



Γραφικά Υπολογιστών

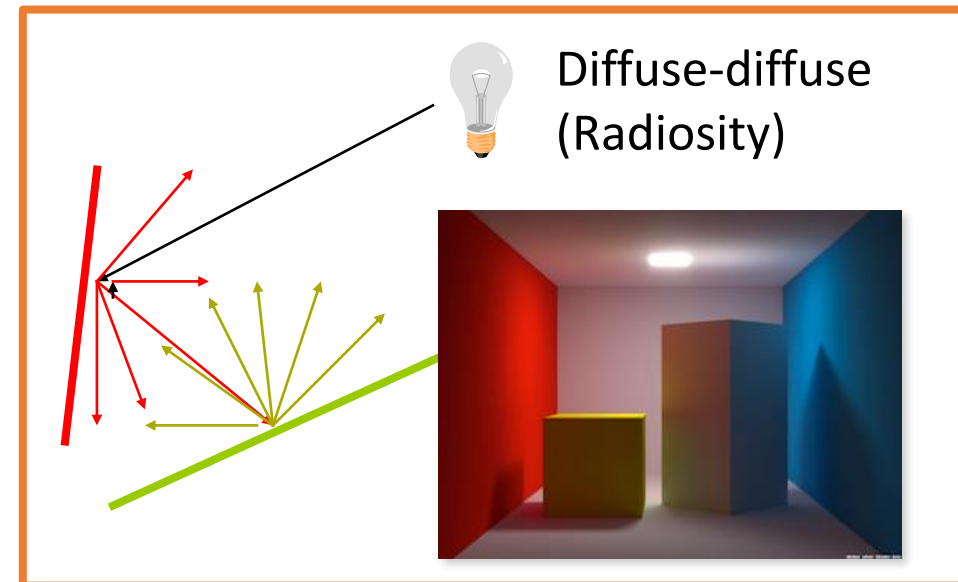
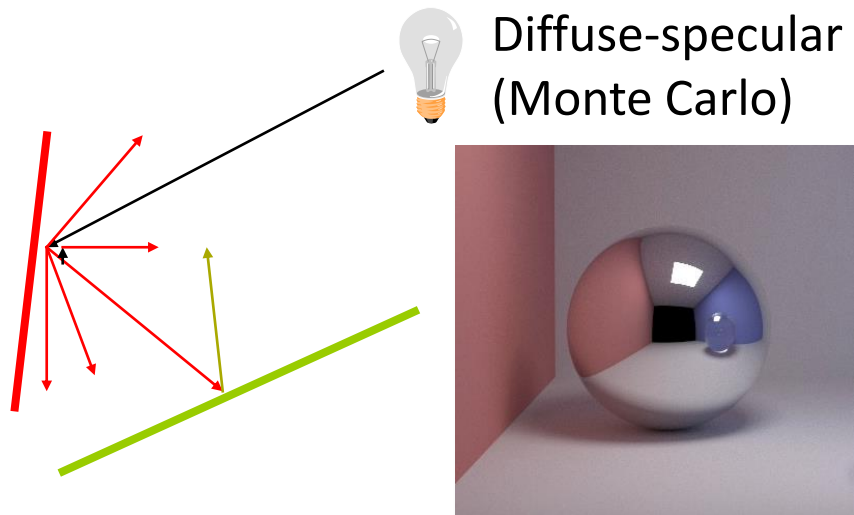
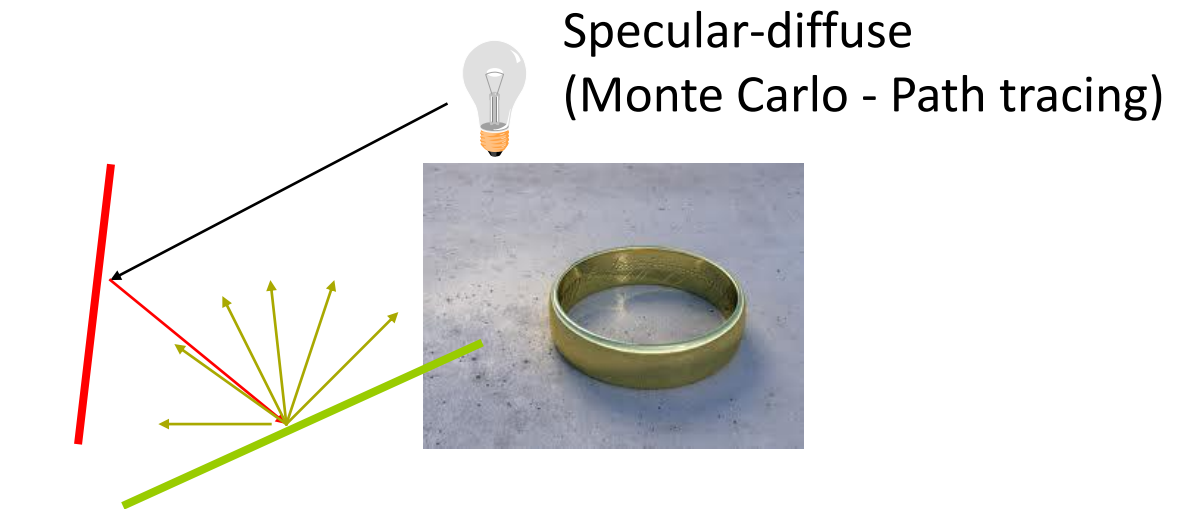
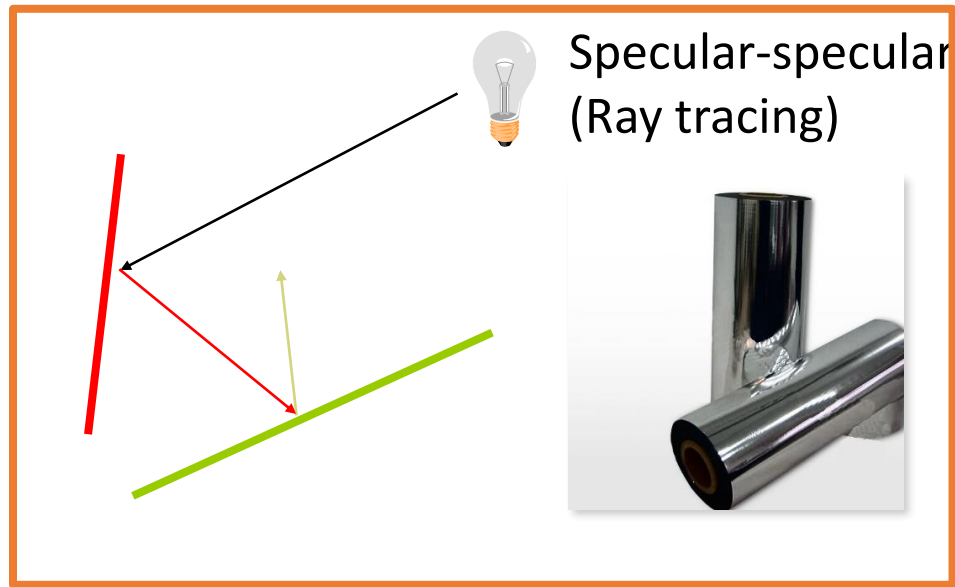
Γενικός Φωτισμός με τη Μέθοδο Radiosity

Andreas Aristidou

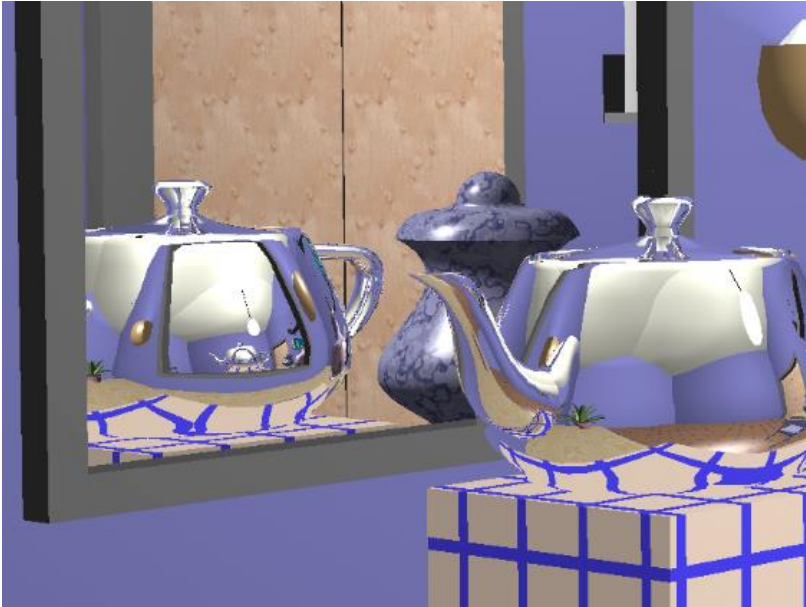
andarist@ucy.ac.cy

<http://www.andreasaristidou.com>

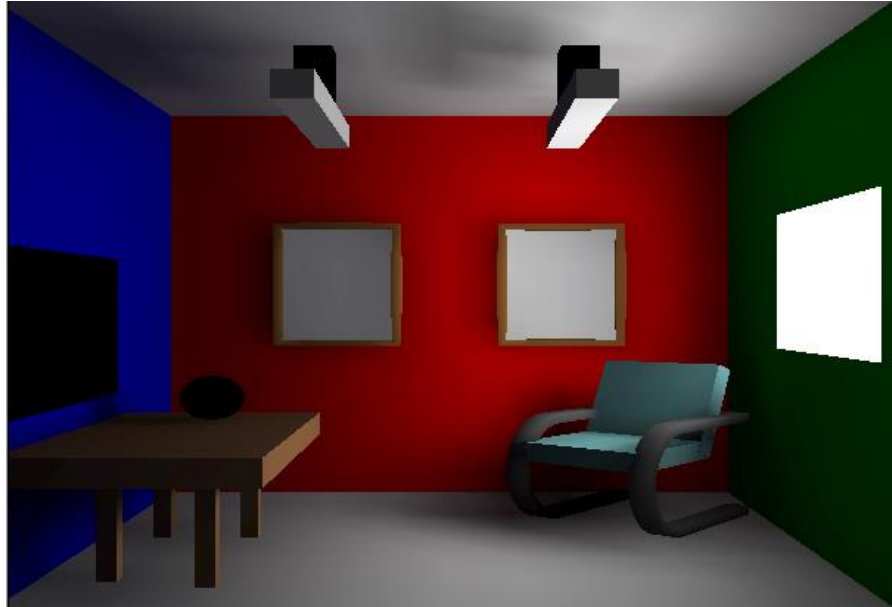
Είδη επιφανειών και μέθοδοι υπολογισμού του γενικού φωτισμού



Εικόνες με παρακολούθηση ακτίνας και Radiosity



Γενικός φωτισμός με κατευθυνόμενες επιφάνειες - συνήθως σημειακές πηγές, (ray tracing).



Γενικός φωτισμός με Διάχυτες επιφάνειες (radiosity)...



... color bleeding*

* In computer graphics and 3D rendering, **color bleeding** is the phenomenon in which objects or surfaces are **colored** by reflection of **colored** light from nearby surfaces.

Εικόνες με Radiosity



Εικόνες με Radiosity



Περιεχόμενα μαθήματος

- Κλασσική λύση Radiosity
- Υπολογισμός των form-factors
 - Με τον ημικόβο (hemi-cube)
 - Με παρακολούθηση ακτίνας (ray-casting)
- Προοδευτική λύση (Progressive Refinement Radiosity)
- Κατάτμηση σε μικροεπιφάνειες (Meshing)
- Απόδοση (Rendering)
- Radiosity vs Ray-Tracing

Cindy Goral, Kenneth E. Torrance, Donald P. Greenberg and B. Battaile,
"Modeling the interaction of light between diffuse surfaces", Computer Graphics, Vol. 18, No. 3.

Radiosity

- **Ray tracing** models specular reflection and refractive transparency, but still uses an **ambient term** to account for other lighting effects
- **Radiosity** is the rate at which energy is emitted or reflected by a surface
 - By conserving light energy in a volume, these radiosity effects can be traced



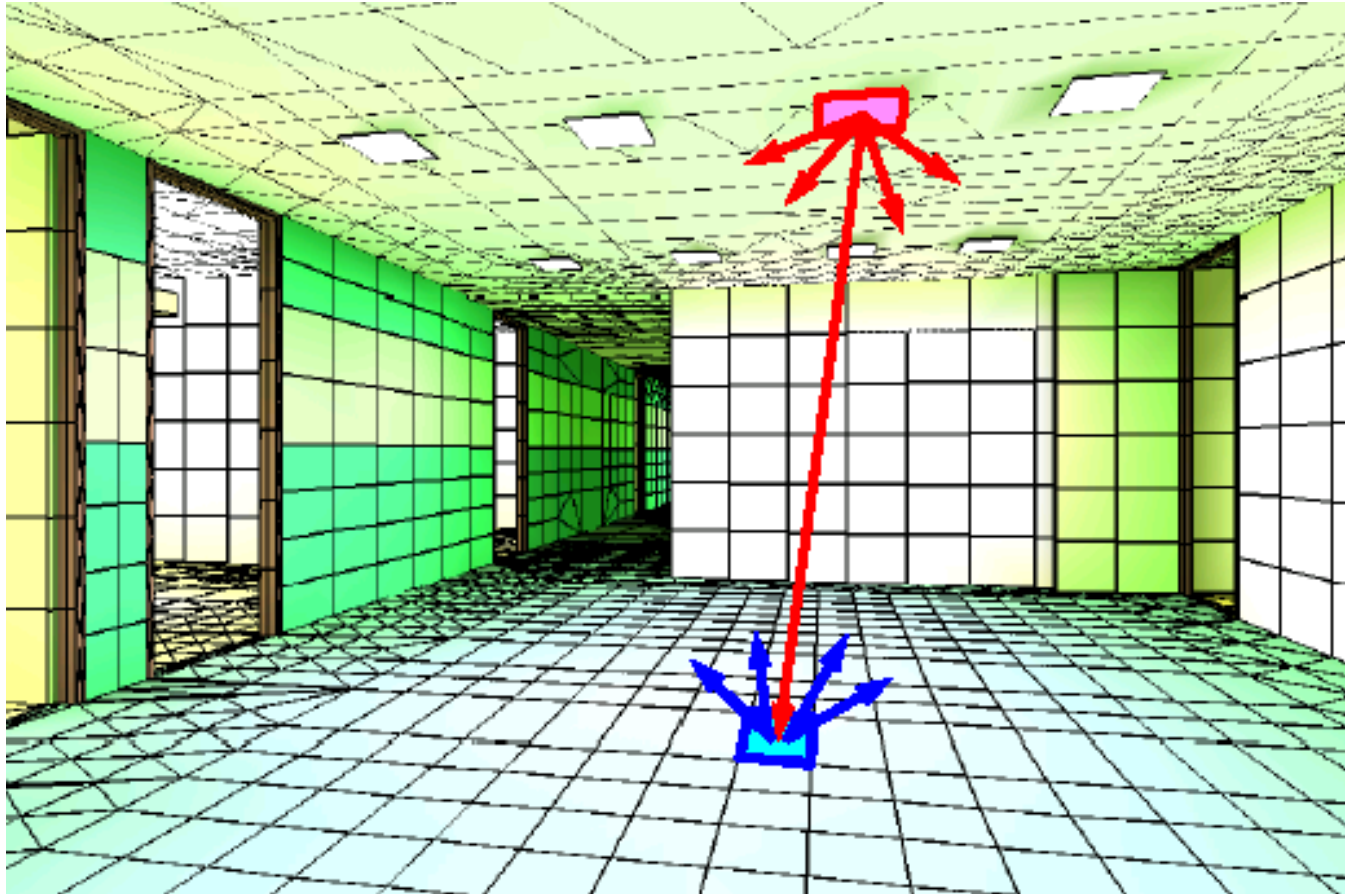
Radiosity

Goal: Simulate diffuse inter-object reflections and shadows



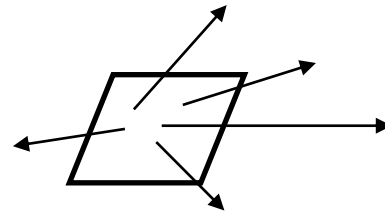
Radiosity

Basic Idea: Treat every polygon as light source



Radiosity Measure

- Είναι τρόπος μέτρησης ενέργειας φωτός...
- Ο αλγόριθμος:
 - **Radiosity (B)** = ροή ενέργειας ανά μονάδα χρόνου (flux) ανά μονάδα επιφάνειας που εκπέμπεται από ένα σώμα, μετριέται σε W/m^2



- Βασίζεται στο νόμο της διατήρησης της ενέργειας,
 - το Radiosity σε ένα κλειστό περιβάλλον είναι σταθερό
- Μπορεί να υπολογίσει την ανταλλαγή ενέργειας μόνο μεταξύ επιφανειών διάχυτης ανάκλασης
- Εξαρτάται από το μήκος κύματος!

Basic Definitions

- **Radiosity: (B)** Energy per unit area per unit time.
- **Emission: (E)** Energy per unit area per unit time that the surface emits itself (e. g., light source).
- **Reflectivity: (r)** The fraction of light which is reflected from a surface. ($0 \leq r \leq 1$)
- **Form- Factor: (F)** The fraction of the light leaving one surface which arrives to another. ($0 \leq F \leq 1$)

Βασική ιδέα

- Σε μια επιφάνεια i :

$$\text{ενέργεια } (i) = \text{ενδογενή ενέργεια } (i) + \text{ανακλώμενη ενέργεια } (i)$$

- Εφόσον θεωρούμε diffuse επιφάνειες

$$\text{ανακλώμενη ενέργεια } (i) = \rho_i * (\text{συνολική εισερχόμενη ενέργεια από το περιβάλλον})$$

- ενδογενή ενέργεια = Emittance (E), ισοδύναμη του Radiosity (B)
- ρ_i = συντελεστής διάχυτης ανάκλασης, μπορεί να διαφέρει για κάθε μήκος κύματος

The Basic Radiosity Equation

- We will compute the light emitted from a single *differential surface area* dA_i .
- It consists of:
 - Light emitted by dA_i .
 - Light reflected by dA_i .
 - depends on light emitted by other dA_j , fraction of it reaches dA_i .
- The fraction depends on the geometric relationship between dA_i and dA_j : the *form factor* .

Η εξίσωση του Radiosity

- Ας θεωρήσουμε πολυγωνική σκηνή
 - τα πολύγωνα χωρίζονται σε n μικρά 'patches' (μικροεπιφάνειες)
 - μικροεπιφάνεια i έχει εμβαδόν A_i , radiosity B_i και εκπέμπει ενέργεια E_i
- Έτσι μπορούμε να εκφράσουμε τη συνολική ενέργεια που φεύγει από κάθε επιφάνεια σαν:

$$A_i B_i = A_i E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n A_j B_j F_{ji} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

If we had equal sized emitters and receivers, the fraction of energy emitted by one and received by the other would be identical to the fraction of energy going the other way.

Thus, the form factors from A_i to A_j and from A_j to A_i are related by the ratios of their areas:

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

$$B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^n B_j F_{ij}$$

F_{ji} = **form-factor**, μέρος/ λόγος (proportion) της ενέργειας από το j η οποία φτάνει στο i ανά μονάδα εμβαδού του j

Radiosity: Λύση της Εξίσωσης

- Τα $\{B_i\}$ είναι τα **άγνωστα** χρώματα στις επιφάνειες της σκηνής.
- Τα $\{E_i\}$ είναι εντάσεις φωτισμού που μας είναι **γνωστές** από τις προδιάγραφες των φωτεινών πηγών στη σκηνή μας.
- Τα $\{\rho_i\}$ είναι ιδιότητες της εκάστοτε επιφάνειας (και πάλι γνωστά)
- Τα $\{F_{ij}\}$ μπορούν να υπολογιστούν (δες επόμενα slides), οπότε εδώ θα τα θεωρήσουμε γνωστά.

Ο πιο απλός τρόπος για τον υπολογισμό των $\{B_i\}$ είναι η συγκρότηση συστήματος N εξισώσεων με N αγνώστους.

(Πώς γίνεται αυτό;) Στην πραγματικότητα γίνεται χρήση της μεθόδου Gauss-Seidel ή μιας άλλης επαναληπτικής μεθόδου.

Radiosity: Λύση της Εξίσωσης

Να το σύστημα N εξισώσεων με N αγνώστους, εκφρασμένο σαν μια εξίσωση!

$$\mathbf{A} \mathbf{x} = \mathbf{b}$$

οπού $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix}$ είναι ο άγνωστος, $\mathbf{b} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_N \end{bmatrix}$

και $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 - \rho_1 F_{11} & -\rho_1 F_{12} & \dots & -\rho_1 F_{1N} \\ -\rho_2 F_{21} & 1 - \rho_2 F_{22} & \dots & -\rho_2 F_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\rho_N F_{N1} & -\rho_N F_{N2} & \dots & 1 - \rho_N F_{NN} \end{bmatrix}$

Radiosity: Λύση της Εξίσωσης

Ο πιο απλός υπολογισμός του φωτισμού στην κάθε επιφάνεια της σκηνής ανάγεται λοιπόν στη λύση της εξίσωσης αυτής:

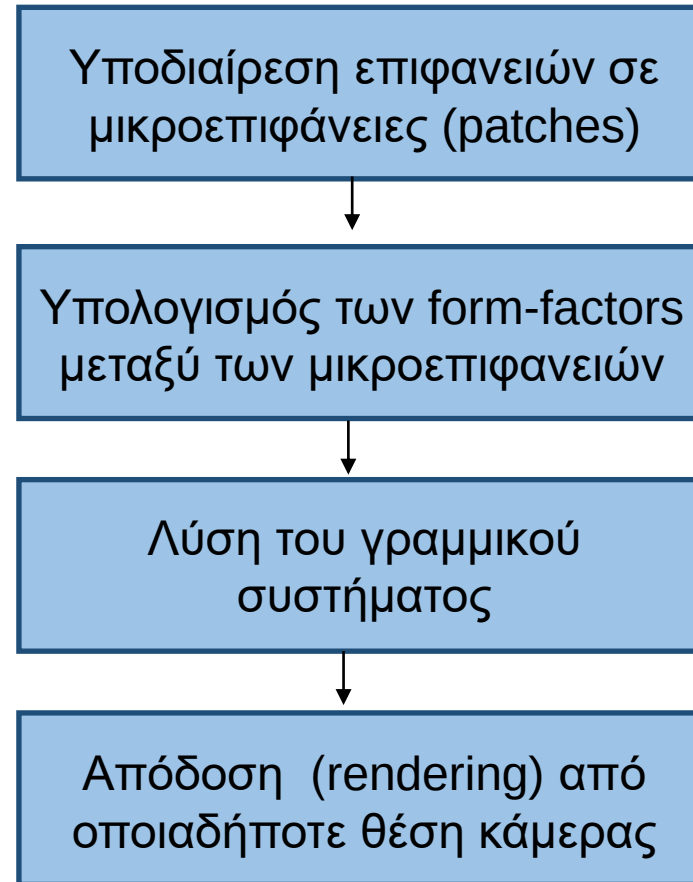
$$\begin{aligned} \mathbf{A} \mathbf{x} &= \mathbf{b} \\ \Rightarrow \mathbf{x} &= \mathbf{A}^{-1} \mathbf{b} \end{aligned}$$

Οπού $\mathbf{A}^{-1}$ είναι ο αντίστροφος πίνακας του $\mathbf{A}$.

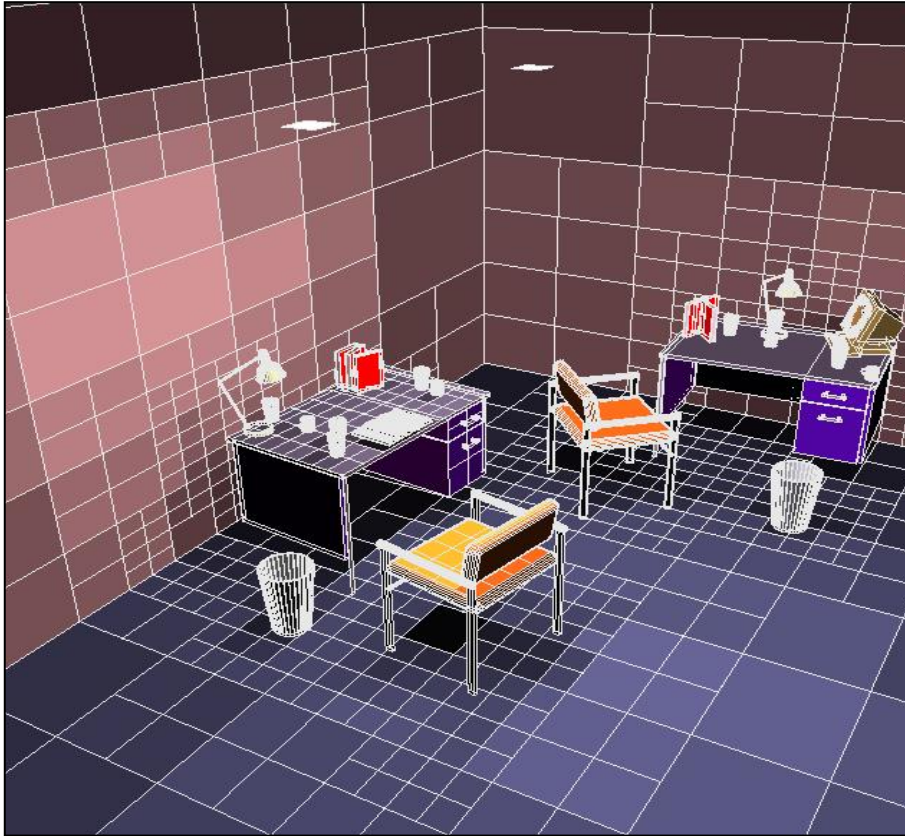
Πρόσεξε πως η λύση είναι η ίδια εάν η σκηνή είναι χωρισμένη σε 10 επιφάνειες, ή σε 1000!

Ένα σύνολο από εξισώσεις για **κάθε μήκος κύματος**!

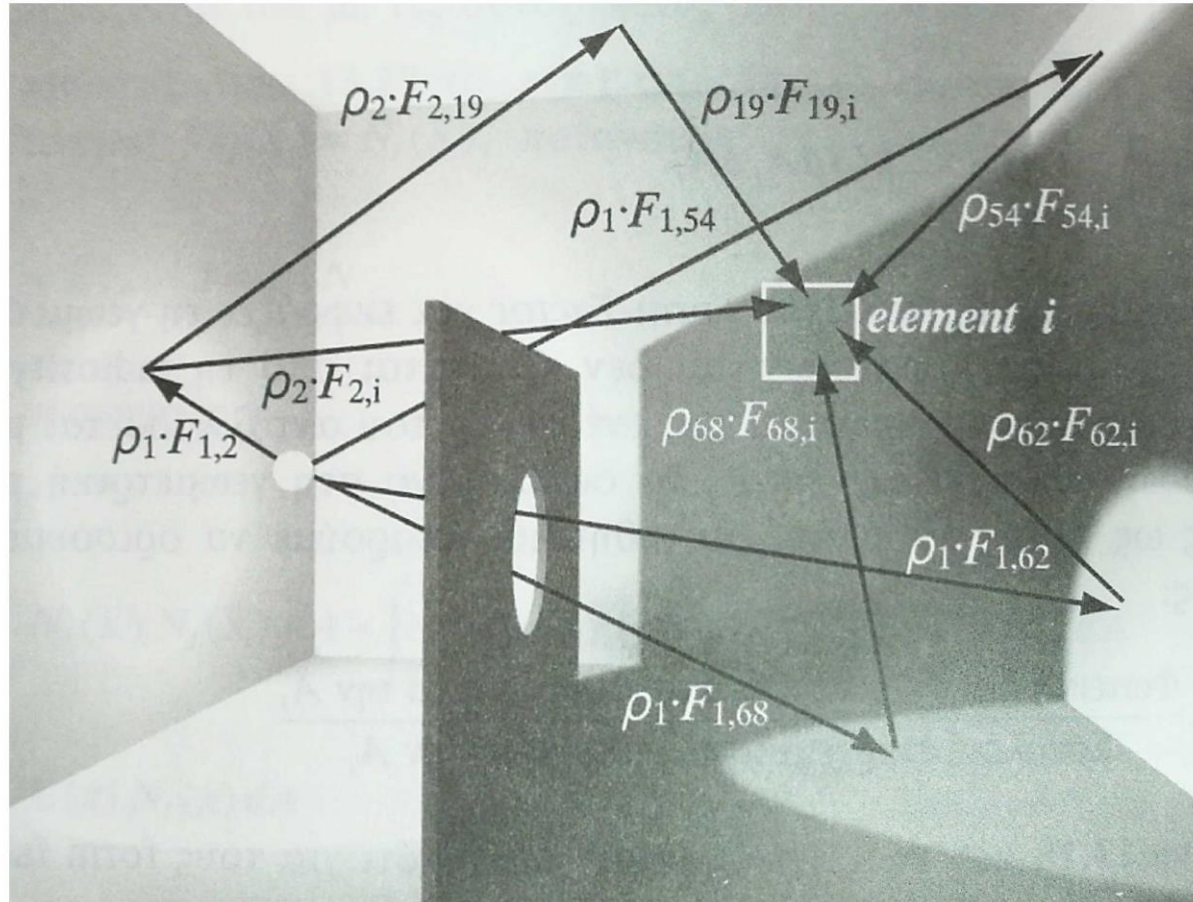
Επισκόπηση της διαδικασίας (κλασσική radiosity)



Απλό παράδειγμα



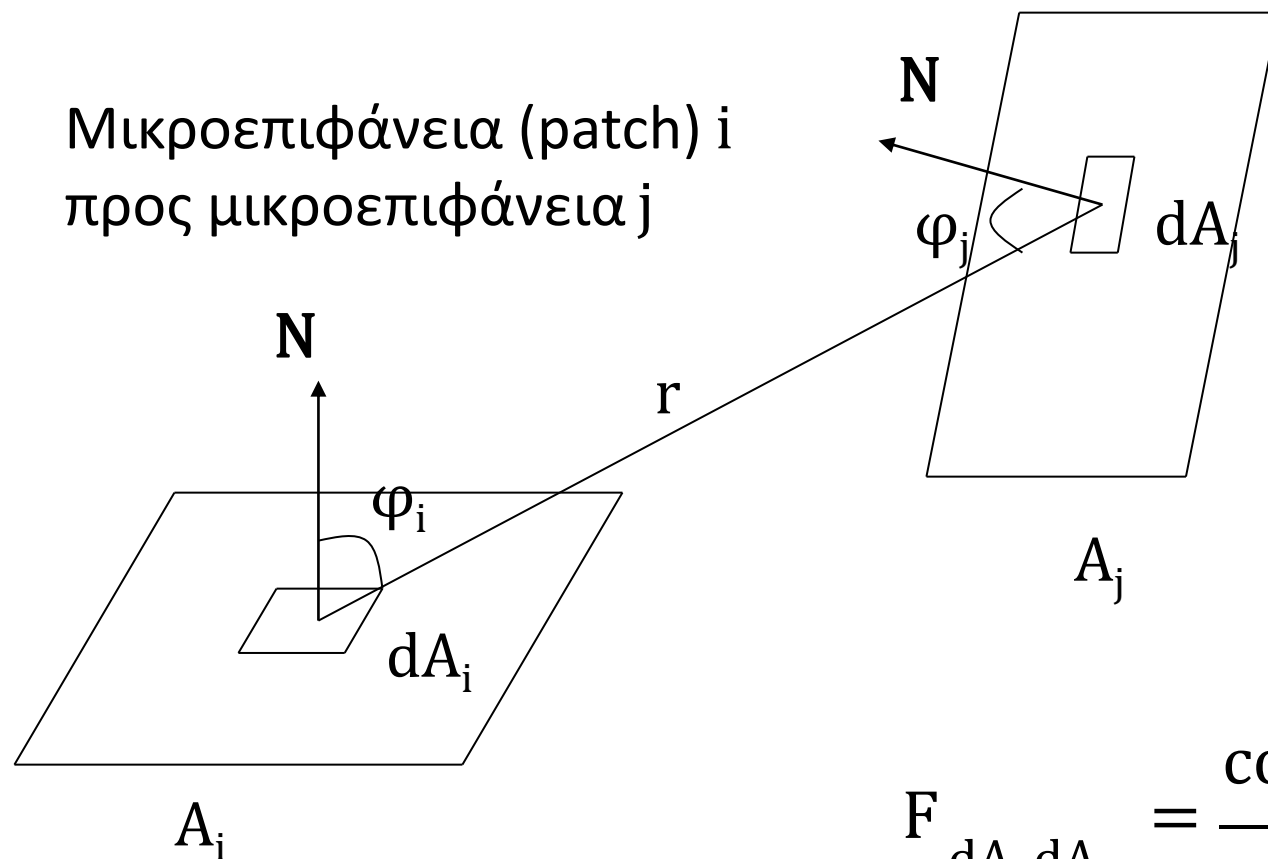
Radiosity



PhotoScan by Google Photos

Radiosity: Υπολογισμος των **Form-factors**

Μικροεπιφάνεια (patch) i
προς μικροεπιφάνεια j



Διαφορικά
Form-factor

F_{ji} = **form-factor**, μέρος / λόγος (proportion) της ενέργειας από το j η οποία φτάνει στο i ανά μονάδα εμβαδού του j

$$F_{dA_i dA_j} = \frac{\cos \varphi_i \cos \varphi_j}{\pi r^2}$$

The form-factor is purely a function of geometric relationship between patches and thus does not depend on viewer position or surface reflectivity attributes.

Αναλυτικά Form Factors

Από διαφορικό σε επιφάνεια $F_{dA_i A_j} = \int_{A_j} \frac{\cos \alpha_i \cos \alpha_j}{\pi r^2} dA_j$

Από επιφάνεια σε επιφάνεια $F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \alpha_i \cos \alpha_j}{\pi r^2} dA_j dA_i$

Αν λάβουμε υπόψη και την ορατότητα (visibility, $0 \leq V_{ij} \leq 1$) τότε:

$$F_{ij} = \frac{1}{A_i} \int_{A_i} \int_{A_j} \frac{\cos \alpha_i \cos \alpha_j}{\pi r^2} V_{ij} dA_j dA_i$$

Πρακτικά τα form factors δεν μπορούν να παραχθούν αναλυτικά!

Ιδιότητες του Form Factors

Αμοιβαιότητα (Reciprocity)

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

Προσθετικότητα (Additivity)

$$F_{i(j \cup k)} = F_{ij} + F_{ik}$$

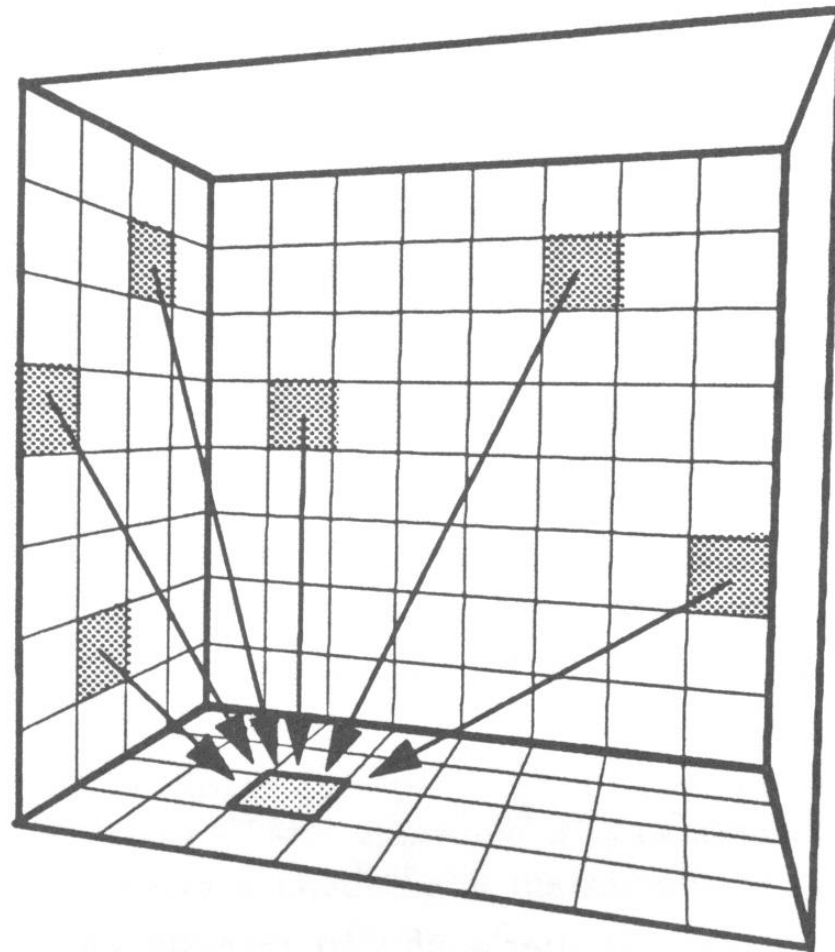
Διατήρηση της ενέργειας σε κλειστό περιβάλλον

$$\sum_{j=0}^n F_{ij} = 1$$

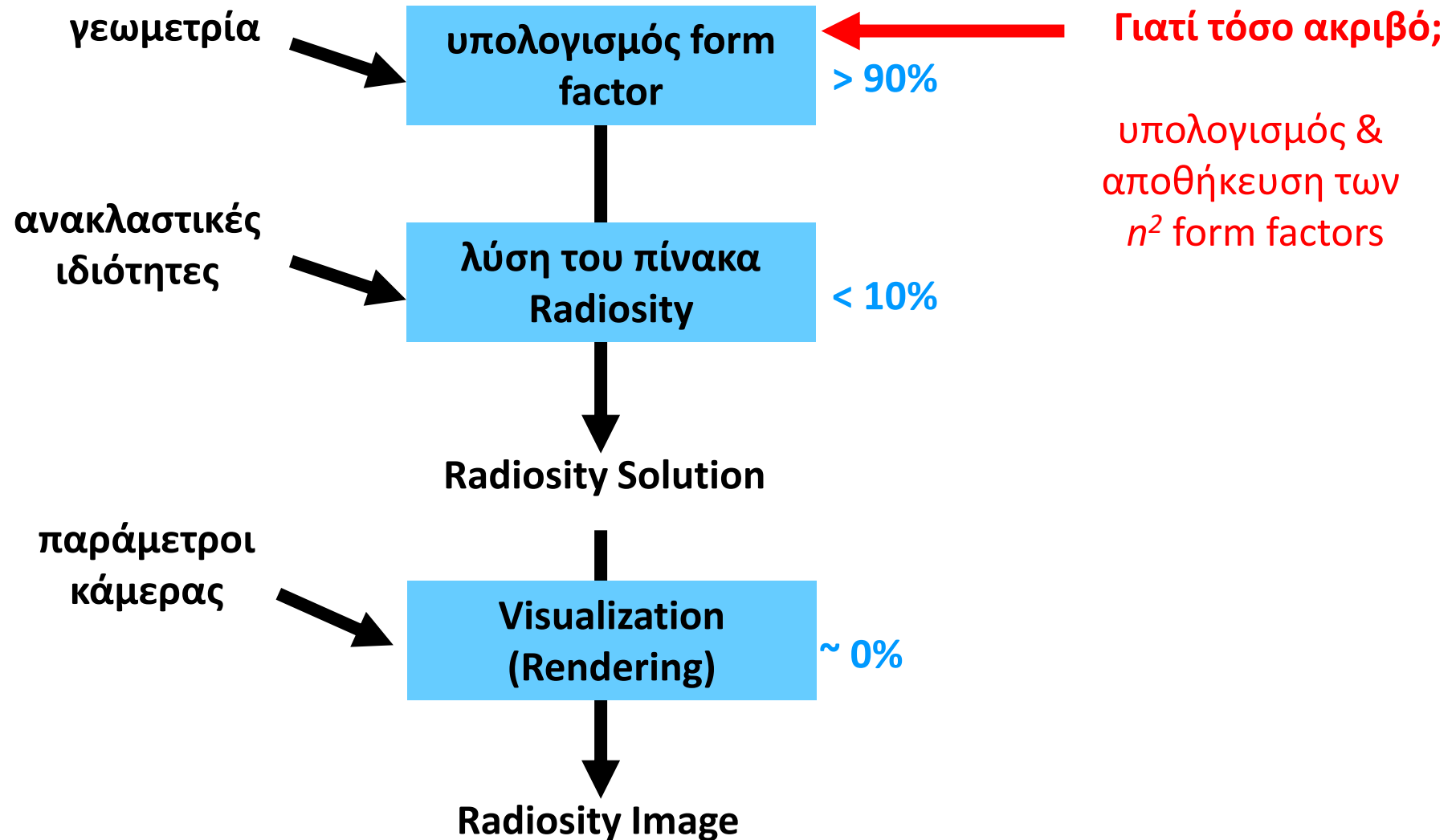
Radiosity

Ενέργεια (i) = Ενδογενή ενέργεια (i) + Ανακλώμενη ενέργεια (i)

Ανακλώμενη ενέργεια (i) = ρ_i * (συνολική εισερχόμενη ενέργεια από το περιβάλλον)



Βήματα σε μια λύση Radiosity

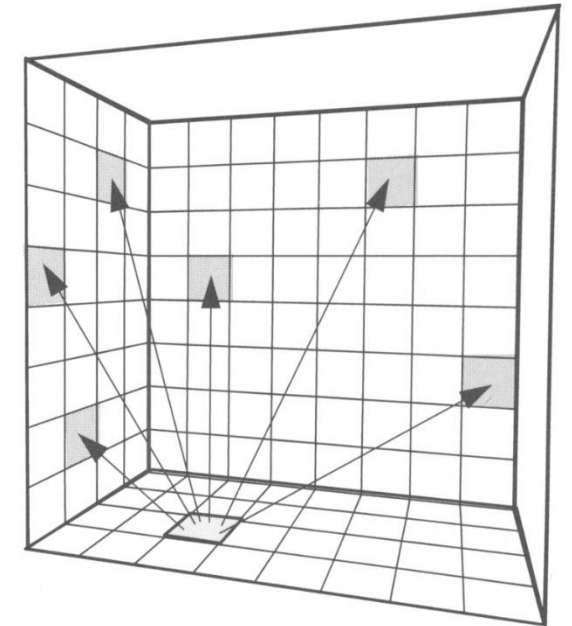
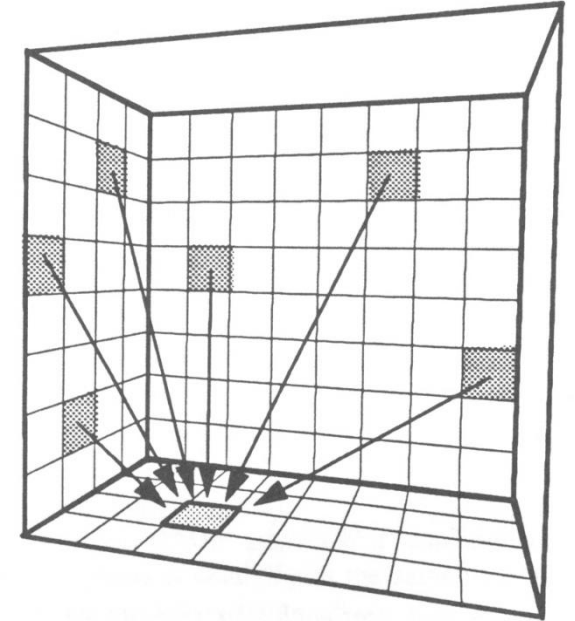


Progressive Refinement

- The classical radiosity algorithm (Goral et al. 1984) constructs and solves a large system of linear equations composed of the pairwise form factors.
- These equations describe the radiosity of an element **as a function of the energy from every other element**, weighted by their form factors and the element's reflectance, r .
 - Thus the classical linear system requires $O(N^2)$ storage, which is prohibitive for large scenes.
- **The progressive refinement algorithm** (Cohen et al. 1988) calculates these form factors iteratively (progressively), on the fly, avoiding these storage requirements.

Προοδευτική εκλέπτυνση (Progressive Refinement)

- Πώς?
 - Αντί να προσθέτουμε όλο το φωτισμό που δέχεται μια μικροεπιφάνεια, κατανέμουμε (distribute) το radiance της μικροεπιφάνειας με το περισσότερο μη κατανεμημένο (undistributed) radiance.
- Στόχος:
 - Παροχή συχνών και περιοδικών (timely) ενημερώσεων (updates) προς τον χρήστη κατά τη διάρκεια του υπολογισμού
- Ιδέα κλειδί:
 - Ενημέρωση (update) ολόκληρης της εικόνας σε κάθε επανάληψη αντί μόνο μιας μικροεπιφάνειας

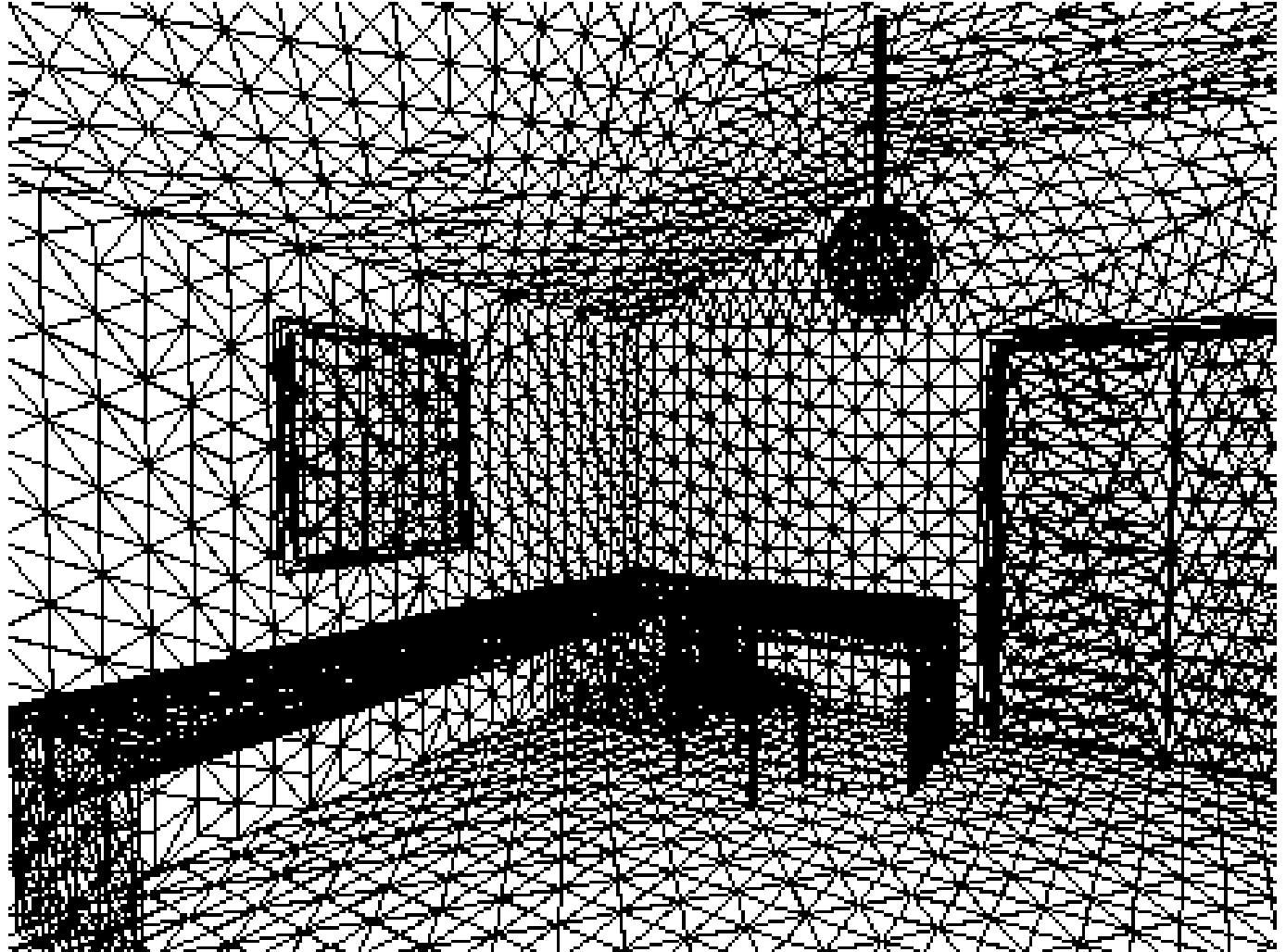


Προοδευτική εκλέπτυνση (Progressive Refinement)

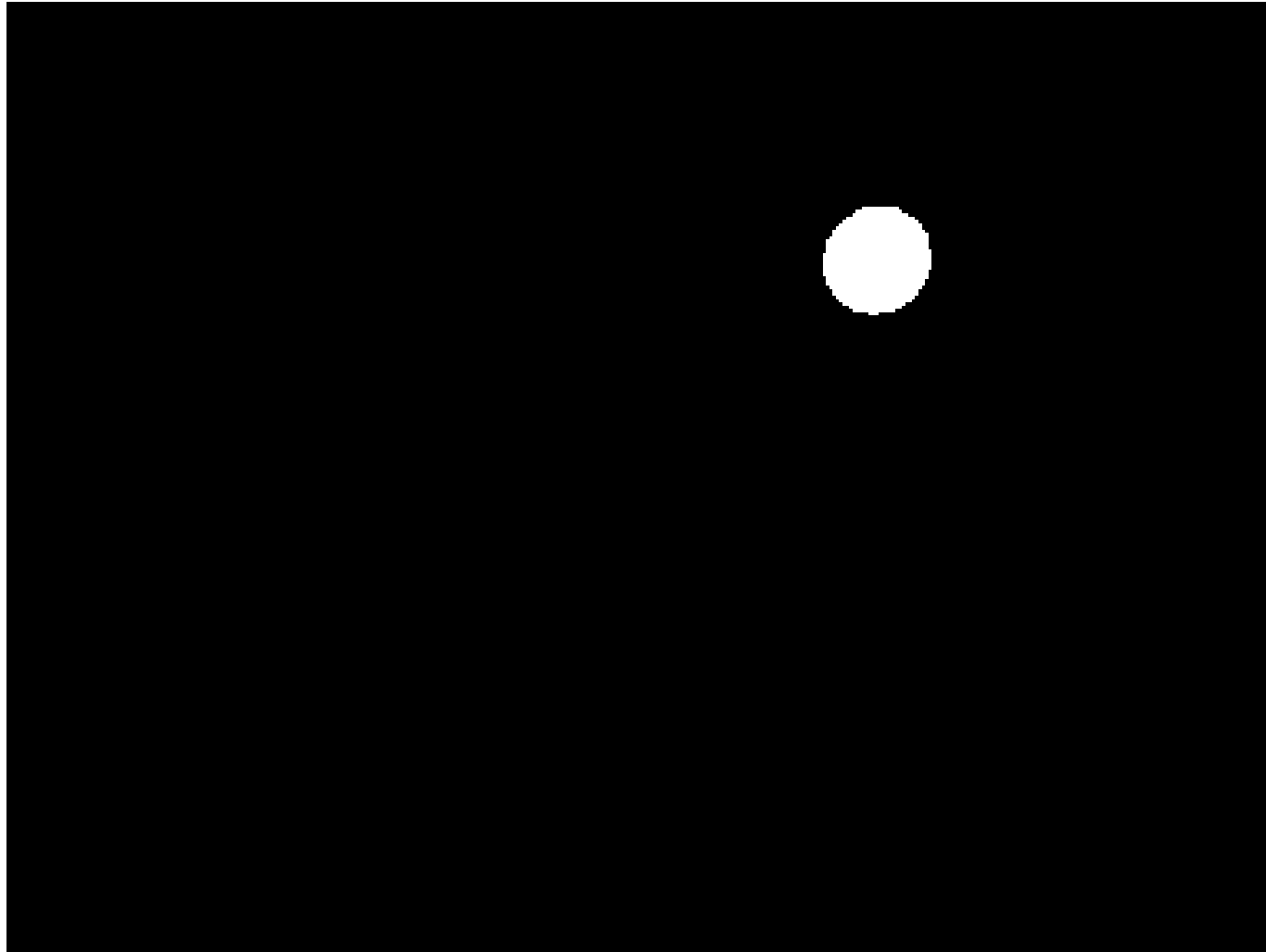
- A common method for solving the radiosity equation is "**shooting radiosity**,"
 - Iteratively solves the radiosity equation by "shooting" light from the patch with the most energy at each step.
 - After the first pass, only those patches which are in direct line of sight of a light-emitting patch will be illuminated.
 - After the second pass, more patches will become illuminated as the light begins to bounce around the scene.
 - The scene continues to grow brighter and eventually reaches a steady state.

Παράδειγμα Προοδευτικής Λύσης

- Στην σκηνή που ακολουθεί έχουμε 1 φωτεινή πηγή αποτελούμενη από 140 τρίγωνα
- Παίρνει γύρο στις 35,000 επαναλήψεις μέχρι να διανείμει το 95% του φωτός



Αρχική μορφή



Με διανομή του 10% του φωτός



Με διανομή του 20% του φωτός



Με διανομή του 50% του φωτός

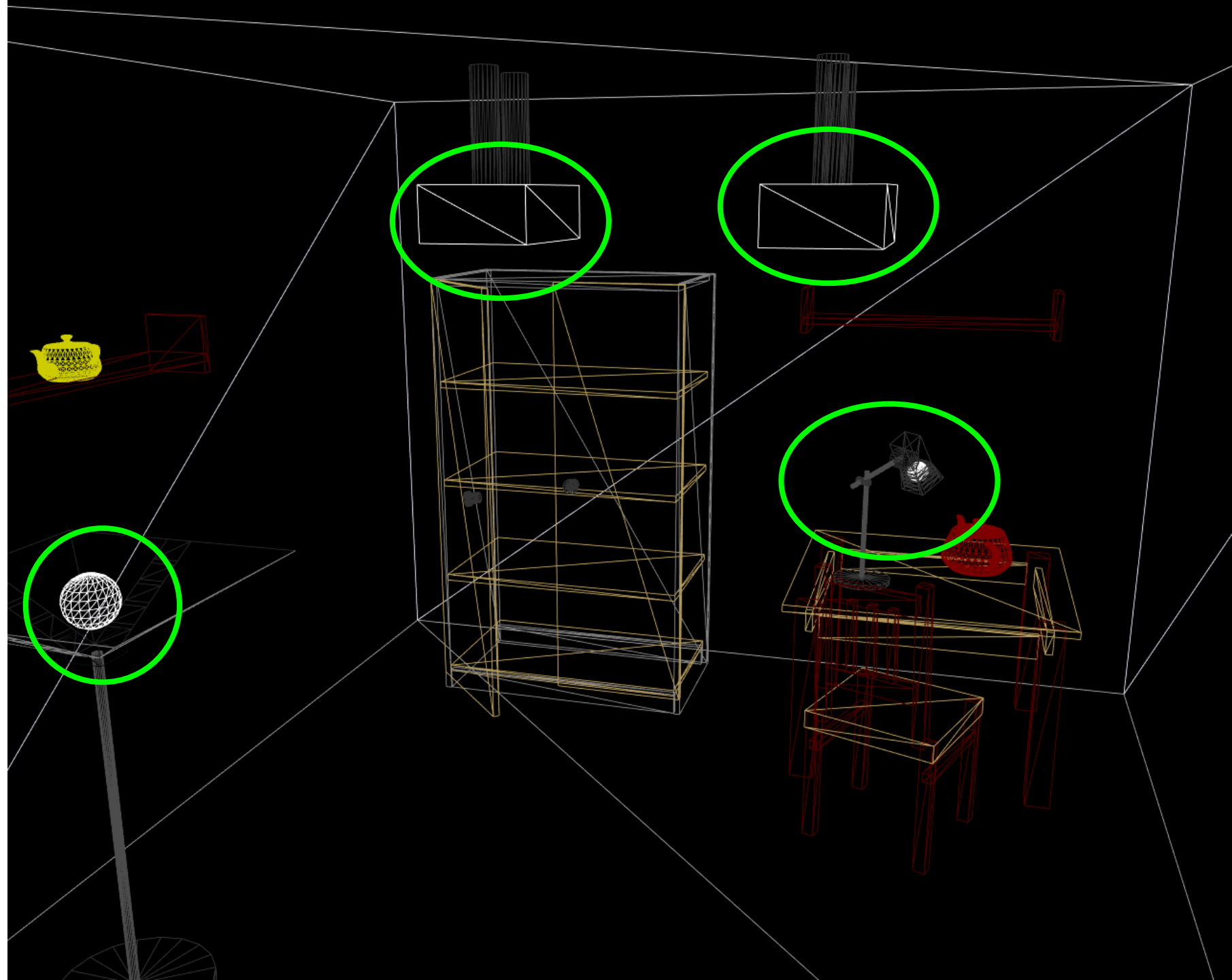


Με διανομή του 95% του φωτός



Παράδειγμα

- Στην σκηνή που ακολουθεί έχουμε 4 φωτεινές πηγές
- Images from:
<http://dudka.cz/rrv/gallery>



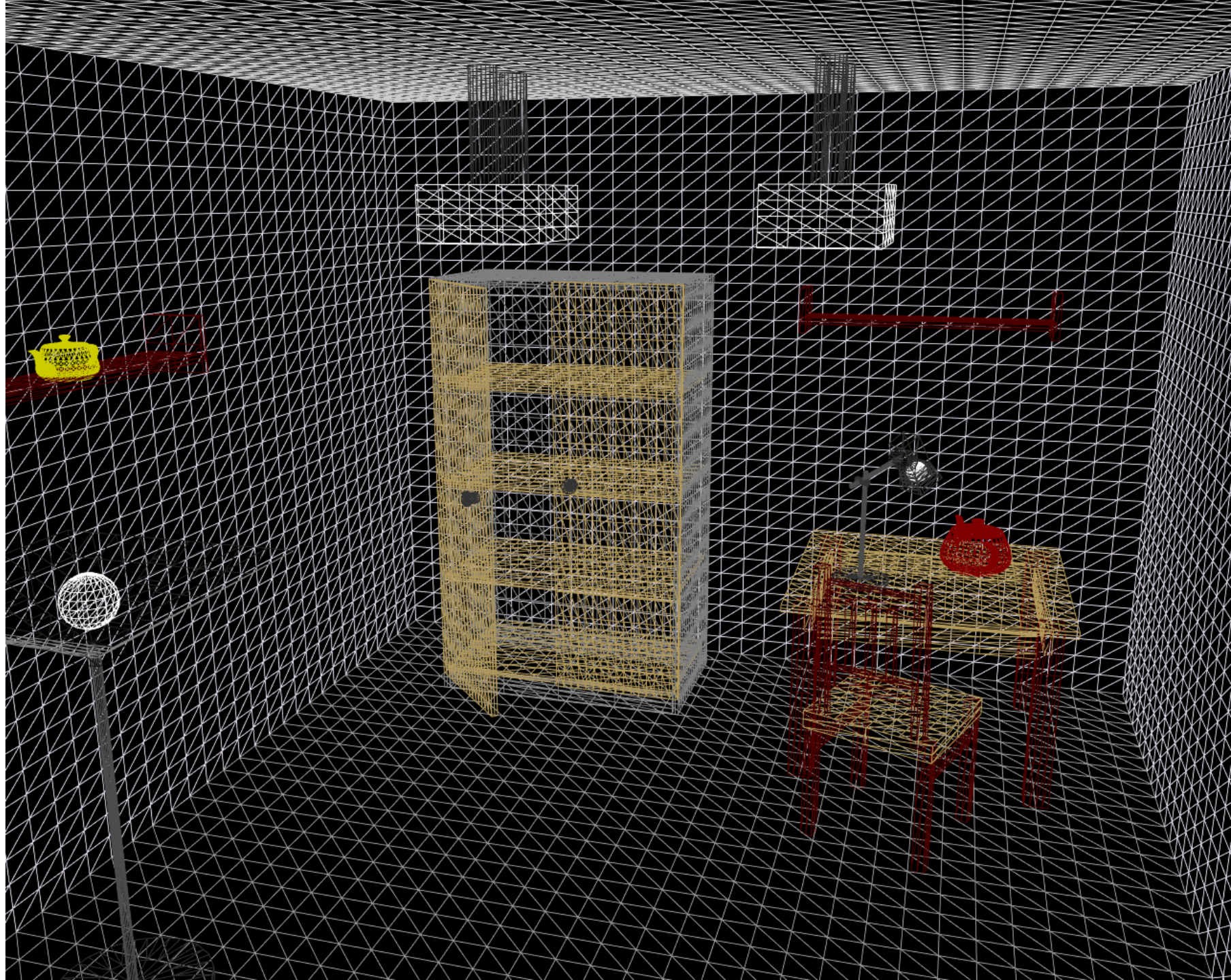
Παράδειγμα

- Plain View



Παράδειγμα

- Patches









Παράδειγμα

- Final Solution (No Interpolation)



Παράδειγμα

- Final Solution (No Interpolation + Filtered)



Παράδειγμα

- Final Solution



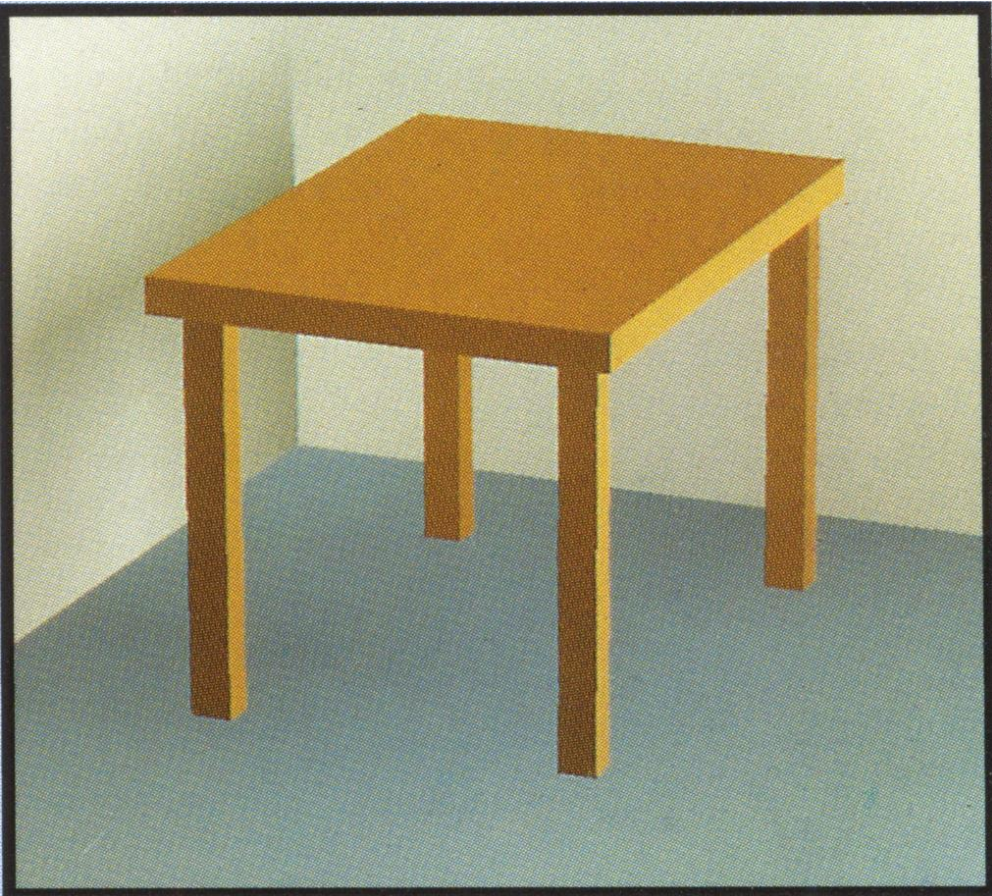
Παράδειγμα

- Video



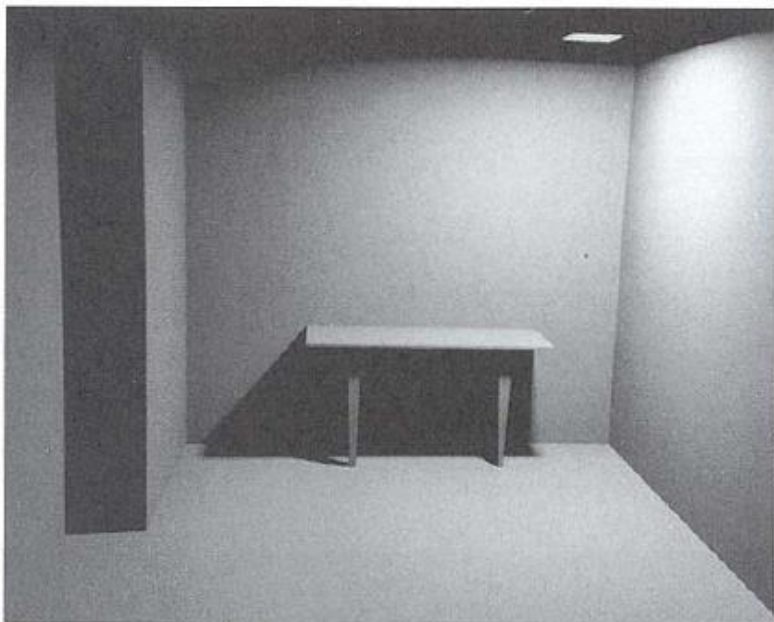
Meshing

Τι πάει λάθος με αυτή την εικόνα?

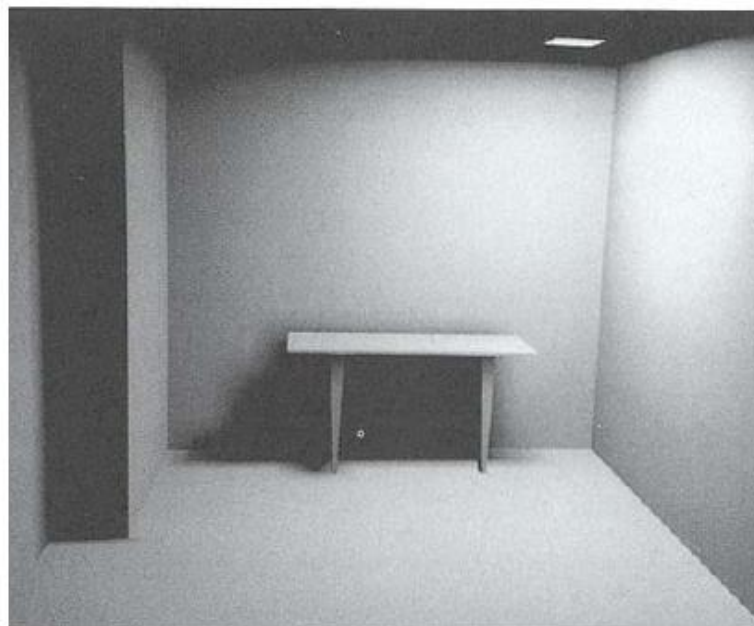


- Η ποιότητα της εικόνας είναι συνάρτηση του μεγέθους των μικροεπιφανειών.
- Οι μικροεπιφάνειες πρέπει να υποδιαιρούνται προσαρμοστικά (*adaptively subdivided*) κοντά στα όρια των σκιών και σε άλλες περιοχές με ψηλό radiosity gradient.
- Υπολογισμός λύσης με ομοιόμορφο αρχικά mesh, και εκλέπτυνση μετά του mesh σε περιοχές που ξεπερνούν κάποιο ανεκτικό βαθμό λάθους (error tolerance).

Accuracy



Reference Solution



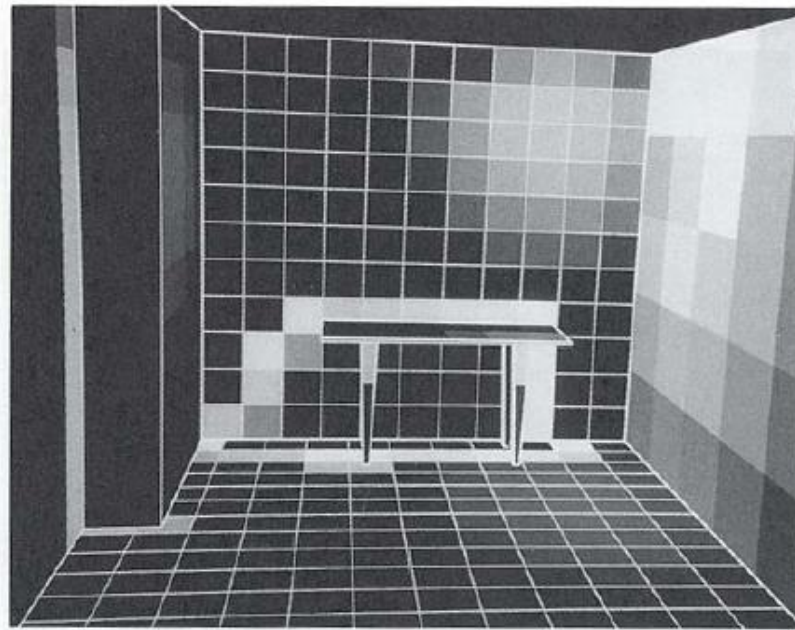
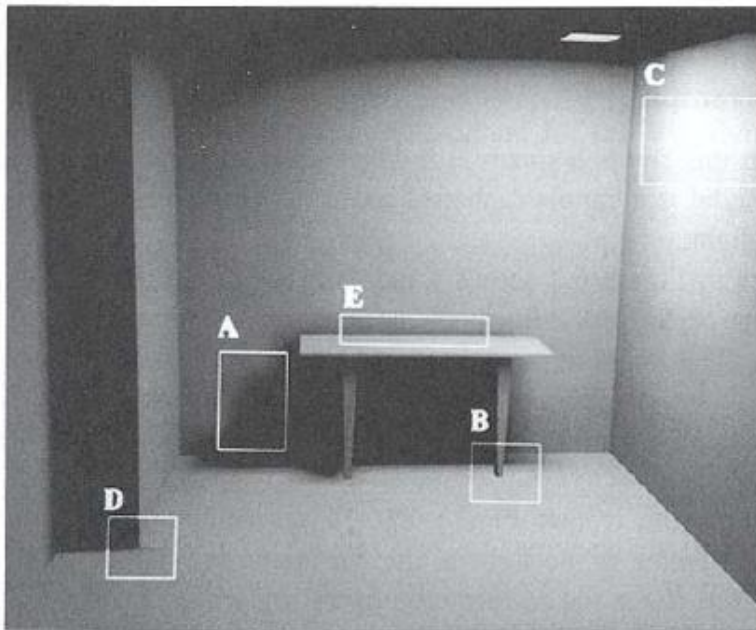
Uniform Mesh

Table in room sequence from Cohen and Wallace

CS348B Lecture 17

Pat Hanrahan, Spring 2002

Artifacts



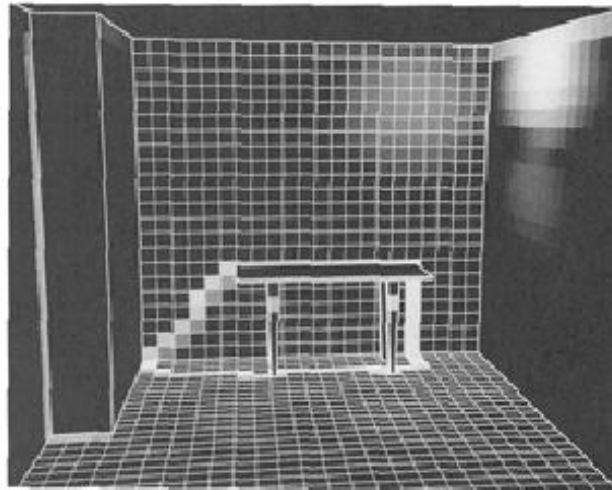
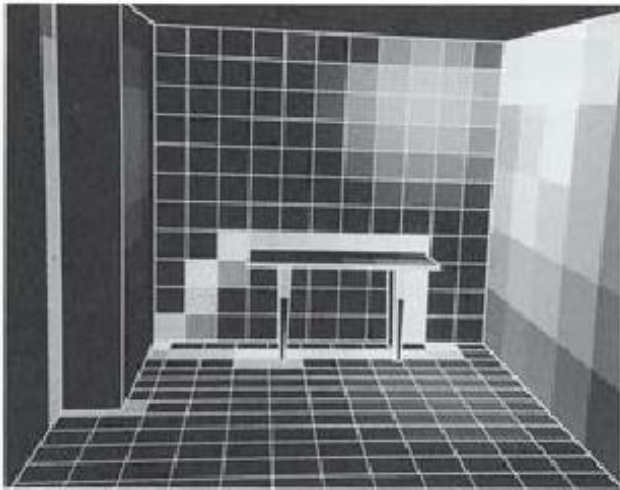
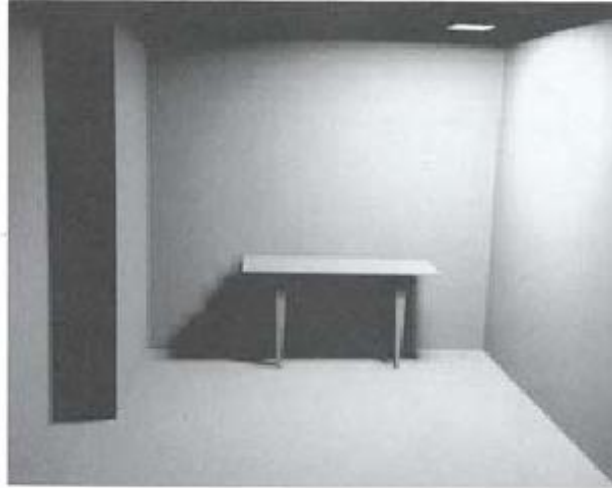
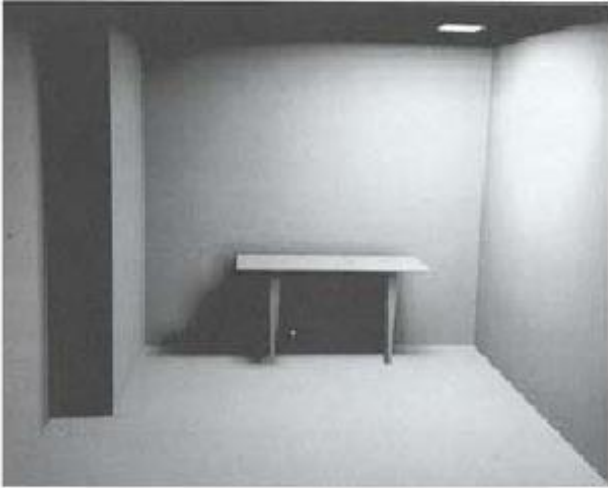
Error Image

- A. Blocky shadows**
- B. Missing features**
- C. Mach bands**
- D. Inappropriate shading discontinuities**
- E. Unresolved discontinuities**

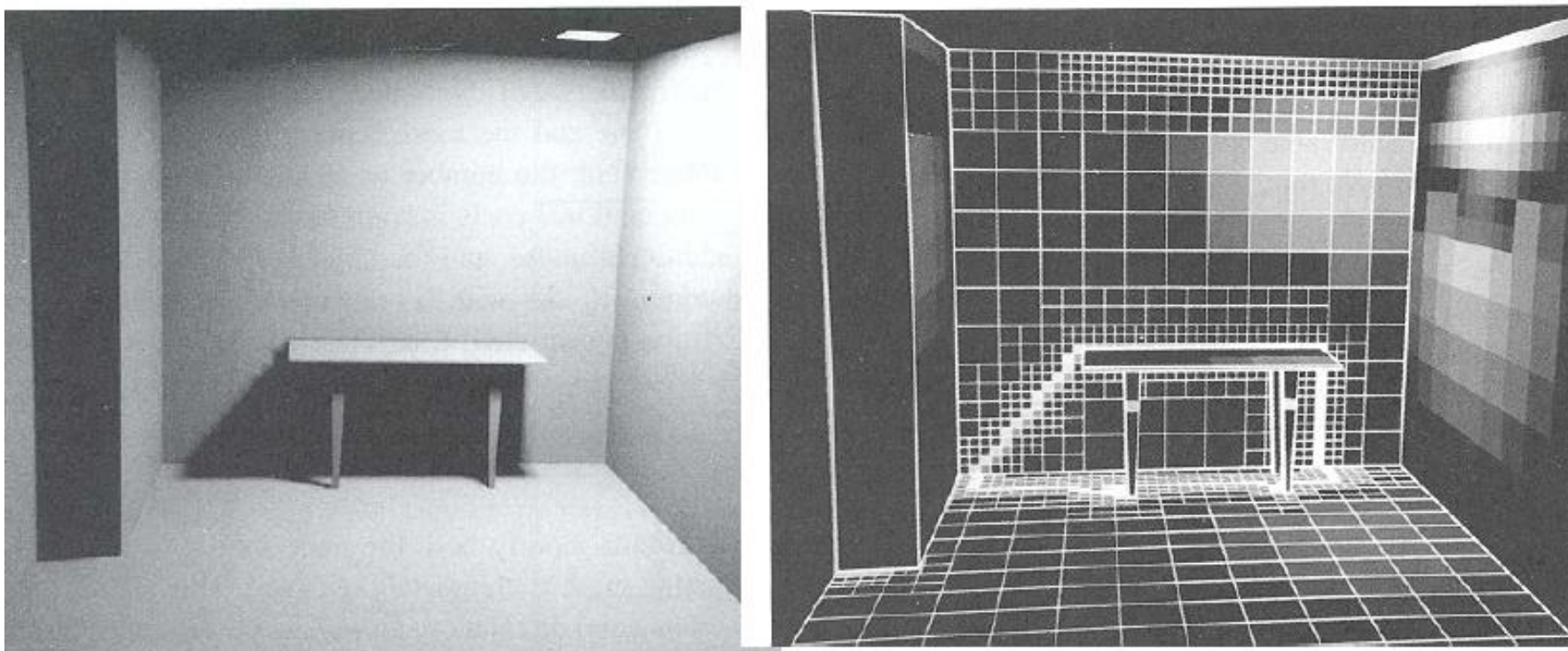
CS348B Lecture 17

Pat Hanrahan, Spring 2002

Increasing Resolution

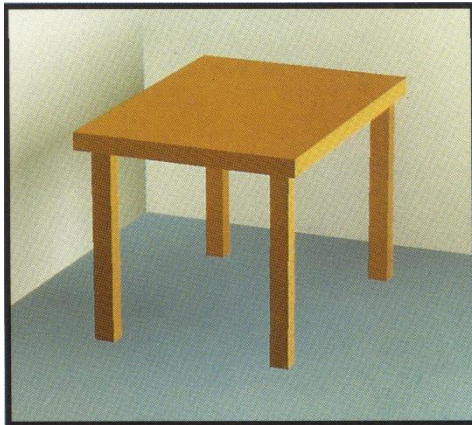
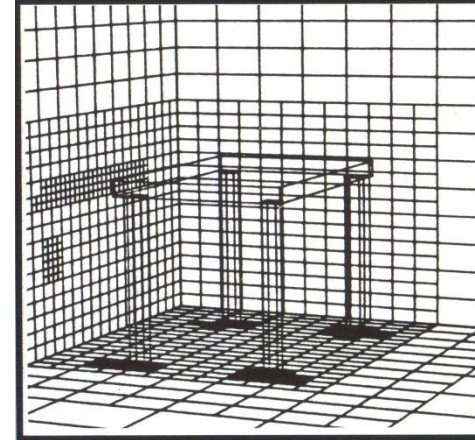
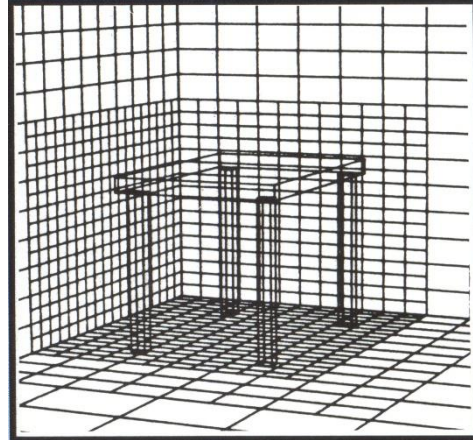
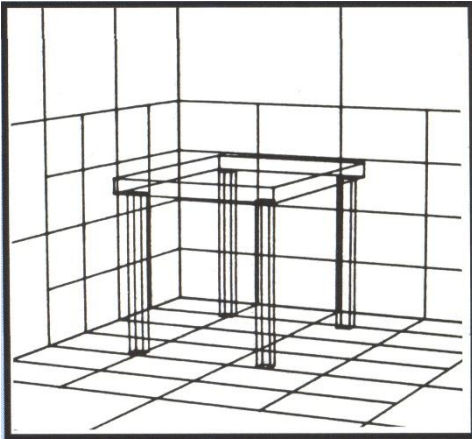


Adaptive Meshing

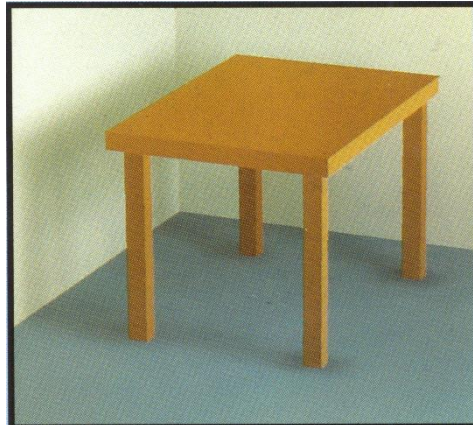


Προσαρμοστικός διαμοιρασμός Μικροεπιφανειών

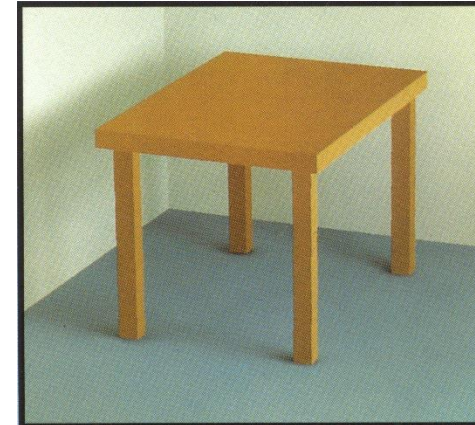
Adaptive Subdivision of Patches



Coarse patch solution
(145 patches)



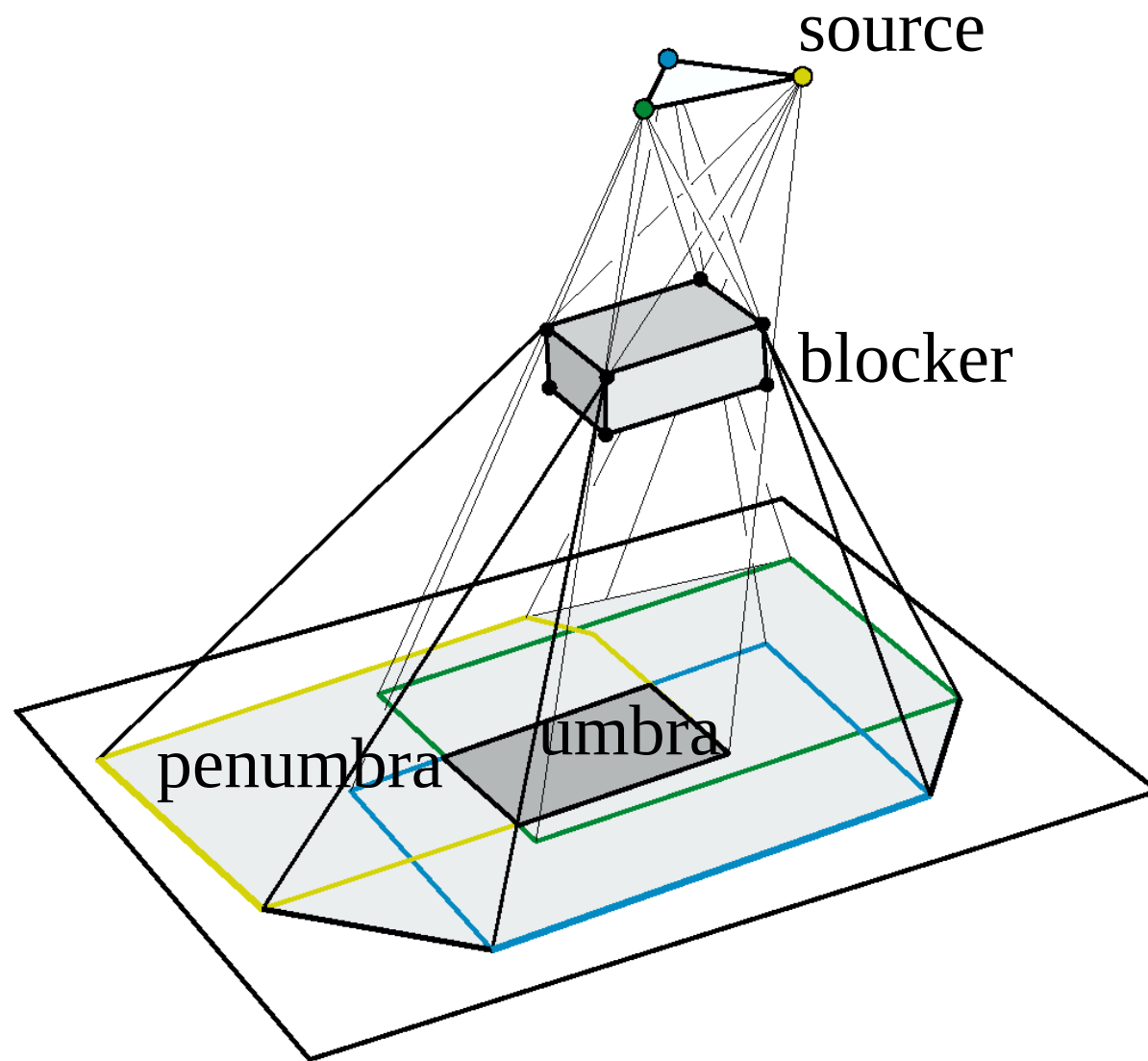
Improved solution
(1021 subpatches)



Adaptive subdivision
(1306 subpatches)

Discontinuity Meshing

- Όρια των umbra και penumbra
 - Σύλληψη (captures) καλών ορίων (boundaries) σκιών
 - Πολύπλοκος γεωμετρικός υπολογισμός
 - Το mesh γίνεται πολύπλοκο



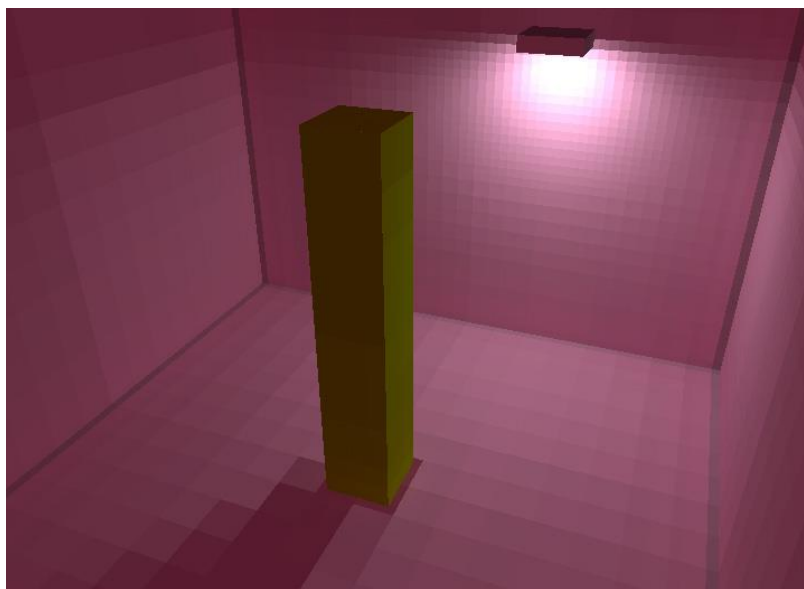
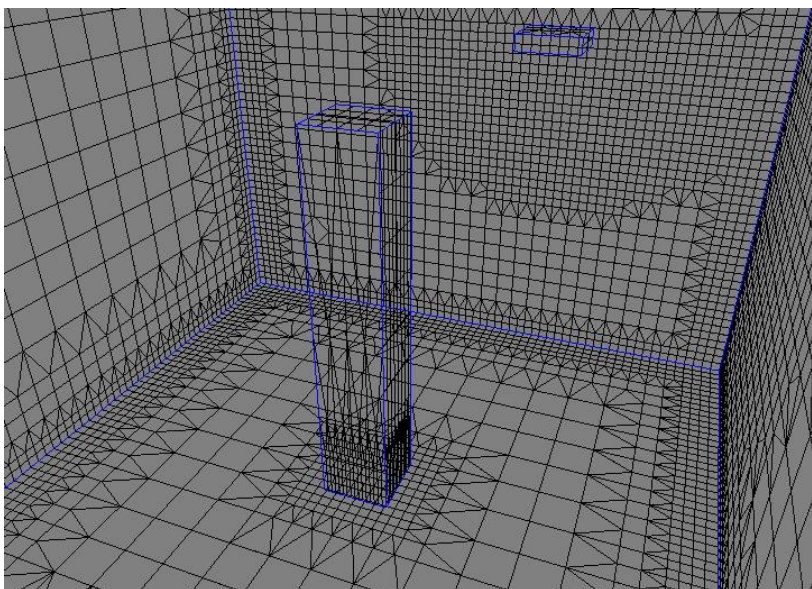
Discontinuity Meshing

- Discontinuity meshing is a way of achieving high numerical and visual accuracy when performing radiosity computations
- Instead of subdividing surfaces in a uniform way, the whole environment is taken into account, in order to construct certain types of virtual discontinuity surfaces.

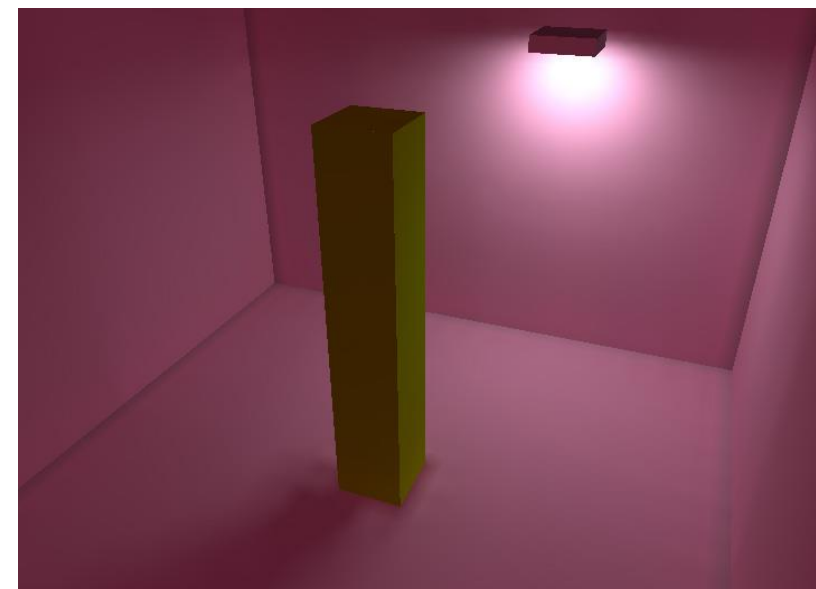
Discontinuity Meshing: *Example*

A box centered in the room and a rectangular light on one side of the room.

- Notice the higher subdivisions near the light and near the corners of the room.
- Notice the lower part of the box along with the part of the floor under the box where the subdivision is higher than elsewhere.
- Notice the presence of light leaks under the box which gives the impression of the box floating over the ground.



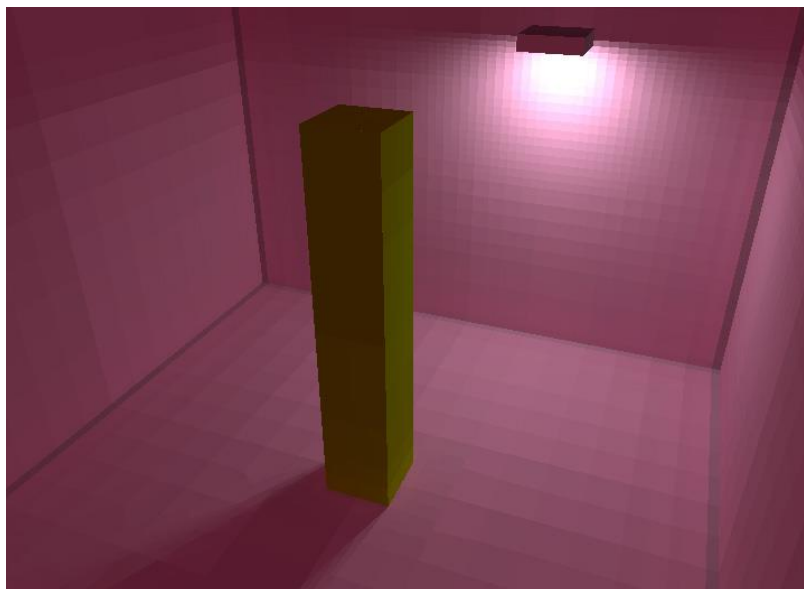
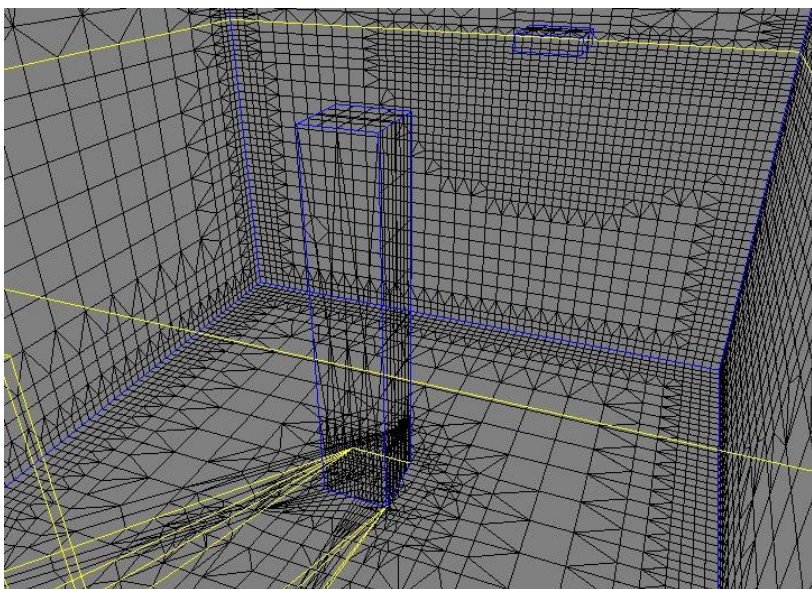
The flat rendering of the room



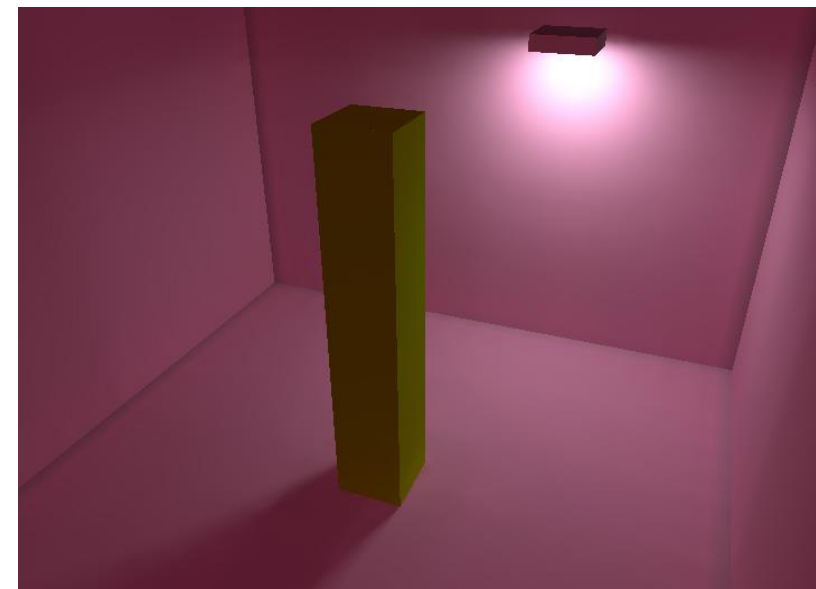
The radiosity has been smoothed

Discontinuity Meshing: *Example*

- The discontinuity segments are shown with yellow color over the subdivided input polygons.
- The "strongest" ones appear on the shadow of the box, near the box, and on the back wall.
- Notice how the subdivision changes from uniform subdivision to subdivision along the discontinuity yellow lines.
- The flat rendering is significantly improved. No more light leakage! The box seems to stand correctly on the ground.

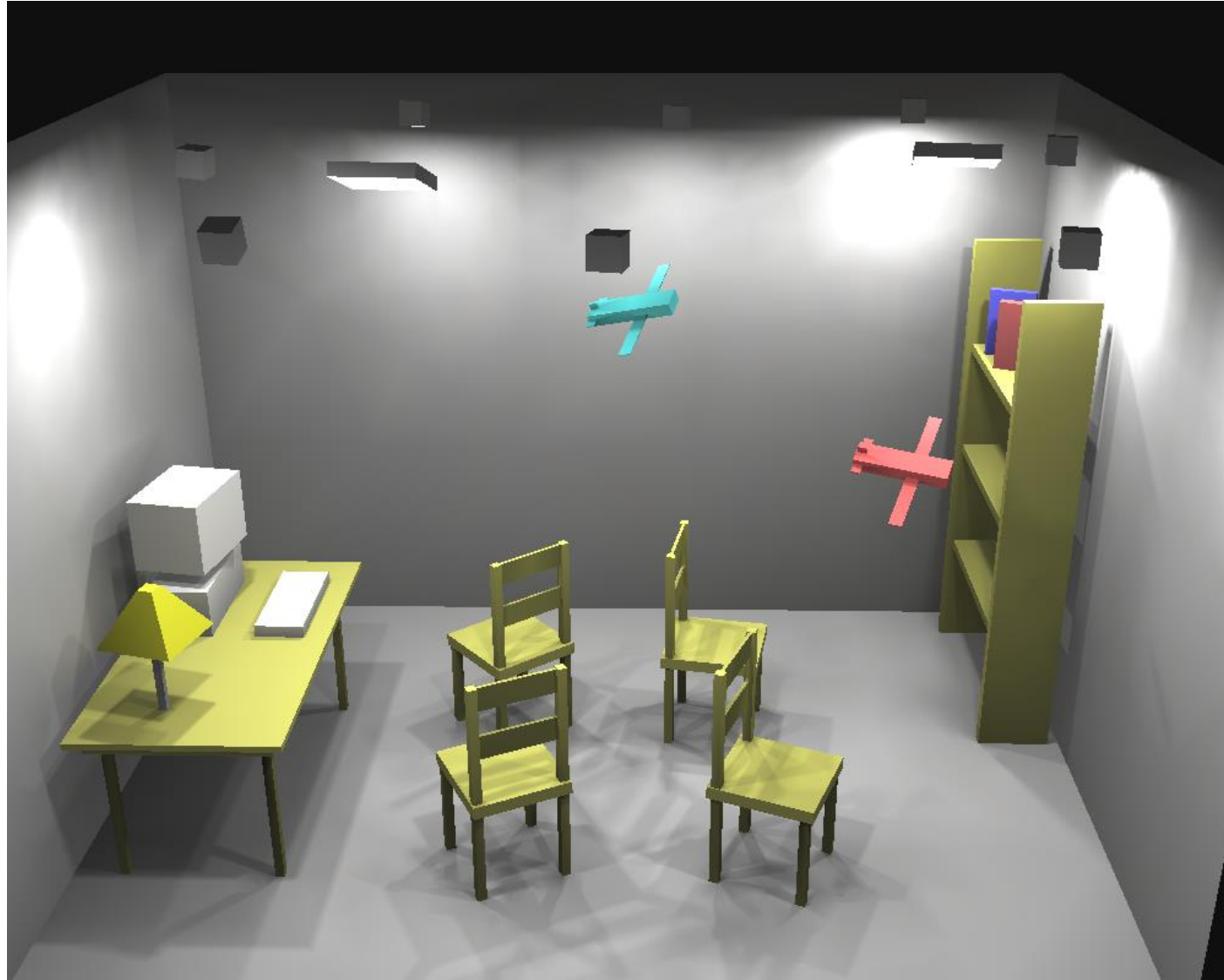


The flat rendering of the room

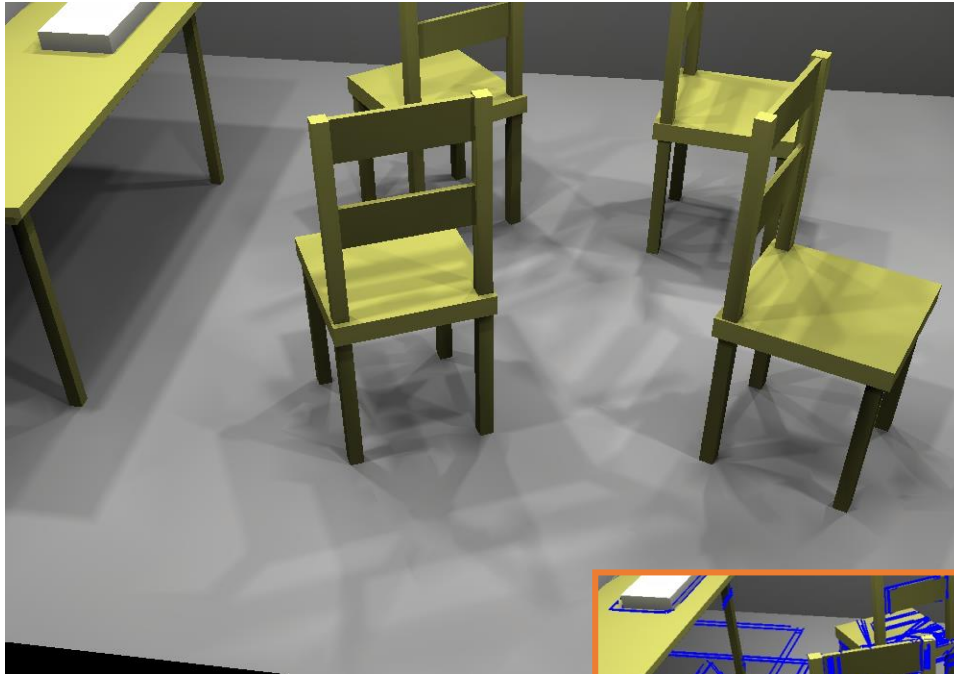


The radiosity has been smoothed

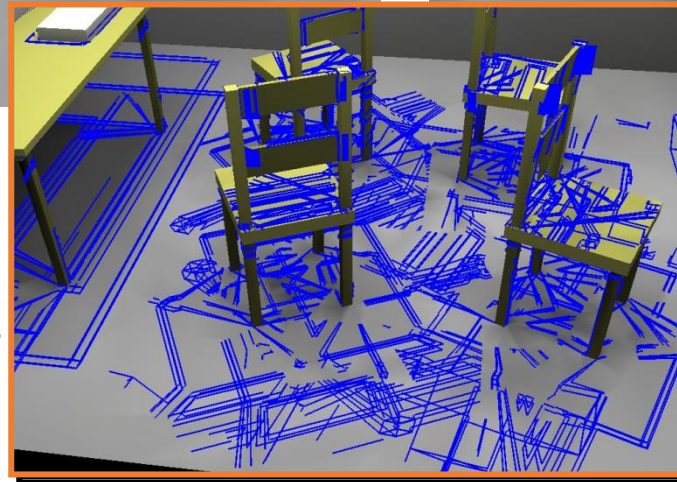
Μη - συνεχές meshing



Μη - συνεχές meshing: Σύγκριση



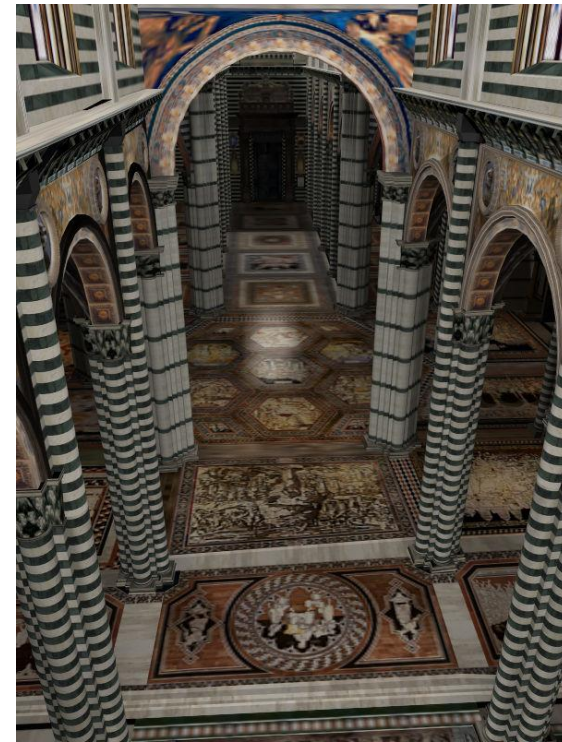
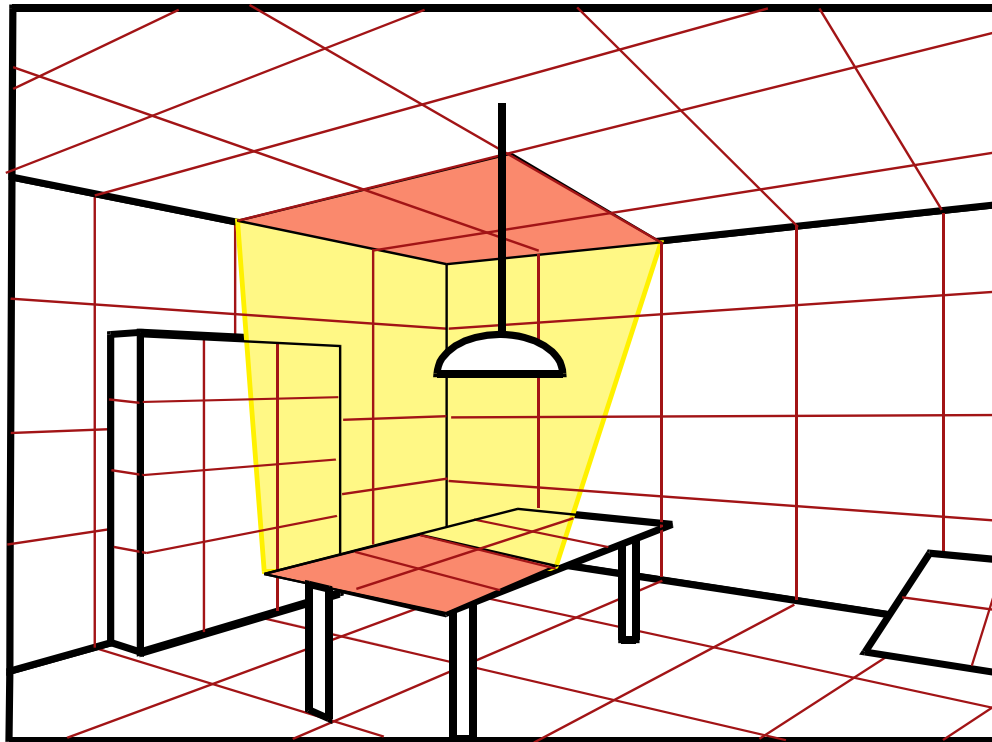
With visibility skeleton
& discontinuity meshing
10 minutes 23 seconds



1 hour 57 minutes

Ιεραρχική προσέγγιση

- Ομαδοποίηση στοιχείων (group elements) όταν η ανταλλαγή φωτισμού δεν είναι σημαντική.
 - Breaks the quadratic complexity
 - Μη τετριμμένος έλεγχος (control non trivial), κόστος σε μνήμη

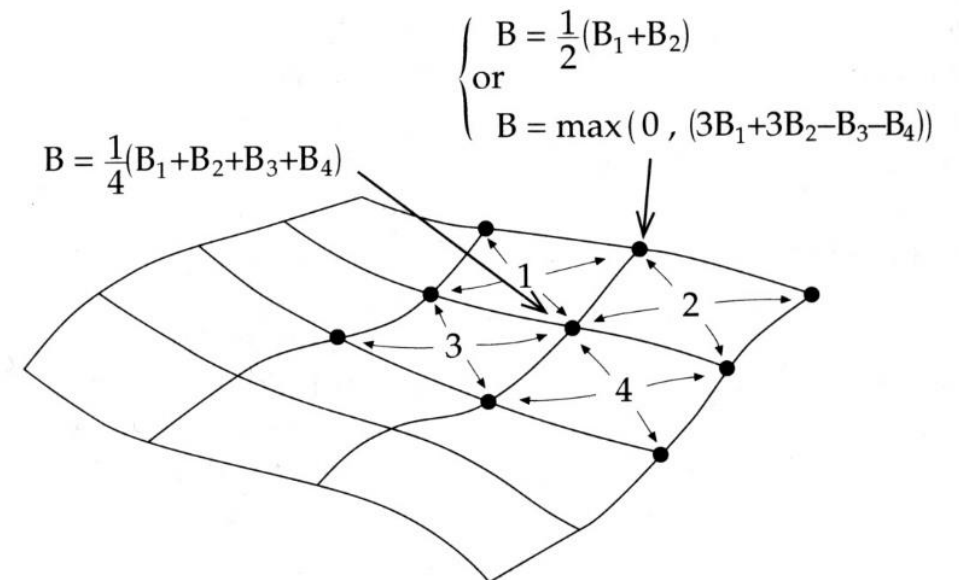


Απόδοση - Rendering

- Το Radiosity είναι λύση ανεξάρτητη της οθόνης (view-independent).
- Could flat shade each patch with color depending on radiosity at the center (κακή λύση!)
- Αντί αυτού κρατεί τα radiosities στις κορυφές των πολυγώνων
 - χρήση Gouraud smooth shading (interpolation)
 - Διαθέσιμο πολύ φθηνά σε υλικό γραφικών (graphics hardware).
- Ή ακόμα, αποθήκευση του radiosity σαν υφή (texture) σε κάθε πολύγωνο: πολύ γρήγορο να σχεδιαστεί αλλά πολύ βαρύ για τη μνήμη υφής (texture memory)

Υπολογίζοντας τα Radiosities στις κορυφές

- B_i τιμές radiosity είναι σταθερές σε όλη την έκταση της μικροεπιφάνειας (over the extent of a patch).
- Πώς αντιστοιχίζονται στις κορυφές radiosities (intensities) που χρειάζονται από τον renderer?
 - Μέσος όρος των radiosities των μικροεπιφανειών που συνεισφέρουν στην κορυφή
 - Οι τιμές στις κορυφές των ακμών σε μια επιφάνεια υπολογίζονται με extrapolation (Vertices on the edge of a surface are assigned values extrapolation)



The Cornell Box

- Προσεκτικό calibration και μέτρηση (measurement) επιτρέπουν τη σύγκριση μεταξύ φυσικής/πραγματικής σκηνής και προσομοίωσης



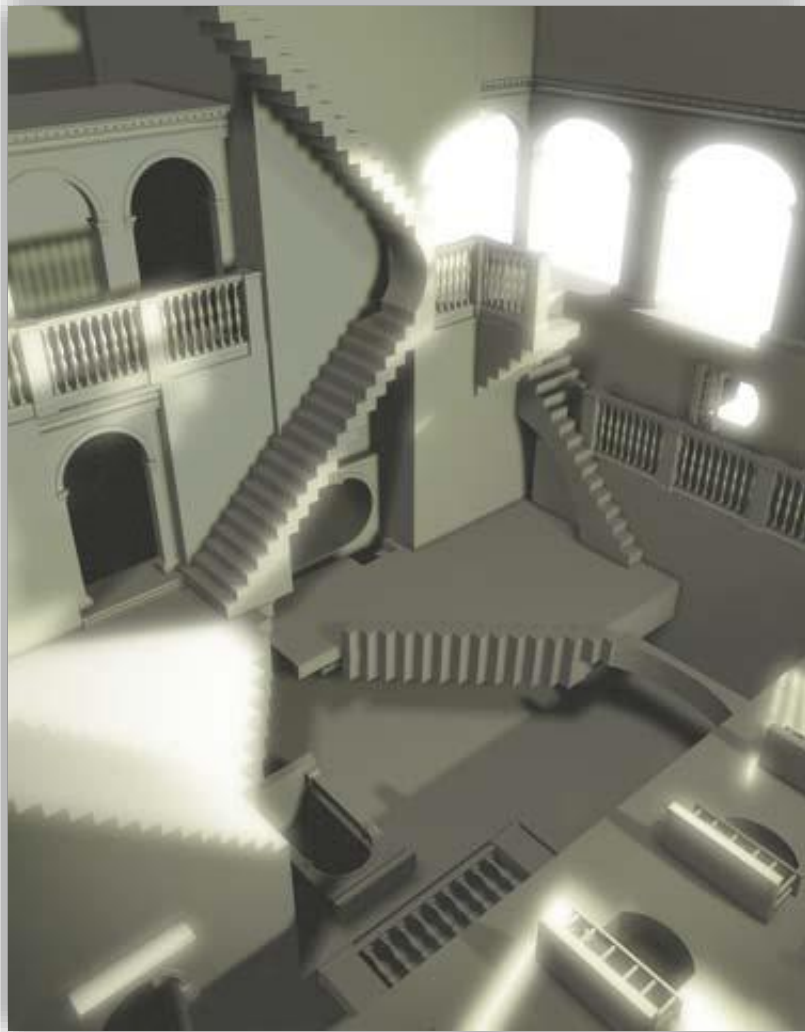
photograph



simulation

Light Measurement Laboratory
Cornell University, Program for Computer Graphics

Παραδείγματα





Παραδείγματα



Παραδείγματα



Rendered using the Lightscape Visualization System.
Courtesy of and copyright (c) 1996 Design Visualization Partners (Santa Monica, CA).

Lightscape <http://www.lightscape.com>

Παραδείγματα



Lightscape <http://www.lightscape.com>

Παραδείγματα



Παραδείγματα



Παραδείγματα



Παραδείγματα



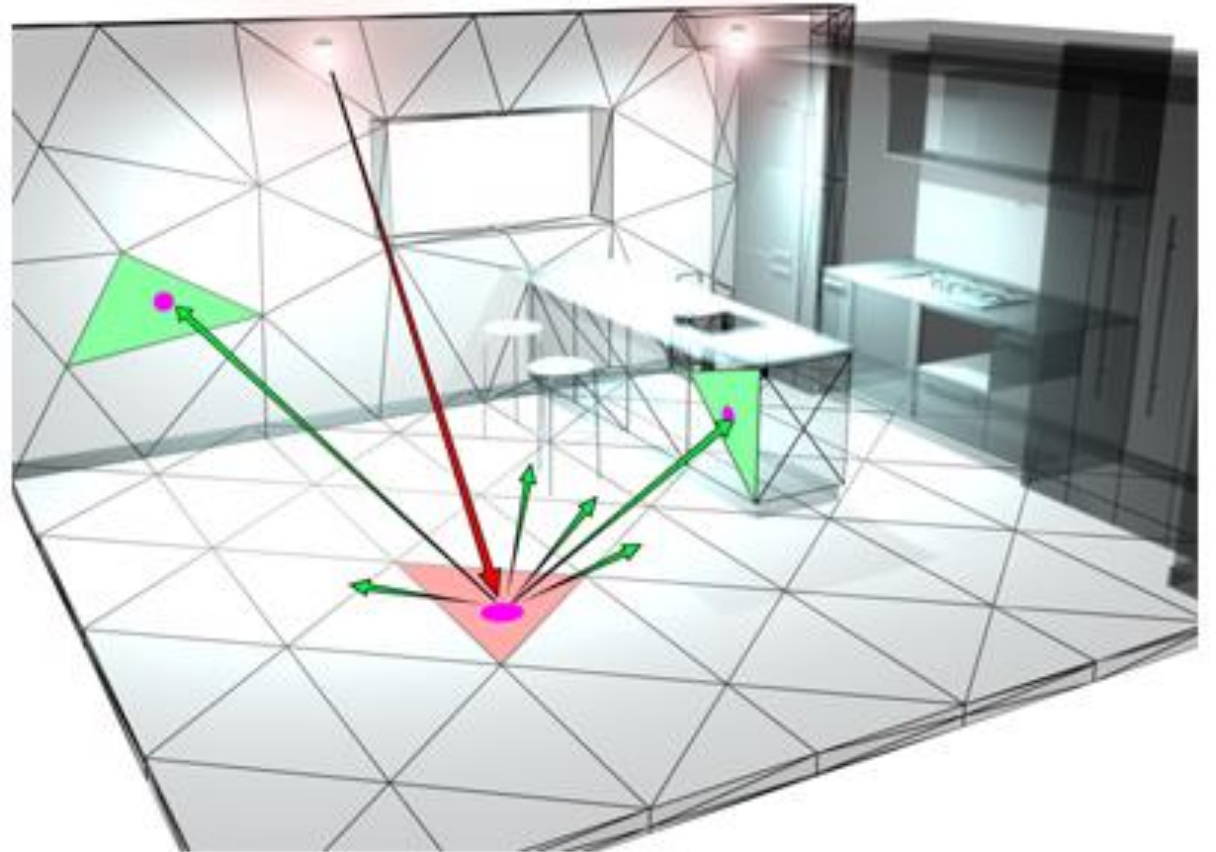
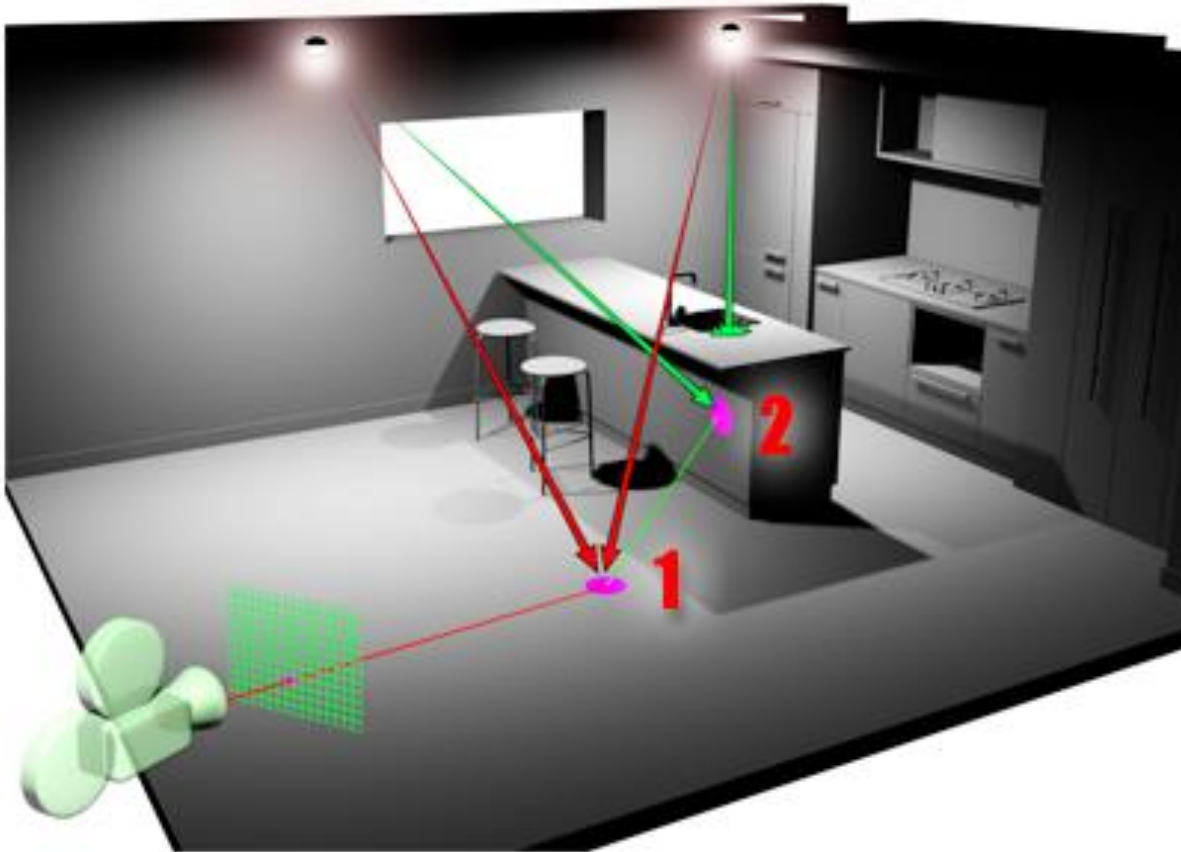
Παραδείγματα



Raytracing vs Radiosity

- Στο RT στέλνονται ακτίνες μέσα από κάθε εικονοστοιχείο (pixel) της κάθε εικόνας και ακολουθούνται καθώς ανακλούνται από τα αντικείμενα της σκηνής
 - Περισσότερο για specular επιφάνειες
 - Εξαρτάται από την θέση της κάμερας
- Radiosity είναι βασισμένο στην ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ επιφανειών των αντικειμένων
 - Diffuse επιφάνειες
 - Ανεξάρτητο από την θέση της κάμερας
 - Πεπερασμένα στοιχεία (Finite elements) – διακριτή αναπαράσταση σκηνής (mesh)

Raytracing vs Radiosity



<https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/3DSMax-Archive/files/GUID-C5A3C77B-794B-4444-9783-7F2EA11C16BD-htm.html>

Raytracing vs Radiosity

Lighting Algorithm	Advantages	Disadvantages
Ray-Tracing	Accurately renders direct illumination, shadows, specular reflections, and transparency effects. Memory Efficient	Computationally expensive. The time required to produce an image is greatly affected by the number of light sources. Process must be repeated for each view (view dependent). Doesn't account for diffuse interreflections.
Radiosity	Calculates diffuse interreflections between surfaces. Provides view independent solutions for fast display of arbitrary views. Offers immediate visual results.	3D mesh requires more memory than the original surfaces. Surface sampling algorithm is more susceptible to imaging artifacts than ray-tracing. Doesn't account for specular reflections or transparency effects.

Summary

- I have explained two important techniques by now for producing realistic images: **ray tracing and radiosity**.
 - The ray tracing method is good for simulating specular reflections but not good for simulating inter-reflections of diffuse surfaces.
 - On the other hand, radiosity is good for simulating diffuse reflections but cannot handle the specular reflections well. They have to be arbitrarily combined to produce realistic scenes.

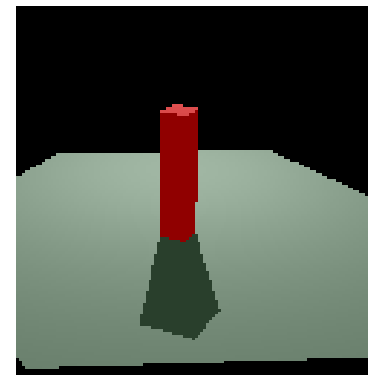
Distributed Ray Tracing

- **Distributed Ray Tracing [Cook et al '84]**

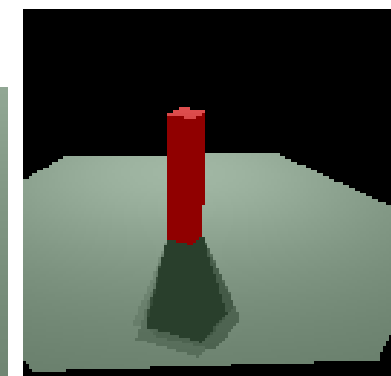
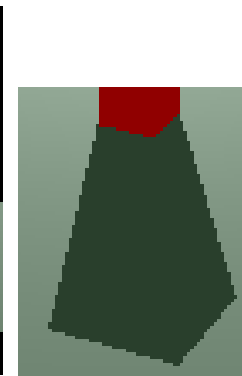
- Why ray tracing looks fake?

- Jagged edges
- Hard shadows
- Everything in focus
- Objects completely still
- Surfaces perfectly shiny
- Glass perfectly clear

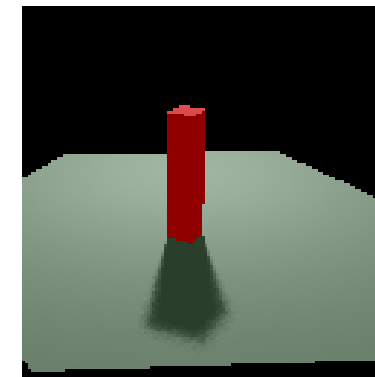
- Pixel: antialiasing
- Light sources: Soft shadows
- Lens: Depth of field
- Time: Motion blur
- BRDF: glossy reflection



Sharp shadows



Regular samples



50 Samples pp

