

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

ภาพโทโมกราฟี หมายถึง “ภาพตัดขวาง” ของวัตถุที่ไม่สามารถมองเห็นภายในได้ มีลักษณะเป็นภาพระนาบสองมิติที่คำนวณจากข้อมูลความเข้มของรังสีที่ผ่านวัตถุในแต่ละระนาบโดยหมุนวัตถุตัวอย่างไปเป็นมุมทีละน้อย จนครบรอบหรืออย่างน้อย 180 องศา

##### 2.1.1 หลักการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี

เมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นวัตถุจะเกิดอันตรกิริยา (interaction) กับตัวกลาง ทำให้ปริมาณรังสีที่ผ่านตัวกลางมีความเข้มลดลง ซึ่งปริมาณรังสีที่ลดลงขึ้นอยู่กับความหนาและชนิดของวัตถุที่รังสีเอกซ์เคลื่อนที่ผ่าน ดังสมการ 2.1

$$I = I_0 e^{-\mu d} \quad (2.1)$$

เมื่อ

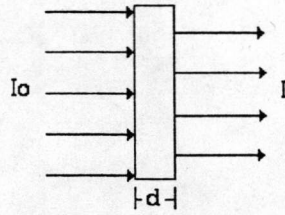
$I_0$  = ปริมาณของรังสีก่อนผ่านวัตถุ

$I$  = ปริมาณของรังสีหลังผ่านวัตถุ

$\mu$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสี (attenuation coefficient) , ซม.<sup>-1</sup>

$d$  = ความหนาของวัตถุ , ซม.





รูปที่ 2.1 แสดงลำรังสีเอกซ์ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง

$\mu$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีซึ่งมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกลาง ดังนั้นในการถ่ายภาพวัตถุใน 2 มิติที่ภายในมีตัวกลางแตกต่างกันจะกำหนดให้  $f(x,y)$  เป็นฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีในระนาบโคออร์ดิเนต  $(x,y)$  ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

$$I = I_0 e^{-\int f(x,y) d\eta} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $\eta$  = แนวทางเดินของรังสีที่เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (element along path)

เมื่อหมุนวัตถุตัวอย่างด้วยมุม  $\phi$  ก็จะทำให้ระนาบของวัตถุทำมุม  $\phi$  กับจุดกำเนิดเช่นกัน ดังรูปที่ 2.2 กำหนดให้ลำรังสีผ่านวัตถุแต่ละลำอธิบายด้วยโคออดิเนต  $(\xi, \phi)$  โดยที่  $\xi$  เป็นระยะจากจุดกำเนิด ดังนั้นการอินทิเกรตฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีตามเส้นทางของรังสีแต่ละลำในระนาบที่ ทำมุม  $\phi$  กับจุดกำเนิดสามารถแสดงดังสมการที่ 2.3 และเรียกฟังก์ชัน  $P(\xi, \phi)$  ว่าเรย์ซัม หรือ เรย์โปรเจกชัน (ray-projection) สำหรับเซตของเรย์ซัมที่ได้จากการเปลี่ยนค่า  $\xi$  ที่มุม  $\phi$  ค่าหนึ่งจะเรียกว่า โปรไฟล์ (profile) หรือ โปรเจกชัน (projection)

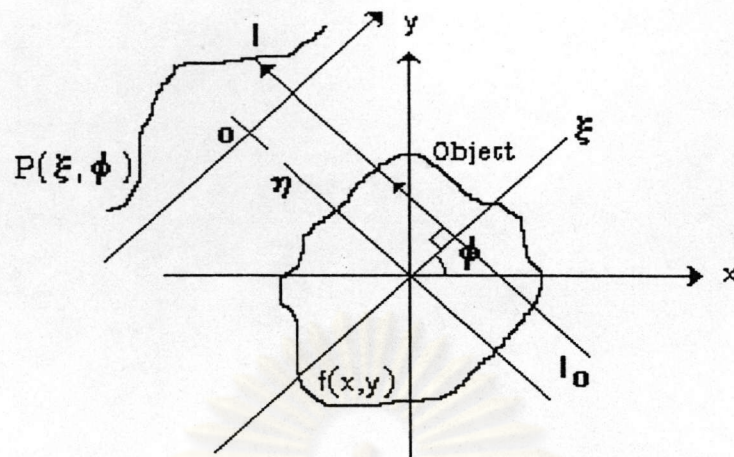
$$p(\xi, \phi) = -\ln(I/I_0) = \int f(x,y) d\eta \quad (2.3)$$

ความสัมพันธ์ของโคออร์ดิเนต  $(x,y)$  โคออร์ดิเนต  $(\xi, \phi)$  และ  $\eta$  คือ

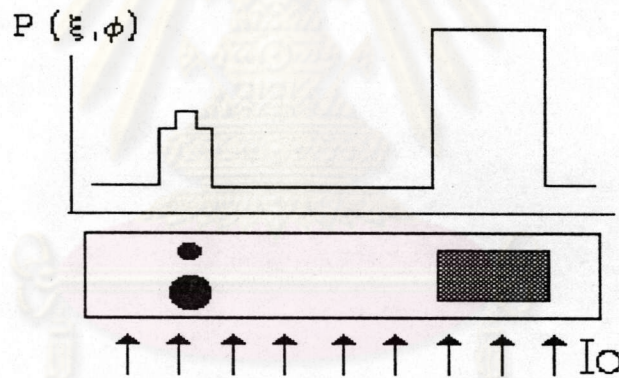
$$\xi = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (2.4)$$

$$\eta = -x \sin \phi + y \cos \phi \quad (2.5)$$



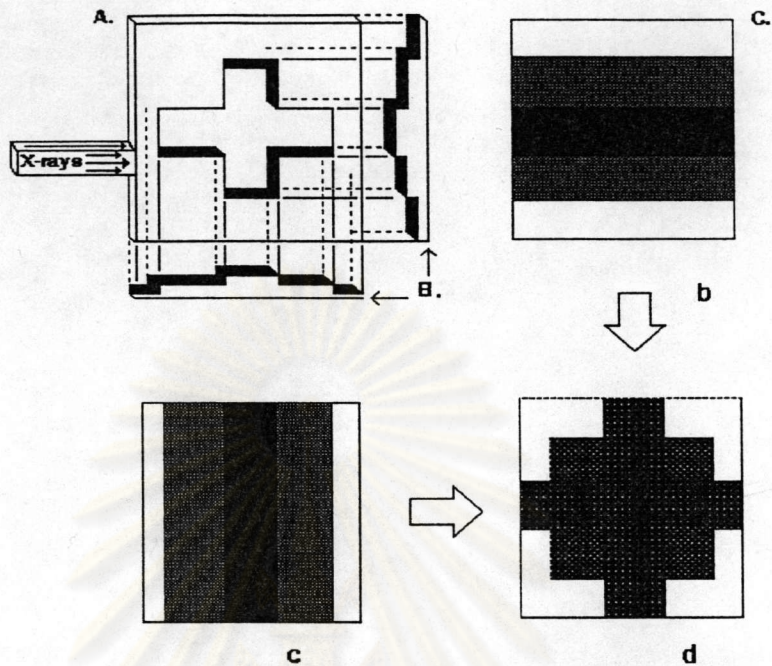


รูปที่ 2.2 แสดงการเคลื่อนที่ของรังสีผ่านวัตถุในระนาบที่มุม  $\phi$  กับจุดกำเนิด

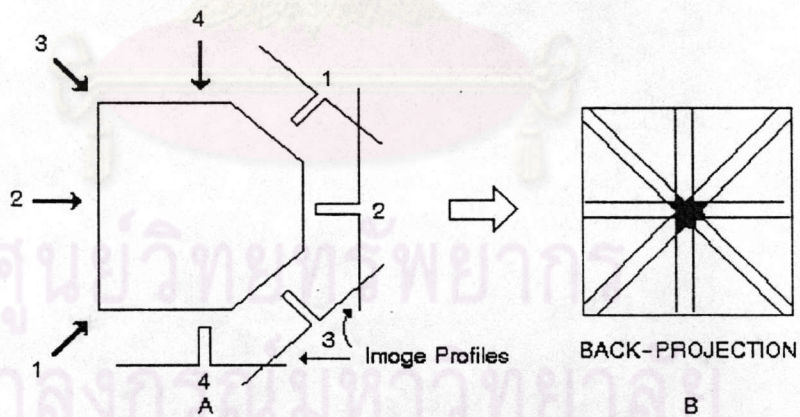


รูปที่ 2.3 โปรเจกชันของรังสี

ถ้านำเรย์ซัมที่ได้ทั้งหมดมาเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์ ก็จะเป็นข้อมูลสำหรับนำไปคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีได้ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นการคำนวณสร้างภาพจากข้อมูลโปรไฟล์ 2 มุมด้วยเทคนิค แมคโปรเจกชัน (Backprojection) จากรูปที่ 2.5 จะพบว่าถ้านำข้อมูลโปรไฟล์หลายๆ มุม จะทำให้ได้ภาพโทโมกราฟีที่มีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 2.4 แสดงวิธีการแบ็กโพรเจกชันจากข้อมูลโพรไฟล์ 2 มุม



รูปที่ 2.5 การ แสดงวิธีการแบ็กโพรเจกชันข้อมูลโพรไฟล์หลายๆ มุม

ดังนั้นจากสมการที่ 2.3 เมื่อประยุกต์ทฤษฎีการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) และกฎของคอนโวลูชัน (convolution) เพื่อหาฟังก์ชันของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีสำหรับเทคนิคแบ็กโพรเจกชันสามารถเขียนสมการใหม่ได้เป็น

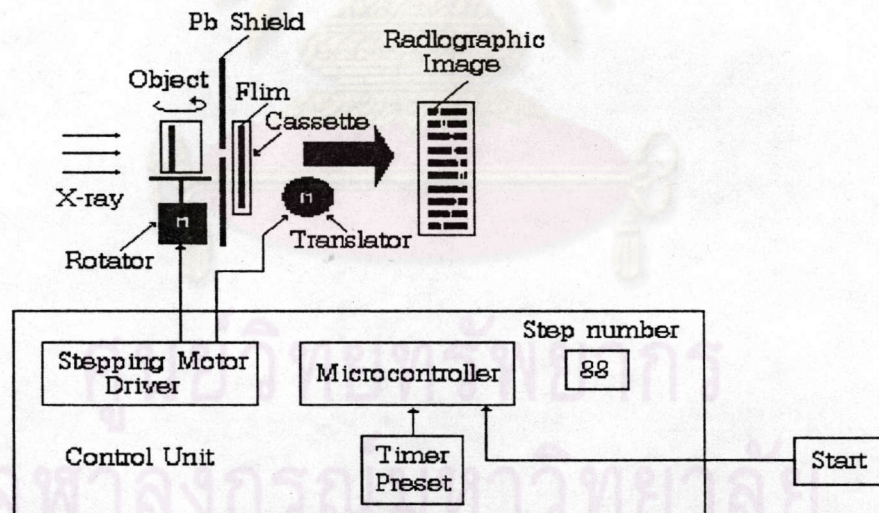


$$f(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi, \phi) \cdot h(\xi - \xi') d\xi' d\phi \quad (2.6)$$

ในที่นี้  $h(\xi)$  คือ ฟังก์ชันฟิลเตอร์ (filter function)

### 2.1.2 ระบบเก็บข้อมูลโพรไฟล์สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม<sup>[2]</sup>

เป็นระบบเก็บข้อมูลที่ใช้ลำรังสีกระจายเป็นรูปพัดและฟิล์มวัดรังสีเป็นตัวบันทึกความเข้มของรังสีที่ผ่านในวัตถุตัวอย่าง ดังแสดงรูปที่ 2.6 ข้อมูลที่ได้จากการให้ลำรังสีผ่านวัตถุในแต่ละมุมจะได้ 1 โปรไฟล์หรือ 1 โปรเจกชัน ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์สำหรับเก็บข้อมูลโพรไฟล์เพื่อนำมาคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีนั้น จะต้องถ่ายภาพวัตถุในแต่ละมุมจนได้ภาพอย่างน้อยครบ 180 องศา เพื่อให้ได้ข้อมูลเพียงพอสำหรับการคำนวณสร้างภาพ ระบบที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แต่ละฟิล์มสามารถถ่ายภาพได้ 26 ภาพ ดังนั้นถ้าเลือกการหมุนของวัตถุไปเป็นมุมที่ละ 3.6 องศา จึงต้องใช้ฟิล์ม 2 แผ่น ในการบันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.6 แสดงระบบเก็บข้อมูลโพรไฟล์สำหรับคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีด้วยเทคนิคฟิล์ม



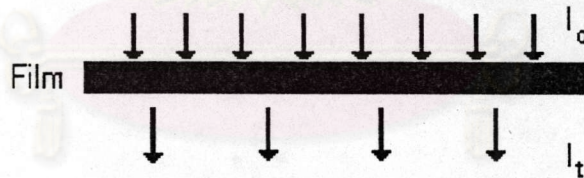
## 2.2 फिल्मรังสีเอกซ์ (X-ray film)

ฟิล์มรังสีเอกซ์ที่ใช้ถ่ายภาพด้วยรังสีโดยทั่วไปประกอบด้วย film base ซึ่งทำจากสาร cellulose triacetate หรือ polyester มีหน้าที่ทำให้ฟิล์มคงรูป บนแผ่นฟิล์มเคลือบด้วย emulsion ซึ่งประกอบด้วย grain และ gelatin โดยที่ grain จะเป็นผลึกของ silver halide ส่วนมากนิยมใช้ silver bromide (AgBr) ส่วน gelatin จะทำหน้าที่ช่วยให้ grain กระจายอย่างสม่ำเสมอบน film base และช่วยป้องกันไม่ให้ grain เกิดการรวมตัวเป็นกลุ่มก้อน

เมื่อฟิล์มได้รับรังสีเอกซ์ รังสีจะทำปฏิกิริยากับผลึกของ ซิลเวอร์โบรไมด์ จะทำให้เกิดเป็นโลหะซิลเวอร์ (Ag) ที่เรียกว่าภาพแฝง (latent image) ซึ่งมองด้วยตาเปล่าไม่เห็นต้องนำไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม (film processing) ส่วนของฟิล์มที่ได้รับรังสีมากจะเกิดความดำมาก ส่วนที่ได้รับรังสีน้อยจะมีความดำน้อย

### 2.2.1 ค่าความดำบนฟิล์ม (optical density)

ความดำ (density หรือ optical density : OD) ของฟิล์มเป็นค่าที่วัดได้โดยใช้แสงส่องผ่านฟิล์มแล้วหาอัตราส่วนของความเข้มของแสงก่อนผ่านฟิล์มต่อความเข้มแสงที่ทะลุผ่านฟิล์มในเทอมของค่าล็อก (log)



รูปที่ 2.7 แสดงหลักการวัดความดำของแผ่นฟิล์ม

$$OD = \log (I_0/I_t) \quad (2.7)$$

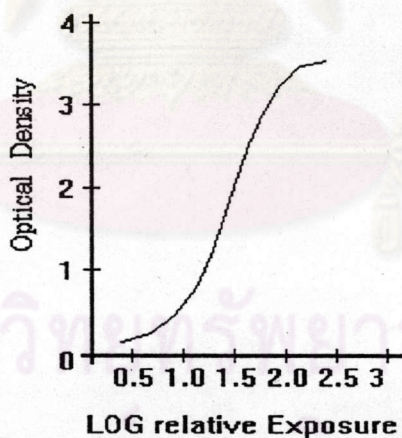
เมื่อ	$I_0$	เป็นความเข้มของแสงก่อนผ่านฟิล์ม
	$I_t$	เป็นความเข้มของแสงเมื่อผ่านฟิล์ม
	OD	เป็นค่าความดำของฟิล์ม

ตารางที่ 2.1 แสดงเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านของแสงและความดำของฟิล์ม

$I_0$	$I_t$	Light Transmission	Optical Density
		(%)	$\log I_0/I_t$
10	1	10	1.00
10	0.1	1	2.00
10	0.01	0.1	3.00

### 2.2.2 คุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มเอกซเรย์ (Characteristic of film)

ความสัมพันธ์ระหว่างเอกซโพเชอร์ (exposure) และความดำแสดงอยู่ในรูปของกราฟที่เรียกว่า กราฟคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์ม (characteristic curve) หรือ เอชแอนด์ดีเคิร์ฟ (H and D curve) แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.8 กราฟลักษณะเฉพาะของฟิล์มรังสีเอกซ์



### 2.2.3 ความเปรียบต่าง (contrast) และภาวะเชิงเส้น (linearity) ของฟิล์มรังสีเอกซ์

ความเปรียบต่างหมายถึงผลต่างของค่าความดำระหว่างจุด 2 จุดบนฟิล์ม ความเปรียบต่างของภาพถ่ายรังสี (radiographic contrast) นั้นขึ้นอยู่กับความแตกต่างในการลดทอนรังสีเอกซ์ที่ผ่านวัตถุซึ่งมีผลมาจากความหนา (thickness) ความหนาแน่น (density) และเลขอะตอมของวัตถุ พลังงานของรังสี (kvp) และรังสีกระเจิง (scatter radiation)

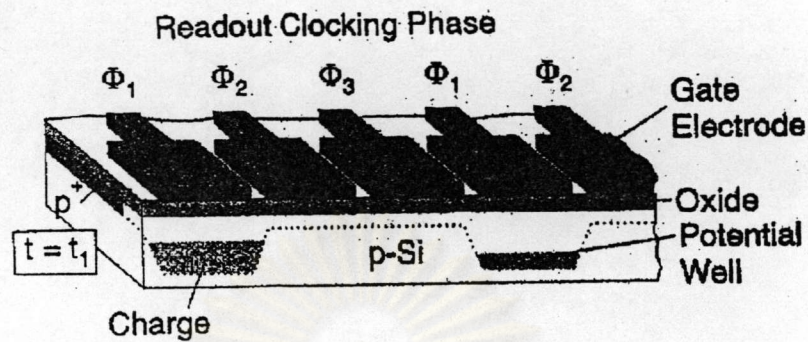
ภาวะเชิงเส้นของฟิล์มเป็นการตอบสนองของค่าความดำบนฟิล์มที่มีต่อรังสีเอกซ์ โดยค่าความดำที่วัดได้เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มของรังสีเอกซ์จริง ดังนั้นจากกราฟคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มจะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีเอกซ์กับความดำบนฟิล์มจะเป็นแบบเส้นตรงช่วงหนึ่งหรือมีภาวะเชิงเส้นช่วงหนึ่งนอกนั้นไม่เป็นเส้นตรง ในช่วงเส้นตรงนี้ภาพถ่ายรังสีของวัตถุบนฟิล์มสามารถเห็นความเปรียบต่างได้ดี ขณะที่ส่วนอื่นของเส้นกราฟจะมีความเปรียบต่างน้อยมาก ด้วยเหตุนี้ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ธรรมดาจึงมีข้อจำกัดในการใช้งาน

สำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยการเก็บข้อมูลภาพถ่ายบนฟิล์มนั้น ความเปรียบต่างและภาวะเชิงเส้นมีผลต่อคุณภาพของภาพโทโมกราฟี

### 2.3 อุปกรณ์ไวแสงชนิดแถบ (linear photosensitive device)

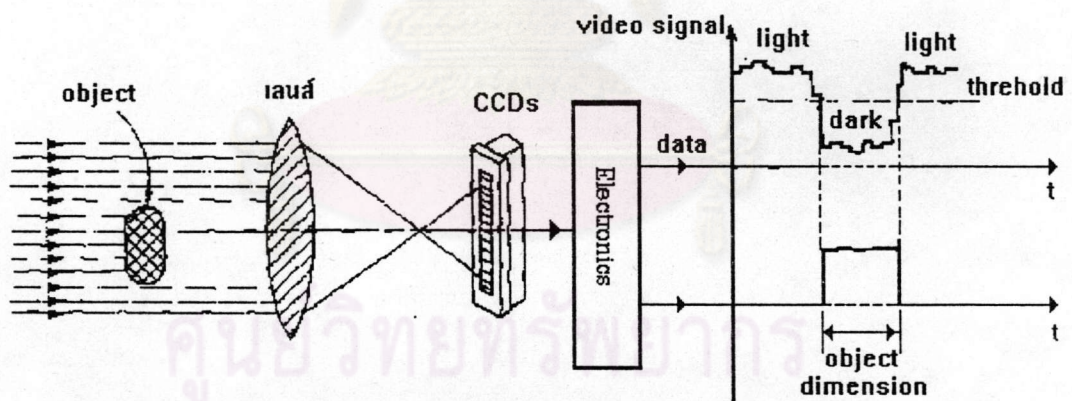
ในปัจจุบันอุปกรณ์ไวแสงชนิดแถบที่นิยมใช้กันอยู่ มีอยู่ 2 ชนิดคือ photodiode array และ CCDs (Charge Couple Devices) ซึ่งอุปกรณ์ทั้งสองจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือ มีเซลล์รับแสงขนาดเล็กๆ จำนวนมากเรียงต่อกันอยู่ในบริเวณส่วนที่รับแสง โดยเซลล์แต่ละเซลล์ทำหน้าที่เปลี่ยนแสงให้เป็นประจุไฟฟ้า ซึ่งมีปริมาณขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง และในเซลล์แต่ละตัวจะมีค่าความจุไฟฟ้าคงที่ค่าหนึ่งอยู่ภายใน ดังนั้นค่าประจุไฟฟ้าจะถูกอ่านค่าในรูปของความต่างศักย์ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มของแสงเช่นเดียวกัน โดยที่ลักษณะของเซลล์อุปกรณ์ไวแสงชนิดแถบที่เป็น photodiode array ก็คือ โฟโตไดโอดที่ต่อเรียงกัน ดังนั้นจึงต้องมีอุปกรณ์ self-scanning ในการอ่านค่าความต่างศักย์เซลล์แต่ละตัว ลักษณะของสัญญาณที่ได้เรียกว่า สัญญาณวิดีโอ (video Signals) สำหรับ CCDs เซลล์แต่ละตัวจะเป็นสารจำพวก metal-oxide semiconductor ( MOS ) โดยที่สัญญาณแต่ละตัวจะถูกอ่านออกมาโดยใช้ MOS Gate ร่วมกับ shift register ซึ่งอยู่ภายในตัว CCDs ลักษณะโครงสร้างภายในของ CCDs แสดงในรูปที่ 2.9





รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะภายในโครงสร้างของ CCDs

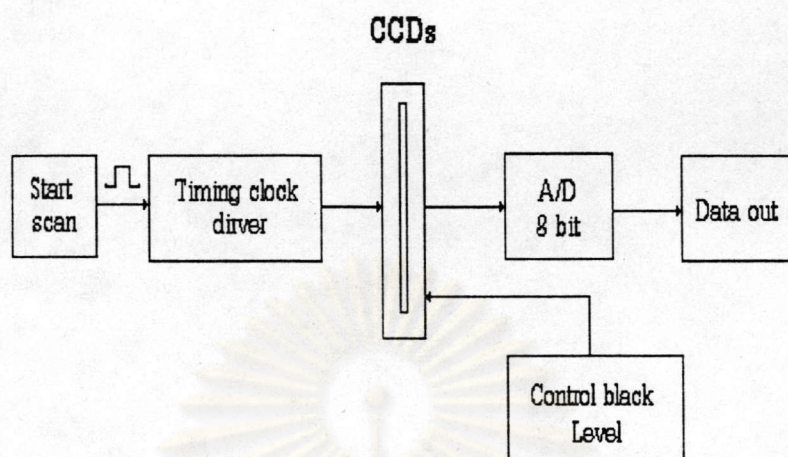
CCDs ได้ถูกนำมาใช้เป็นอุปกรณ์สำคัญของส่วนรับแสงในเครื่องมือประเภทกล้องวิดีโอ เครื่องถ่ายภาพเอกสาร และสแกนเนอร์ซึ่งในการประยุกต์ใช้นั้นจะต้องมีเลนส์หมุนสำหรับรวมแสงให้ภาพของวัตถุตกกระทบบน CCDs พอดีทำให้ CCDs รับแสงจากวัตถุที่มีขนาดใหญ่กว่าได้ การจัดส่วนรับแสงนี้แสดงในรูป 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงการทำงานของ CCDs ในอุปกรณ์สแกนภาพ

การประยุกต์ใช้ CCDs นั้นจะต้องมีการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วนได้แก่ ส่วนแรกคือ A/D ( Analog to Digital Converter ) เพื่อใช้ในการแปลงสัญญาณวิดีโอให้อยู่ในรูปของข้อมูลเชิงตัวเลข และส่วนที่สองคือเครื่องกำเนิดสัญญาณนาฬิกา (clock generator) ใช้สำหรับการอ่านสัญญาณวิดีโอ ดังแสดงในรูปที่ 2.11





รูปที่ 2.11 แสดงรายละเอียดระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ควบคุมการทำงานของ CCDs

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย