



# Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

Vortrag von Tatiana Kneip-Medina  
Seminar Computergraphik



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

- Adaptive Berechnung von Beleuchtungsverteilung mit unbekanntem Reflektionswerten in Schattenregionen
- Methode entwickelt von Imari Sato, Yoichi Sato und Katsushi Ikeuchi



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

- Methode berechnet die Beleuchtungsverteilung einer realen Szene aus der Leuchtdichtenverteilung innerhalb von Schatten eines Objekts der Szene.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

### Einführung

Helligkeit = Funktion aus Form, Reflektion und Beleuchtung

Drei Hauptuntersuchungsgebiete:

1. Form aus Helligkeit (mit bekannter Reflektion und Helligkeit)
  2. Reflektion aus Helligkeit (mit bek. Form und Beleuchtung)
  3. Beleuchtung aus Helligkeit (mit bek. Form und Reflektion)
3. Gebiet wurde bis heute kaum untersucht



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

Sato und Co. haben sich mit dem dritten Untersuchungsgebiet befasst und ihre Methode verbindet sogar die Beleuchtungsanalyse mit einer Berechnung der Reflektionseigenschaften einer Oberfläche innerhalb Schatten.

- Die Methode funktioniert auch für den Fall, dass die Reflektionseigenschaften einer Oberfläche unbekannt sind.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

Außerdem wird bei der Methode ein adaptives Sampling Framework benutzt für die effiziente Berechnung der Beleuchtungsverteilung

- Adaptiv wird die Anzahl der Samplingrichtungen erhöht, abhängig von der Berechnung der vorherigen Iteration.
- So wird unnötig dichtes Sampling der Beleuchtung vermieden und die ganze Beleuchtungsverteilung wird effizienter mit einer kleineren Anzahl der Sampling Richtungen der Beleuchtungsverteilung berechnet.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

- Die Methode braucht zur Berechnung der Beleuchtungsverteilung einer realen Szene lediglich ein einzelnes Farbbild der Szene mit Schatten, geworfen von einem Objekt der Szene.
- Sato und Co. deckten die Kamera Parameter und die Form des Schatten werfenden Objekts auf, indem sie ein Fotomodellierendes Werkzeug interaktiv benutzten.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

---

Der Rest des Vortrages wird folgendermaßen gegliedert:

1. Wir beschaffen eine Formel, welches die Beleuchtungsverteilung der Szene mit der Bildbeleuchtungsstärke des Schattenbildes in Beziehung setzt.
2. Grundschritte der vorgestellten Methode um gleichzeitiges Berechnen der Beleuchtungsverteilung der Szene und die Reflektionseigenschaften der Schattenoberfläche
3. Beleuchtungsleuchtdichtenverteilung mit gegebenen Reflektionsparameter der Schattenoberfläche und der Bildbeleuchtungsstärke eines Schattenbildes berechnen.
4. Reflektionsparameter der Schattenoberfläche berechnen mit einer gleichzeitigen Berechnung der Leuchtdichteverteilung der Szene.
5. adaptive Sampling framework für die effiziente Approximation der ganzen Beleuchtung.
6. Experimentsergebnisse der vorgestellten Methode angewendet auf reale Bilder



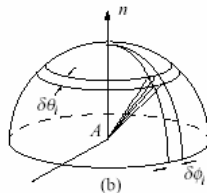
## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

1. Wir beschaffen eine Formel, welche die Beleuchtungsverteilung der Szene mit der Bildbeleuchtungsstärke des Schattenbildes in Beziehung setzt
  - > Formel wird später als Basis benutzt um die Beleuchtungsverteilung einer realen Szene und die Reflektionseigenschaften der Schatteneroberfläche zu berechnen.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- > Finden einer Beziehung zwischen der Beleuchtungsverteilung einer realen Szene und der Beleuchtungsstärke auf einem Oberflächenpunkt in dem Szenenbild
- > Um die Beleuchtung aus allen Richtungen zu berücksichtigen betrachten wir ein infinitesimales Patch der erweiterten Lichtquelle von einer Größe  $\delta\theta_i$  in Polarwinkel und  $\delta\Phi_i$  in azimuth. Von Mittelpunkt A aus gesehen, gegenwinkelt dieses Patch einen festen Winkel  $\delta\omega = \sin\theta_i \delta\theta_i \delta\Phi_i$



- > Wenn  $L_o(\theta_i, \Phi_i)$  die Beleuchtungsleuchtdichte pro Einheit fester Winkel, aus der Richtung  $(\theta_i, \Phi_i)$  kommend ist; dann ist die Leuchtdichte des Patches  $L_o(\theta_i, \Phi_i) \sin\theta_i \delta\theta_i \delta\Phi_i$ ,



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- und die totale Beleuchtung des Mittelpunktes A ist:

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i$$

- Dann Ausschließung des Ankommenden Lichtes vom Schattenwerfendes Objekt wird Bezeichnet als:

$$E = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i$$

- Wobei  $S(\theta_i, \Phi_i)$  Ausschließungskoeffizienten sind;  $S(\theta_i, \Phi_i)=0$  falls  $L_0(\theta_i, \Phi_i)$  verschlossen wird vom Schattenwerfenden Objekt; Ansonsten Ist  $S(\theta_i, \Phi_i)=1$



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

Von der Beleuchtungsstärke zu der Leuchtdichte der Szene

- Da etwas des einfallenden Lichts auf Punkt A auf die Bildebene reflektiert wird Punkt A zu einer sekundären Lichtquelle
- BRDF  $f(\theta_i, \Phi_i, \theta_e, \Phi_e)$  = Relation der Leuchtdichte einer Oberfläche aus Richtung  $(\theta_e, \Phi_e)$  und der Beleuchtungsstärke, also der Beleuchtung aus der Richtung  $(\theta_i, \Phi_i)$ .
- Wenn man das Produkt der BRDF und die Beleuchtungsleuchtdichte über die ganze Hemisphere integriert, wird die Szenenleuchtdichte  $R_s(\theta_e, \Phi_e)$  berechnet als:

$$R_s(\theta_e, \phi_e) = \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i$$



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

Von der Szenenleuchtdichte zu der Bildbeleuchtungsstärke

- Die Leuchtdichte der Szene hat einen Bezug zu der Beleuchtungsstärke auf der Bildebene.
- Da wir auf der Bildebene nicht die Beleuchtungsstärke sondern ein Pixelwert in einem Schattenbild sehen, ist es wichtig die Umwandlung von der Bildbeleuchtungsstärke in ein Pixelwert aus einem korrespondierenden Punkt in dem Bild zu beachten.
- Die Umwandlung schließt mehrere Faktoren mit ein, wie die D/A und A/D Umwandlungen in eine CCD Kamera oder einen Frame Grabber.
- Sato und Co. Markierten eine Linearisierung der CCD Kamera indem sie eine Macbeth color chart mit bekannter Reflektion benutzten, so dass die gespeicherten Pixelwerte auch proportional zu der Szenenleuchtdichte der Oberfläche wird.



- Aus der vorherigen Gleichung wird der Pixelwert  $P(\theta_e, \phi_e)$  des Schattenbildes ermittelt aus:

$$P(\theta_e, \phi_e) = k \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L_0(\theta_i, \phi_i) S(\theta_i, \phi_i) \cos\theta_i \sin\theta_i d\theta_i d\phi_i$$

- $k$  ist Skalierungsfaktor zwischen Szenenleuchtdichte und einem Pixelwert. Wegen  $k$  sind unbekannte  $L_0(\theta_i, \phi_i)$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) berechenbar.
- Um  $k$  zu bestimmen, müssen wir eine photometrische Messung zwischen Pixelintensität und physische Einheit ( $\text{Watt/m}^2$ ) für die Beleuchtungsstärke durchführen.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

Approximation der Beleuchtungsverteilung mit diskretem Sampling

- Die Beleuchtungsverteilung wird mit diskretem Sampling von Leuchtdichte über die ganze Fläche der ausgedehnten Lichtquelle approximiert.
- Was heißt, Repräsentation der Szene mit einer Menge von virtuellen gerichteten Lichtquellen.
- Das Doppelintegral in der vorherigen Gleichung wird folgenderm. approximiert:

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=0}^n f(\theta_i, \phi_i; \theta_e, \phi_e) L(\theta_i, \phi_i) \omega_i S(\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i$$

- $n$  = Anzahl der SamplingRichtungen,
- $L(\theta_i, \phi_i)$  = Beleuchtungsleuchtdichte pro Einheit fester Winkel
- $\omega_i$  = fester Winkel für die Samplingrichtung  $(\theta_i, \phi_i)$
- BRDF mit einem vereinf. Torrance-Sparrow Modell parametrisiert.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- Mit dem Modell wird der Pixelwert des Schattenb. berechnet als:

$$P(\theta_e, \phi_e) = \sum_{i=0}^n \left( K_d \cos \theta_i + K_s \frac{1}{\cos \theta_r} e^{-\frac{\gamma(\theta_i, \phi_i)^2}{2\sigma^2}} \right) S(\theta_i, \phi_i) L(\theta_i, \phi_i) \omega_i$$

(Gleichung 1)

- $\theta_r$  = Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Blickrichtung
- $\gamma(\theta_i, \phi_i)$  = Winkel zwischen der Oberflächennormalen und der Bisektor der Lichtquellenrichtung und der Blickrichtung
- $K_d, K_s$  = Konstanten für diffuse und spekulare Reflektionskomponenten
- $\sigma$  = Oberflächenrauigkeit
- Pixel besteht aus 3 Farbbänder (R,G,B), also wird jedes  $L(\theta_i, \phi_i)$  für die zugehörigen Farbbänder separat berechnet.
- Um  $L(\theta_i, \phi_i)$  zu berechnen brauchen wir die Reflektionsparameter  $K_s, \sigma$  und das korrespondierende Farbband von  $K_d$  (diffuser Refl.-Par.= RGB)



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

### 2. Grundsritte der vorgestellten Methode

Basierend auf die vorherige Formel, welches die Beleuchtungsleuchtdichte der Szene mit den Pixelwerten des Schattenbildes in Beziehung setzt, wird die Leuchtdichtenverteilung der Szene berechnet aus der Bildhelligkeit innerhalb Schatten.

- a) Initialisiere die Reflektionsparameter der Schattenoberfläche. Wir nehmen an, dass die Schattenfläche Lambertian ist, und der diffuse Parameter  $K_d$  nimmt den Pixelwert das hellsten Punktes der Schattenoberfläche an. Spekularen Parameter werden auf Null gesetzt ( $K_s=0, \sigma=0$ ).I



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- b) Berechne die Leuchtdichtewerte  $L(\theta_i, \Phi_i)$  der virtuellen direkten Lichtquellen, welche die Beleuchtungsverteilung der realen Szene modellieren. Die Leuchtdichtenverteilung  $L(\theta_i, \Phi_i)$  wird berechnet mit den Reflektionsparameter ( $K_d, K_s, \sigma$ ) und der Bildhelligkeit in den Schattenflächen des Schattenbildes (Teil 4)
- c) Berechne die Reflektionsparameter der Schattenoberfläche ( $K_d, K_s, \sigma$ ) von der beschafften Leuchtdichtenverteilung  $L(\theta_i, \Phi_i)$  der Szene indem man eine Beschleunigungstechnik verwendet (Teil5)
- d) Berechne die Leuchtdichtenverteilung der Szene  $L(\theta_i, \Phi_i)$  von den beschafften Reflektionsparametern ( $K_d, K_s, \sigma$ ) (Teil 4).



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- e) Wenn es keine signifikante Veränderung in den berechneten Werten  $L(\theta_i, \Phi_i)$ ,  $K_d$ ,  $K_s$  und  $\sigma$  gibt, dann gehe zum nächsten Schritt. Ansonsten gehe zurück zu Schritt c
- f) Beende den Berechnungsprozess falls die beschaffene Leuchtdichtenverteilung die reale Leuchtdichtenverteilung mit genügend Genauigkeit approximiert. Ansonsten gehe zum nächsten Schritt.
- g) Erweitere adaptiv die Samplingrichtungen der Beleuchtungsverteilung (Teil 6). Dann gehe zurück zu Schritt b.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- 4. Berechnung der Leuchtdichtenverteilung für eine gegebene Menge an Reflektionsparameter der Schattenfläche
  - Aus der vorherigen Gleichung, der die Pixelwerte des Schattenbildes mit der Leuchtdichte der Szene in Beziehung setzt, wird für jedes Pixelbild des Schattenbildes folgendermaßen eine lineare Gleichung beschafft:
$$a_1 L_1 + a_2 L_2 + a_3 L_3 + \dots + a_{1n} L_n = P$$
  - Wobei  $L_i (i=1, 2, \dots, n)$   $n$  unbekannte Beleuchtungsleuchtdichten sind, spezifiziert von  $n$  Samplingrichtungen der Leuchtdichtenverteilung für die Szene.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- Die Koeffizienten  $a_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) repräsentieren

$$\left( K_d \cos \theta_i + K_s \frac{1}{\cos \theta_r} e^{-\frac{\gamma(\theta_i, \phi_i)^2}{2\sigma^2}} \right) S(\theta_i, \phi_i)$$

- ( $i = 1, 2, \dots, n$ )
- Wir berechnen  $\theta_i$ ,  $\theta_r$ ,  $\gamma(\theta_i, \phi_i)$  und  $S(\theta_i, \phi_i)$  abhängig von der 3D Geometrie des Oberflächenpunktes korrespondierend zu dem Bildpixel, der Beleuchtungsrichtung und der Form des Schattenwerfenden Objektes.
- Wenn wir eine Anzahl von  $m$  Pixel auswählen, wird eine Menge von linearen Gleichungen folgendermaßen beschafft:

$$\begin{aligned} a_{11}L_1 + a_{12}L_2 + a_{13}L_3 + \dots + a_{1n}L_n &= P_1 \\ a_{21}L_1 + a_{22}L_2 + a_{23}L_3 + \dots + a_{2n}L_n &= P_2 \\ a_{31}L_1 + a_{32}L_2 + a_{33}L_3 + \dots + a_{3n}L_n &= P_3 \\ &\dots &&\dots \\ a_{m1}L_1 + a_{m2}L_2 + a_{m3}L_3 + \dots + a_{mn}L_n &= P_m \end{aligned}$$



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

- Wenn wir eine genügend große Anzahl von Bildpixel aussuchen, sind wir in der Lage die Menge von unbekanntem  $L(\theta_i, \phi_i)$  zu lösen.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

### 5. Berechnung von Reflektionsparameter einer Schattenoberfläche für eine gegebene Leuchtdichtenverteilung

- Die Reflektionsparameter der Schattenfläche berechnen wir indem wir die Summe der quadratischen Differenz zwischen der beobachteten Pixelintensität in dem Schattenbild und die Pixelwerte der zugehörigen Oberflächenpunkte minimieren.

- Die minimierte Funktion wird definiert als:

$$f = \sum_{j=0}^m (P_j' - P_j)^2$$

- $P_j'$  ist die Pixelintensität in den Schatten des Schattenwerfenden Objektes,  $P_j$  ist der Pixelwert des zugehörigen Oberflächenpunktes, der berechnet wird in dem man die gegebene Leuchtdichte  $L(\theta_i, \Phi_i)$  der Szene in Gleichung 1 einsetzt.
- $m$  ist die Anzahl der Pixel, die für die Minimalisierung gebraucht werden.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

### 6. Adaptives Sampling der Leuchtdichtenverteilung

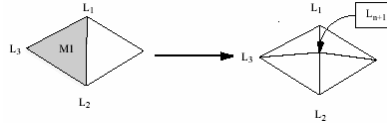
- Falls die berechnete Leuchtdichtenverteilung für eine Menge von Samplingrichtungen nicht die Beleuchtungsverteilung der Szene mit genügend Genauigkeit approximiert, erhöhen wir, abhängig von der Berechnung der vorherigen Iteration, adaptiv die Samplingrichtungen.
- Dass heißt, wir erhöhen die Samplingrichtungen um und innerhalb direkter Lichtquellen, halt da wo eine Leuchtdichtenverteilung sich schnell ändern kann.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

Zusätzliche Samplingrichtungen werden folgendermaßen bestimmt:

- Drei Samplingrichtungen mit den Leuchtdichtewerten  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  so platziert, dass sie ein Dreieck  $M_1$  darstellen



- Um festzustellen, ob eine neue Samplingrichtung zwischen  $L_1$  und  $L_2$  zugefügt werden muss oder nicht, muss man die folgende Kostenfunktion betrachten:

$$U(L_1, L_2) = \text{diff}(L_1, L_2) + \alpha \min(L_1, L_2) \text{angle}(L_1, L_2)$$

- $\text{diff}(L_1, L_2)$  ist die Leuchtdichtedifferenz zwisch.  $L_1$  und  $L_2$ ,  $\min(L_1, L_2)$  gibt den kleineren Leuchtdichtewert zurück,  $\text{angle}(L_1, L_2)$  liefert den Winkel zwisch. beiden Richtungen und  $\alpha$  ist eine per Hand festgelegter Parameter, der die relativen Gewichte beider Faktoren festlegt.



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

$$U(L_1, L_2) = \text{diff}(L_1, L_2) + \alpha \min(L_1, L_2) \text{angle}(L_1, L_2)$$

- Der erste Term ist dafür gedacht um die schnelle Veränderung der Leuchtdichteverteilung um direkte Lichtquellen festzuhalten
- Der zweite Term führt zu feines Sampling der Leuchtdichteverteilung innerhalb direkter Lichtquellen
- Der Term  $\text{angle}(L_1, L_2)$  vermeidet unnötiges dichtes Sampling innerhalb direkter Lichtquellen. (In den Experimenten von Sato wird  $\alpha$  auf 0,5 gesetzt)
- Falls die Kosten  $U$  groß sind, wird eine neue Samplingrichtung zwischen  $L_1$  und  $L_2$  angelegt.



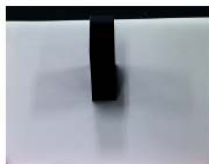
## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren

### 7. Versuchsergebnisse

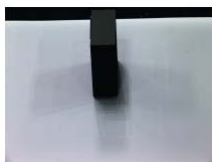
- Die vorgestellte Methode wurde mit realen Bildern in innen- und außenräumlichen Umgebungen getestet
- Ein Bild mit ein Schattenwerfendes Objekt wurde unter einer gewöhnlichen Beleuchtungsumgebung aufgenommen
- Mit einbezogen waren sowohl direkte Lichtquellen wie Flourescent Lampen als auch indirekte Beleuchtung wie die Reflektionen einer Decke oder einer Wand
- Die Form des Schattenwerfenden Objekts und die Kameraparameter des Inputbildes wurden mit einem Photo-modellierendem Werkzeug beschafft
- Dann wurde eine Beleuchtungsverteilung der Szene berechnet mit Hilfe der Bildbeleuchtungsstärke innerhalb Schatten in dem Schattenbild wie in Teil 3 erklärt
- Die Berechnung der Leuchtdichtenverteilung der Szene wurde iterativ refined wie in Teil 6 beschrieben, angefangen mit einer kleinen Anzahl von Samplingrichtungen. Zur gleichen Zeit wurden die Reflektionsparameter ( $K_d$ ,  $K_s$  und  $\sigma$ ) der Schattenoberfläche berechnet, wie in Teil 5 erklärt.
- Dann wurde die Schattenfläche um das Schattenwerfende Objekt künstlich erzeugt mit Hilfe der berechneten Leuchtdichtenverteilung der Szene und der berechneten Reflektionsparameter der Schattenfläche



## Beleuchtung aus Schatten rekonstruieren



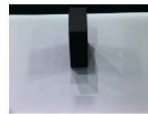
(a)



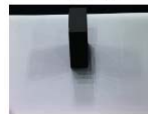
$n = 140$



$n = 20$

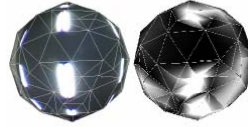
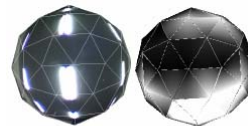


$n = 40$



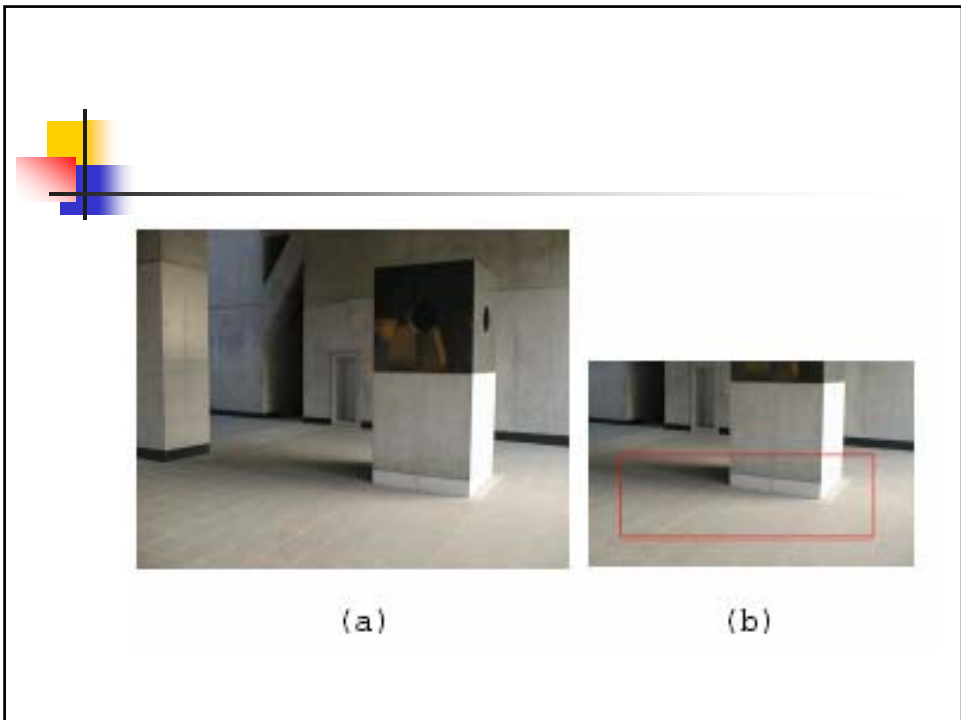
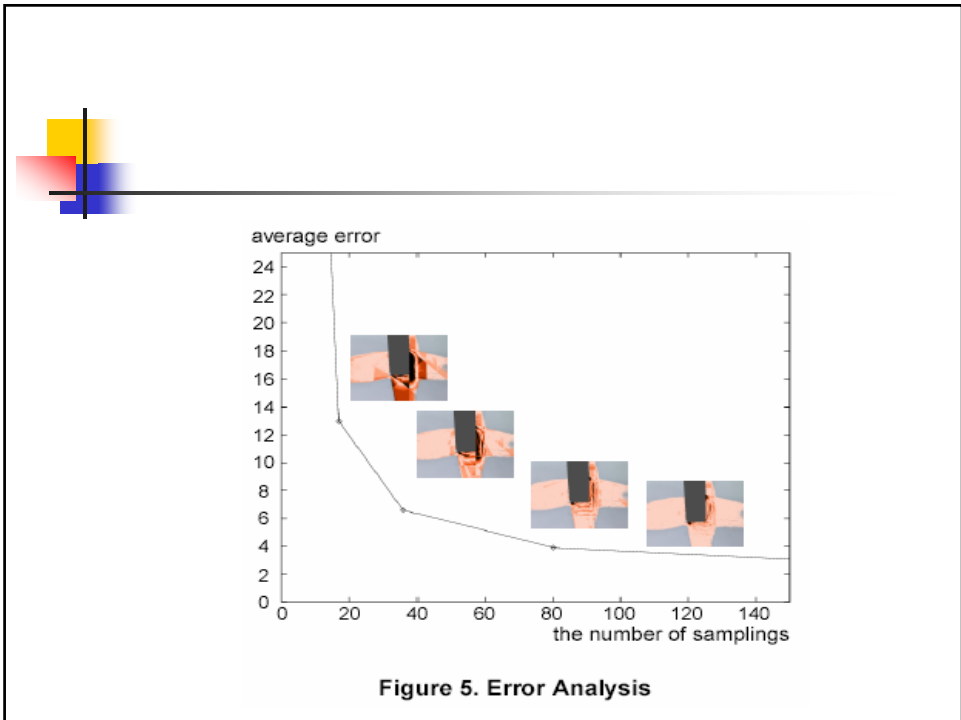
$n = 80$

(a)



(b)

(c)





n = 20



n = 40



n = 80



n = 140