





# Εισαγωγή

- Το **χρώμα** πάντοτε έλκυε την ανθρωπότητα, αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για χιλιετίες
- Το αποτέλεσμα των αλγορίθμων των γραφικών είναι μια **εικόνα** (ασπρόμαυρη ή έγχρωμη)
- Η εικόνα εμφανίζεται σε κάποια **συσκευή εξόδου** (οθόνη-εκτυπωτής)
- Η **μελέτη** των χρωμάτων, καθώς και η **αντίληψη** τους από τον άνθρωπο είναι σημαντικός κλάδος σε αρκετές επιστήμες, όπως φυσική, φυσιολογία, τέχνες
- Φυσικά αποτελεί σημαντικό κλάδο και των **γραφικών** και της **οπτικοποίησης**
- Η **προγραμματιστική** χρήση του χρώματος ή των αποχρώσεων του γκρι απαιτεί θεμελιώδεις **γνώσεις** για το χρώμα και την ψηφιακή του αναπαράσταση



## Αποχρώσεις του γκρι (grayscale)

- Αν αφαιρεθούν τα χρωματικά χαρακτηριστικά του φωτός προκύπτει το **ασπρόμαυρο** ή **αχρωματικό** φως
- Το μόνο χαρακτηριστικό του είναι η **φωτεινότητα** (ένταση)
- Η φωτεινότητα παίρνει τιμές **ανάμεσα** σε 0 (μαύρο) και 1 (άσπρο)
- Οι υπόλοιπες τιμές ορίζουν αποχρώσεις του **γκρι**
- **Διαδικές** εικόνες (απλούστερη περίπτωση): παίρνουν **μόνο** τιμές 0 και 1



# Ασπρόμαυρο Φως

- Έστω σε μια **ασπρόμαυρη** συσκευή εξόδου διατίθενται  $d$  bits για την αναπαράσταση της φωτεινότητας για 1 pixel
- Υπάρχουν (επιτρέπονται) έτσι  $n = 2^d$  **διαφορετικές** τιμές φωτεινότητας
- Χρειάζεται να επιλεγούν **όλες**; Δηλαδή, χρειάζεται να παραστήσουμε **όλα** τα επίπεδα έντασης;
- Θα περίμενε κανείς ότι μια **γραμμική** κλίμακα εντάσεων **ανάμεσα** στην ελάχιστη και τη μέγιστη τιμή θα ήταν **καλή** επιλογή
- ... Όχι!



# Λόγοι Φωτεινότητας

- Από τη **φυσιολογία** γνωρίζουμε ότι το ανθρώπινο μάτι **δεν** συμπεριφέρεται με αυτόν τον (βολικό) τρόπο
- Αντίθετα, αντιλαμβάνεται **λόγους** φωτεινότητας και όχι **απόλυτες τιμές**
- Τα **ζεύγη** φωτεινότητας (0.1, 0.2) και (0.3, 0.6) Θεωρείται ότι έχουν την ίδια **διαφορά**
- Αυτό μπορεί να αποδειχθεί και “**πειραματικά**,” παρατηρώντας τρεις λάμπες π.χ. 5, 10 και 20W
- Η διαφορά μεταξύ της πρώτης και της δεύτερης **μοιάζει πολύ μεγαλύτερη** από αυτήν μεταξύ της δεύτερης και της τρίτης
- Οι φωτεινότητες που θα επιλεχθούν πρέπει να έχουν **λογαριθμική** κατανομή



# Λόγοι Φωτεινότητας

- Έστω  $\Phi_0$  η **μικρότερη** δυνατή φωτεινότητα που μπορεί να επιτευχθεί στο μέσο εξόδου
- Μια οθόνη **δεν** μπορεί να απεικονίσει το απόλυτο μάυρο (αλλά μπορεί να το **προσεγγίσει**)
- Για μια **τυπική** οθόνη,  $1/200 < \Phi_0 < 1/40$
- Έτσι υπολογίζεται και το δυναμικό εύρος (εδώ θα ήταν  $1/200$ )
- Αν  $\lambda$  ο λόγος **διαδοχικών** τιμών φωτεινότητας:
  - $\Phi_1 = \lambda \cdot \Phi_0$
  - $\Phi_2 = \lambda \cdot \Phi_1 = \lambda^2 \cdot \Phi_0$
  - ...
  - $\Phi_{n-1} = \lambda^{n-1} \cdot \Phi_0 = 1$
- Γνωρίζοντας το  $\Phi_0$ , ο λόγος  $\lambda$  **υπολογίζεται ως**  

$$\lambda = (1/\Phi_0)^{1/(n-1)}$$



## Λόγοι Φωτεινότητας

- Πόσες τιμές φωτεινότητας είναι όμως **αρκετές**;
- Ας το θέσουμε **διαφορετικά**: πόσες τιμές φωτεινότητας  $n$  χρειάζονται ώστε το ανθρώπινο μάτι να μην μπορεί να **διακρίνει** τη διαφορά ανάμεσα σε μια **συνεχή** ασπρόμαυρη εικόνα (π.χ. φωτογραφικό φιλμ) και της ψηφιακής της **αναπαράστασης** με  $n$  επίπεδα φωτεινότητας;

Έχει βρεθεί **πειραματικά** ότι πρέπει  $\lambda \leq 1.01$ , ώστε το μάτι να μη μπορεί να διακρίνει **διαδοχικές** τιμές φωτεινότητας

- Ο **ελάχιστος** αριθμός τιμών φωτεινότητας υπολογίζεται ως  $n = \log_{1.01}(1/\Phi_0) + 1$
- **Τυπικά**,  $n \approx 500$





Ασπρόμαυρο φως (αποχρώσεις του γκρι)

# Λόγοι Φωτεινότητας

**Αναπαράσταση** εικόνας με  $n = 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256$  επίπεδα φωτεινότητας



## Εμφάνιση Ενδιάμεσων Τιμών Φωτεινότητας

- Ορισμένες συσκευές εξόδου διαθέτουν γενικά **λιγότερες** τιμές φωτεινότητας από τις επιθυμητές
- **Θυσιάζοντας** την ανάλυση, το πλήθος των τιμών της φωτεινότητας μπορεί να **αυξηθεί**
- Χρησιμοποιείται η τεχνική της αυτοτυπίας (**halftoning**)
- Το halftoning έχει τις ρίζες του στην **τυπογραφία**
- Στις εφημερίδες, οι ασπρόμαυρες φωτογραφίες φαίνονται να έχουν **διάφορες** αποχρώσεις του γκρι
- Στην πραγματικότητα, αν τις παρατηρήσουμε από **κοντινή** απόσταση, αποτελούνται αποκλειστικά από **μαύρες** κουκκίδες!
- Η **πυκνότητα** των κουκκίδων καθορίζει το πόσο **“μαύρη”** είναι μια περιοχή





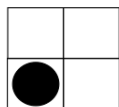


# Halftoning

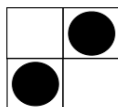
Παράδειγμα: 5 τιμές φωτεινότητας από περιοχή  $2 \times 2$



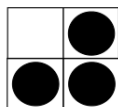
0



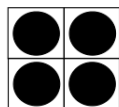
1



2



3



4

- Η αντιστοίχιση περιγράφεται από τον **πίνακα**  $\begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$
- Για την **αναπαράσταση** μιας τιμής φωτεινότητας  $k$  (με  $0 \leq k \leq 4$ ), “ανάβουν” όλα τα pixels της περιοχής  $2 \times 2$  για τα οποία το αντίστοιχο στοιχείο του πίνακα έχει τιμή  $< k$
- Π.χ., για την απόχρωση 2, ανάβουν το **κάτω αριστερό** και το **πάνω δεξιό** στοιχείο



# Halftoning

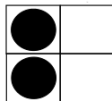
- Όπως είπαμε, με την τεχνική halftoning αυξάνεται το **πλήθος** των τιμών φωτεινότητας, αλλά σε βάρος της **ανάλυσης** της συσκευής εξόδου
  - π.χ. για να **αυξηθούν** οι τιμές της **φωτεινότητας** από 2 σε 5, η οριζόντια και η κάθετη **ανάλυση μειώθηκαν** κατά  $1/2$
- Υπάρχουν φυσικά και **όρια** σε αυτό, τα οποία τίθενται από παράγοντες όπως:
  - η **ανάλυση** που μπορεί να διακρίνει το μάτι
  - η **απόσταση** παρατήρησης



# Halftoning

**Προσοχή** χρειάζεται κατά την επιλογή των pixels που “ανάβουν” για κάθε τιμή φωτεινότητας!

- Π.χ., “κακή” επιλογή για τη φωτεινότητα 2



- Σε περιοχές εικόνας με σταθερή φωτεινότητα, ίση με 2, το μάτι διακρίνει **κάθετες** γραμμές
- Επίσης, η ακολουθία θα πρέπει να έχει “**αυξητική**” μορφή: οι θέσεις των εικονοστοιχείων που “ανάβουν” για την απόχρωση  $i$  θα πρέπει να είναι **υποσύνολο** αυτών που “ανάβουν” για την  $j$  ( $j > i$ )



# Halftoning

- Ένας πίνακας που ικανοποιεί τα **ποιοτικά** κριτήρια για περιοχές  $2 \times 2$  είναι ο  $D_2 = \begin{bmatrix} 3 & 1 \\ 0 & 2 \end{bmatrix}$

- **Μεγαλύτεροι** πίνακες μπορεί να κατασκευαστούν **αναδρομικά** ως εξής: ο

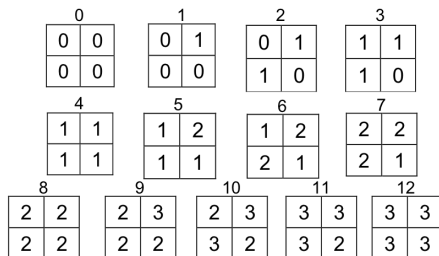
$$D_n = \begin{bmatrix} 4D_{n/2} & 4D_{n/2} + 2U_{n/2} \\ 4D_{n/2} + 3U_{n/2} & 4D_{n/2} + U_{n/2} \end{bmatrix}$$

- όπου π.χ.  $U_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$





# Halftoning



- Η τεχνική μπορεί να επεκταθεί και σε οθόνες που έχουν τη δυνατότητα εμφάνισης **πολλαπλών** τιμών φωτεινότητας ανά pixel
- Για παράδειγμα, με 4 φωτεινότητες ανά pixel (2 bits/pixel), είναι δυνατόν να **αυξηθούν** οι τιμές της φωτεινότητας σε 13 (**θυσιάζοντας** ανάλυση)



# Halftoning

- **Γενικά**, για περιοχές  $n \times n$  με  $k$  τιμές φωτεινότητας/pixel προκύπτουν  $(k - 1)n^2 + 1$  τιμές φωτεινότητας
- Η ανάλυση **μειώνεται** κατά  $n$  και στις δύο διαστάσεις
- Γενικά, η τεχνική halftoning υποθέτει ότι υπάρχει **πλεόνασμα χωρικής ανάλυσης**
- Με άλλα λόγια, η ανάλυση του μέσου **απεικόνισης** είναι σημαντικά **μεγαλύτερη** από την ανάλυση της **εικόνας**
- Έτσι, αυτή μπορεί να **“ανταλλαγεί”** για ανάλυση αποχρώσεων του γκρι



# Halftoning

- Υπάρχει η περίπτωση οι αναλύσεις εικόνας και οθόνης να είναι **ίσες**...
- ... και η εικόνα έχει **περισσότερες** τιμές φωτεινότητας από εκείνες που μπορεί να **εμφανίσει** η οθόνη
- Η **στρογγύλευση** θα ήταν η απλούστερη προσέγγιση

Τα αποτελέσματα δεν θα ήταν ικανοποιητικά!!!



# Halftoning

## απλή στρογγύλευση



# Halftoning

- Η ακόλουθη μέθοδος προτάθηκε από τους **Floyd** και **Steinberg**
- Η απώλεια πληροφορίας **ελέγχεται**, μεταφέροντας το σφάλμα που γίνεται κατά τη στρογγύλευση από ένα pixel, στα **γειτονικά** του
- Υπολογίζεται η **διαφορά**  $\varepsilon$  ανάμεσα στην τιμή της εικόνας  $E_{x,y}$  και της **πλησιέστερης** τιμής της οθόνης  $O_{x,y}$

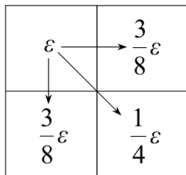
$$\varepsilon = E_{x,y} - O_{x,y}$$

- Το pixel παίρνει την τιμή  $O_{x,y}$  και το  $\varepsilon$  **διαδίδεται** στα γειτονικά pixels, τα οποία δεν έχει “επισκεφθεί” ακόμη



# Halftoning

## Διάδοση σφάλματος κατά Floyd-Steinberg



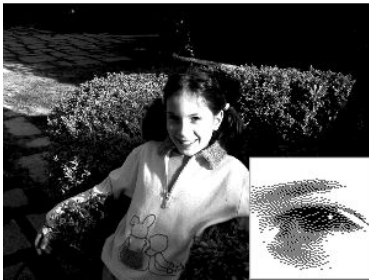
- Η σάρωση γίνεται **από πάνω προς τα κάτω** και **από αριστερά προς τα δεξιά**

- $E_{x+1,y} := E_{x+1,y} + 3\varepsilon/8$
- $E_{x,y-1} := E_{x,y-1} + 3\varepsilon/8$
- $E_{x+1,y-1} := E_{x+1,y-1} + 3\varepsilon/8$



# Halftoning

Το αποτέλεσμα με χρήση της τεχνικής Floyd-Steinberg είναι εμφανώς καλύτερο!!!



# Halftoning

## Σύγκριση απλής στρογγύλευσης και Floyd-Steinberg





# Ποια τεχνική να χρησιμοποιήσουμε;

	Αντιταύτιση	Αυτοτυπία	Floyd-Steinberg
<b>Προϋποθέσεις</b>	$I_G < D_G$	$I_S < D_S$	$I_S = D_S$ και $I_G > D_G$
<b>Αύξηση Ανάλυσης</b>	Χωρικής	Αποχρώσεων Γκρι	Αποχρώσεων Γκρι

Όπου  $D_G, I_G$  οι αναλύσεις **αποχρώσεων γκρι** του μέσου και της εικόνας,  $D_S, I_S$  οι **χωρικές αναλύσεις** του μέσου και της εικόνας, αντίστοιχα.







## Δυσκολίες στην εφαρμογή της διόρθωσης $\gamma$

- Στην πράξη υπάρχουν ορισμένες **δυσκολίες**
- Ορισμένα απεικονιστικά συστήματα **κάνουν** διόρθωση  $\gamma$ , κάποια κάνουν **μερική** διόρθωση  $\gamma$  και κάποια **καθόλου**
- Είναι συνεπώς απαραίτητο να **γνωρίζουμε** τι ακριβώς κάνει το σύστημά μας πριν εφαρμόσουμε διόρθωση  $\gamma$
- Επιπλέον, τα περισσότερα πρότυπα αποθήκευσης εικόνων **δεν** φυλάσσουν πληροφορίες για τη διόρθωση  $\gamma$
- Έτσι καθίσταται **δύσκολη** η εφαρμογή της τεχνικής μεταξύ **διαφορετικών** συστημάτων απεικόνισης
- Η διόρθωση  $\gamma$  εφαρμόζεται τόσο σε **έγχρωμες** όσο και σε εικόνες με αποχρώσεις του γκρι















# Χρώματα

- Τα χρώματα: **κόκκινο**, **πορτοκαλί**, **κίτρινο**, **πράσινο**, **μπλε**, **μωβ**, **βιολετί** και τα **ενδιάμεσα** τους, καλύπτουν την περιοχή του **εμφανούς** φωτός
- **Εμφανές** φως: μεταξύ  $4.3 \cdot 10^{14} \text{Hz}$  και  $7.5 \cdot 10^{14} \text{Hz}$
- Στο εμφανές φως, το ανθρώπινο μάτι μπορεί να **ξεχωρίσει** περίπου 400, 000 χρώματα
- Οι οθόνες **true color** αφιερώνουν 3 bytes για το χρώμα του κάθε pixel



# Χρώματα

- Η ηλεκτρομαγνητική **ενέργεια** που αντιστοιχεί στις συχνότητες του ορατού φωτός **δεν** έχει χρώμα
- Ο **συνδυασμός** ματιού-εγκεφάλου δίνει στον άνθρωπο τη δυνατότητα **αντιστοίχισης** αυτών σε χρώματα
- Το μάτι έχει **τριών** ειδών κύτταρα-δέκτες, ευαίσθητα σε **κόκκινο**, **μπλε** και **πράσινο**
- Μια φωτεινή ακτίνα **εισέρχεται** στο μάτι, **διαθλάται** από τον αμφιβληστροειδή χιτώνα διαφορετικά, **ανάλογα** με το μήκος κύματος



# Χρωματικά Μοντέλα

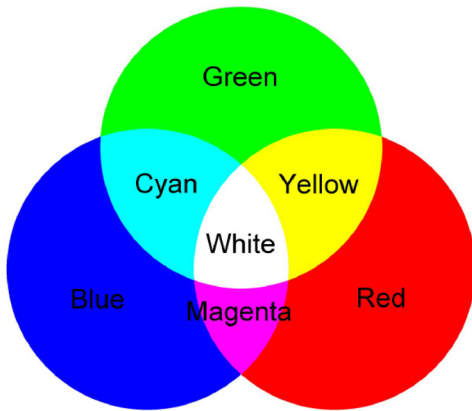
- Ένα **χρωματικό μοντέλο** προσπαθεί να συνθέσει όσο το δυνατόν περισσότερα χρώματα με το συνδυασμό κάποιων **βασικών** χρωμάτων
- Συνήθως χρησιμοποιούνται 3 βασικά χρώματα που διαθέτουν την ιδιότητα ότι **κανένας** συνδυασμός 2 εξ αυτών **δεν** μπορεί να σχηματίσει το τρίτο





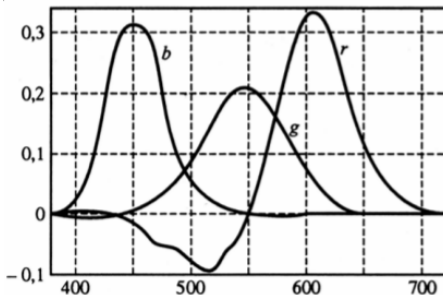
# Χρωματικό Μοντέλο RGB

## Καμπύλες μείξης RGB



# Χρωματικό Μοντέλο RGB

- Οι καμπύλες **μείξης** των χρωμάτων αυτών είναι οι ακόλουθες

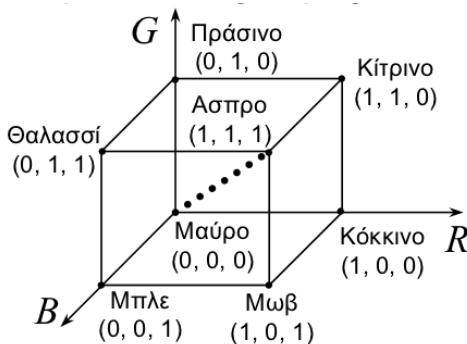






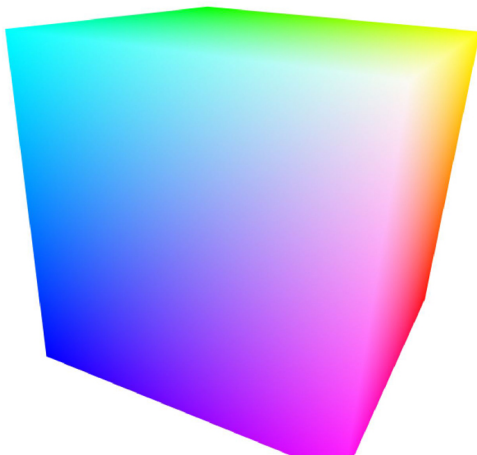
# Χρωματικό Μοντέλο RGB

## Χρωματικός χώρος RGB



# Χρωματικό Μοντέλο RGB

## Χρωματικός χώρος RGB



# Χρωματικό Μοντέλο RGB

- Στην αναπαράσταση αυτή
  - η **κατεύθυνση** του διανύσματος αντιστοιχεί στο **χρώμα**
  - το **μήκος** του διανύσματος αντιστοιχεί στη **φωτεινότητα**
- Η κύρια **διαγώνιος** του κύβου αντιστοιχεί σε όλες τις αποχρώσεις του **γκρι** μεταξύ μαύρου και άσπρου



# Χρωματικό Μοντέλο RGB

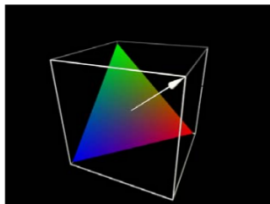
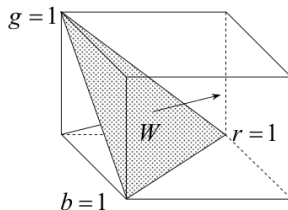
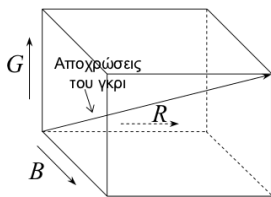
Συνήθως τα χρώματα διακρίνονται με βάση τον **τύπο** τους, παρά με τη φωτεινότητά τους!

- Επιλέγεται έτσι ένας **διδιάστατος** τρόπος απεικόνισης
- Είναι η **τομή** του κύβου με το επίπεδο που ορίζουν τα σημεία  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$ ,  $(0, 0, 1)$
- **Ισόπλευρο** τρίγωνο, **κάθετο** προς την κύρια διαγώνιο

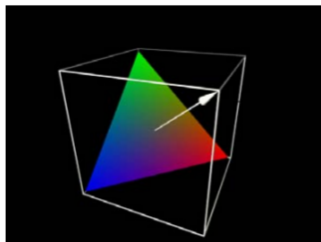


# Χρωματικό Μοντέλο RGB

## Χρωματικό τρίγωνο στο χώρο RGB



# Χρωματικό Μοντέλο RGB



- Κάθε **σημείο** του τριγώνου αντιστοιχεί σε ένα χρώμα
- Η μόνη πληροφορία που χάνεται κατά τη μετάβαση από τον κύβο στο τρίγωνο είναι η **φωτεινότητα**
- Οι **κορυφές** του τριγώνου αντιστοιχούν στα βασικά χρώματα
- Στο **κέντρο** αντιστοιχεί μια απόχρωση του άσπρου



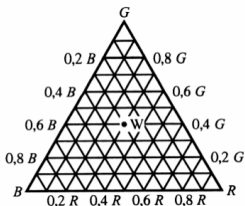
# Χρωματικό Μοντέλο RGB

## Χρωματομετρία

- Ο **τύπος** ενός χρώματος παρίσταται με τη βοήθεια
  - της **απόχρωσης** (hue)
  - της **καθαρότητας** (saturation)
- **Απόχρωση** είναι η **καθοριστική** συχνότητα (μήκος κύματος) του χρώματος
- **Καθαρότητα** είναι το ποσοστό συμμετοχής του **άσπρου** χρώματος



# Χρωματικό Μοντέλο RGB

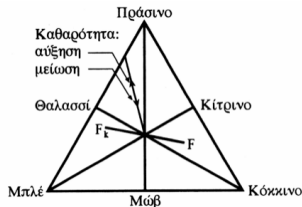
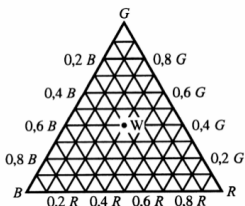


- Χρώματα με την ίδια απόχρωση βρίσκονται πάνω σε ευθύγραμμο τμήμα που συνδέει το κέντρο του τριγώνου με κάποιο σημείο της **περιμέτρου**
- Όσο πιο κοντά βρίσκεται ένα χρώμα στο κέντρο του τριγώνου, τόσο **μεγαλύτερη** είναι η καθαρότητά του





# Χρωματικό Μοντέλο RGB



- Το κέντρο του τριγώνου έχει καθαρότητα 0% (**άσπρο**)
- Δύο χρώματα που προστίθενται και προκύπτει άσπρο, λέγονται **συμπληρωματικά**, βρίσκονται στα άκρα ευθύγραμμου τμήματος που περνάει από το **κέντρο** του τριγώνου





































# Μετασχηματισμός Χρωμάτων από Οθόνη σε Οθόνη

- Η χρωματική παλέτα κάθε οθόνης **διαφέρει**
- Ίδιες RGB τιμές μπορεί να δίνουν **λίγο διαφορετικό** χρώμα σε **διαφορετικές** οθόνες
- Ένας τρόπος για να **ξεπεραστεί** αυτό είναι να **μετασχηματισθεί** το κάθε χρώμα της μίας οθόνης  $(r_1, g_1, b_1)$  στο αντίστοιχο της άλλης οθόνης  $(r_2, g_2, b_2)$



# Μετασχηματισμός Χρωμάτων από Οθόνη σε Οθόνη

- Για κάθε οθόνη δίνεται ένας **πίνακας**  $M$  που μετατρέπει τις  $(r, g, b)$  τιμές στις  $(X, Y, Z)$  (CIE) τιμές

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M \cdot \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix}$$

- όπου

$$M = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}$$







## Θέματα διαδικτύου

- Το δεύτερο θέμα αφορά στη **διαφορά** του χρωματικού μοντέλου
- Οι εικόνες συχνά αποθηκεύονται στο **εξαρτώμενο** από συσκευές σύστημα RGB
- Όταν η συσκευή απεικόνισης είναι **διαφορετική** από τη συσκευή κατασκευής της εικόνας, τα χρώματα θα παρουσιάζουν **διαφορές**
- Αυτό ενδέχεται να είναι ιδιαίτερα **ενοχλητικό** σε εφαρμογές διαδικτύου
- Μια καλή λύση είναι το πρότυπο sRGB, το οποίο είναι **ανεξάρτητο** συσκευής
- Το sRGB έχει ανεξαρτησία από συσκευές παρέχοντας **χρωματομετρικό** ορισμό των βασικών χρωμάτων με βάση το CIE XYZ και  $\gamma = 2.2$











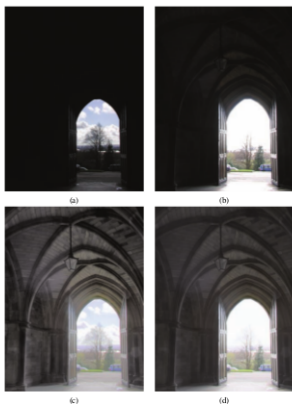


# Πλεονεκτήματα ΥΔΕ

- Η δημιουργία εικόνων ΥΔΕ έχει δύο **πλεονεκτήματα**:
  - 01 Οι εικόνες μπορούν να αποθηκευθούν για **μελλοντική** χρήση στο δυναμικό εύρος του ανθρώπινου οπτικού συστήματος, προλαμβάνοντας έτσι μελλοντικά συστήματα απεικόνισης ΥΔΕ
  - 02 Είναι δυνατόν να εφαρμοσθούν στη συνέχεια **διαφορετικές** τεχνικές τονικής απεικόνισης σε εικόνες ΥΔΕ, αναδεικνύοντας έτσι χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με τις εκάστοτε απαιτήσεις



# Παράδειγμα εικόνας ΥΔΕ



**Plate XIII.** Images of a scene with high dynamic range. Obtaining a dark image (a) loses information on the interior of the arch; a bright image (b) loses information on the clouds. An HDR image created from several simple images (images (a) and (b) being the two extremes) and tone-mapped using histogram tone mapping (c) or Reinhard's global photographic tone mapping (d) is closer to what the human eye can see. (Images courtesy of Greg Ward.) (See also Figure 11.17.)





# Το πρότυπο LogLuv



- **15** ψηφία χρησιμοποιούνται για την **τιμή** έντασης
- **1** ψηφίο χρησιμοποιείται για το **πρόσημο** έντασης (επιτρέπονται και αρνητικές τιμές)
- **16** ψηφία για τη **χρωματικότητα**
- η λογαριθμική μετατροπή μεταξύ της **πραγματικής** τιμής έντασης  $L$  και της **ακέραιας αποθηκεύσιμης** τιμής  $L_e$  είναι της μορφής

$$L_e = \lfloor c_1(\log_2 L + c_2) \rfloor, \quad L = 2^{L_e/c_1 - c_2}$$

Οι τιμές χρωματικότητας μετατρέπονται από CIE XYZ σε Υxy και έπειτα σε Υu'v' για **γραμμικότητα**. Το ορατό εύρος u'v' στη συνέχεια **κλιμακώνεται** σε 8 ψηφία για καθένα από τα u',v'

