูปนั้น จำเป็นต้องทราบระยะจริงก่อน ดังนั้นจึงต้องแปลงค่าพิกัดจากระบบค่าพิกัดของรูปจำลองให้เป็นค่าพิกัดภูมิประเทศ ซึ่งทำโดยการจัดภาพสัมบูรณ์โดยการคำนวณ (Numerical Absolute Orientation) ซึ่งก็คือการแปลงพิกัดสามมิติ จากนั้นจึงคำนวณสัดส่วนภายหลัง

รายละเอียดในการดำเนินกรรมวิธีข้อมูลและการวิเคราะห์ผลลัพธ์จะกล่าวในบทที่ 4

3.3.5 การจัดภาพสัมบูรณ์และการเขียนรูปตั้งเส้นชั้นตัวอย่างพระพุทธรูป

การเขียนถ่ายทอดรายละเอียดจากรูปจำลอง จำเป็นต้องเตรียมแผ่นต้นร่างตามมาตราส่วนที่ต้องการ รวมทั้งต้องลงจุดควบคุมสำหรับการจัดภาพสัมบูรณ์ด้วย การตีเส้นกริดและกำหนดจุดทำโดยใช้เครื่องลงพิกัด

3.3.6 การเลือกรูปตัดและการคำนวณพื้นที่และปริมาตรโดยใช้เครื่องมือ GEOS

เครื่องมือ GEOS (รูปที่ 3.9) เป็นเครื่องมือซึ่งใช้โปรแกรมสำเร็จรูปควบคุมการทำงาน เช่น เก็บข้อมูลเป็นตัวเลข การเขียนแผนที่มาตราส่วนใหญ่ การคำนวณพื้นที่ เป็นต้น

ส่วนประกอบสำคัญของเครื่องมือนี้คือ

- จอภาพรับ-ส่งข้อมูล (Terminal)
- หน่วยความจำ (Mass Storage Unit)
- เครื่องพิมพ์ (Printer)
- โต๊ะเขียนแผนที่อัตโนมัติ (Automatic Plotting Table)

สำหรับการเลือกรูปตัดเพื่อคำนวณพื้นที่ของพระพุทธรูปแต่ละแบบศิลปนั้น จะนำภาพแสดงเส้นชั้นมาเลือกรูปตัดเพื่อคำนวณปริมาตรพระเศียร โดยนับรูปตัดจากพระกรรณถึงผิวพระพักตร์เส้นบนสุด ไม่รวมพระนาสิก ค่าพิกัดของรูปตัดแต่ละรูปตามเส้นชั้นความลึกและถูกบันทึกโดยเครื่องบันทึกค่าพิกัด (Digitizer) เก็บข้อมูลเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ และเขียนภาพรูปตัด (ดังรูปที่ 3.10)

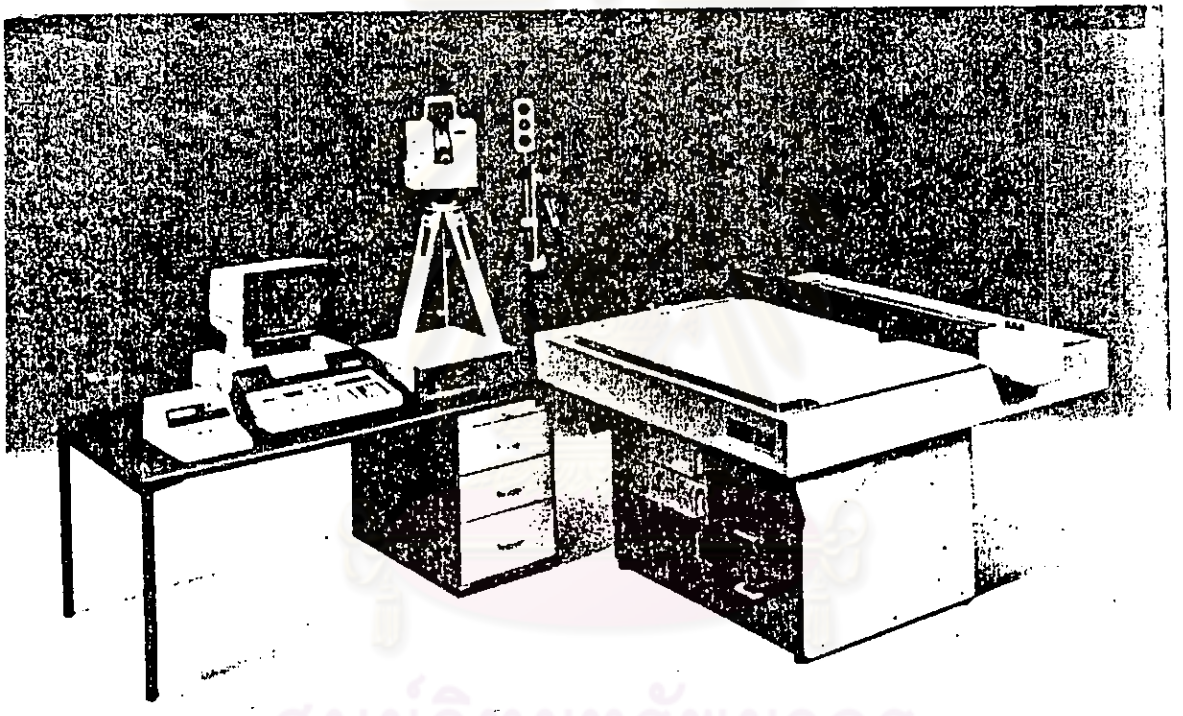
จากรูปตัดดังกล่าวจะทราบค่าพิกัดของแต่ละรูปตัดได้ และใช้โปรแกรมสำเร็จรูป FLAECH คำนวณพื้นที่แต่ละรูปตัดได้ การคำนวณปริมาตรจะใช้พื้นที่รูปตัดแต่ละรูปตัดมาเฉลี่ยกันก่อน แล้วคูณด้วยช่วงเส้นชั้นความลึกก็จะได้ปริมาตรทีละรูปตัดสะสมกันจนกระทั่งถึงรูปตัดสุดท้ายบริเวณผิวพระพักตร์ ในที่สุดจะได้ปริมาตรพระเศียร การคำนวณปริมาตรขององค์พระก็ทำเช่นเดียวกัน ผลการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ฉ

3.3.7 การคำนวณปริมาตรจากรูปจำลอง

การคำนวณปริมาตรตามวิธีการในข้อ 3.3.6 นั้น ต้องมีแผ่นต้นร่างสำหรับการบันทึกค่าพิกัดก่อน รวมทั้งผู้ปฏิบัติงานต้องมีความชำนาญในการลากเครื่องหมายกำหนดจุด (CURSER) ไปตามรายละเอียดที่ปรากฏ การทำงานด้วยวิธีนี้ใช้เวลานานเพราะต้องพิถีพิถันเอาใจใส่เป็นพิเศษ มิฉะนั้นจะเกิดความคลาดเคลื่อนในระหว่างการบันทึกข้อมูล

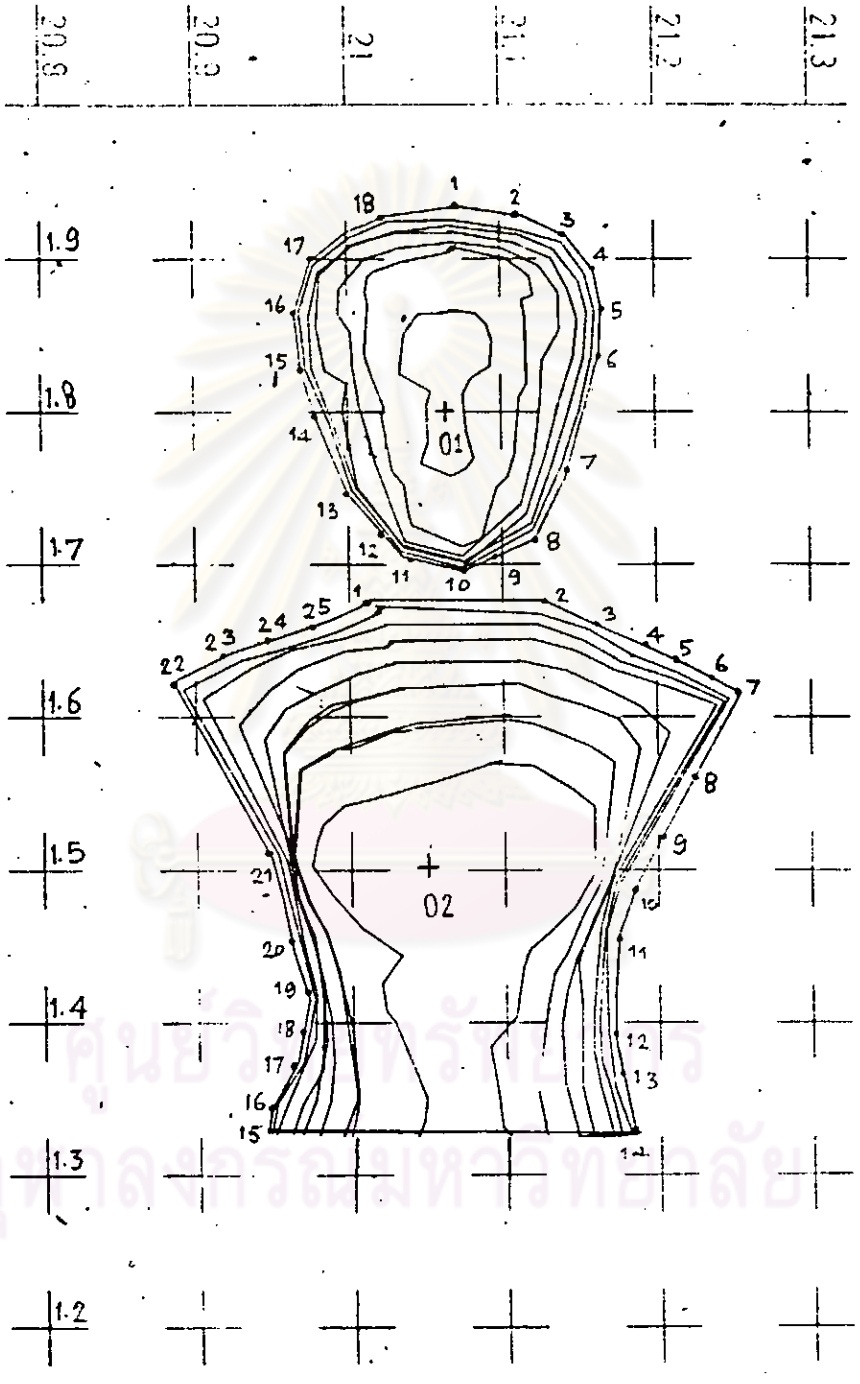
การคำนวณปริมาตรของพระพุทธรูปอีกวิธีหนึ่งคือ การคำนวณปริมาตรจากรูปจำลอง กล่าวคือ ขณะที่เขียนถ่ายทอดรายละเอียดมายังแผ่นต้นร่าง ก็ทำการบันทึกค่าพิกัดของรูปจำลองเก็บไว้ด้วย เมื่อเสร็จจากการเขียนต้นร่างแล้ว ก็นำจุดลอยวัดในรูปจำลองและคำนวณปริมาตรโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปซึ่งมีอยู่ในเครื่องมือเขียนแผนที่แบบวิเคราะห์ (Analytical Plotter) การคำนวณโดยวิธีนี้ทำได้รวดเร็วและถูกต้องดี การเก็บข้อมูล การตรวจและแก้ไขข้อมูล รวมทั้งการนำข้อมูลไปใช้ มีความยืดหยุ่นดีที่สุด

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีคำนวณปริมาตรตามข้อ 3.3.6 ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งในหลาย ๆ วิธีการของการสำรวจด้วยภาพถ่าย ที่สามารถจะแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปต่าง ๆ ได้ เช่น ข้อมูลในรูปกราฟิก ข้อมูลตัวเลข เป็นต้น



รูปที่ 3.9 ระบบของเครื่องมือ GEOS

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.10 ภาพแสดงรูปตัดของพระเศียรและองค์พระ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.11 ตัวอย่างภาพที่ใช้ในงานวิจัย เป็นคู่ภาพสามมิติ-
ของพระพุทธรูปแบบอยุธยาตอนต้น (อู่ทอง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย