8ο Μάθημα – Διαχείριση Σκηνής

Γραφικα

Ευάγγελος Σπύρου

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ακ. Έτος 2018-19

Σύνοψη του σημερινού μαθήματος

1. Εισαγωγή
2. Γράφοι Σκηνής
3. Κατανεμημένη Σχεδίαση Σκηνής

Εισαγωγή

- Στα προηγούμενα είδαμε ότι πολλές φορές υπάρχει **συμφόρηση** λόγω υπερβολικής **εισροής** γεωμετρικής **πληροφορίας**
- Προκειμένου να αποφύγουμε τέτοια προβλήματα, **απορρίπτουμε** με διάφορους μηχανισμούς τα πολύγωνα τα οποία δεν πρόκειται ποτέ να **φανούν** στο πεδίο παρατήρησης
- Για να εκτελεστούν οι έλεγχοι ορατότητας με **αποδοτικό** τρόπο, τα στοιχειώδη σχήματα οργανώνονται σε συστοιχίες και χωρικές **ιεραρχίες**
- Έτσι, οι έλεγχοι γίνονται **μόνο** στους περιβάλλοντες όγκους των ομαδοποιημένων συνόλων και **όχι** σε κάθε μεμονωμένο γεωμετρικό στοιχείο

Εισαγωγή

- Είναι προφανές πως κάτι τέτοιο έχει σαν αποτέλεσμα να εκτελούνται **λιγότεροι** υπολογισμοί
- Έτσι η επίδραση του συνόλου δεδομένων στην **ταχύτητα** απεικόνισης **μειώνεται**
- Η **οργάνωση** της σκηνής **χτίζεται** από κάτω προς τα πάνω:
  - τα γεωμετρικά στοιχεία/πολύγωνα είναι τα **φύλλα** της ιεραρχίας
- **Ελέγχεται** από πάνω προς τα κάτω
- Έτσι τα στοιχειώδη σχήματα είναι τακτοποιημένα σε μια **δενδρική** δομή

Εισαγωγή

- Κατ'αυτόν τον τρόπο μπορούμε πολύ **γρήγορα** να τα **προσπελάσουμε**
- Μπορούμε πολύ εύκολα να **εξαιρέσουμε** κάποια προκαταρκτικά από υπολογισμούς
- Αυτός ο τύπος οργάνωσης των δεδομένων αποκαλείται **διαμέριση** (spatial partitioning)
- Υπάρχουν **πολλοί** μηχανισμοί για να επιτευχθεί αυτό

Εισαγωγή

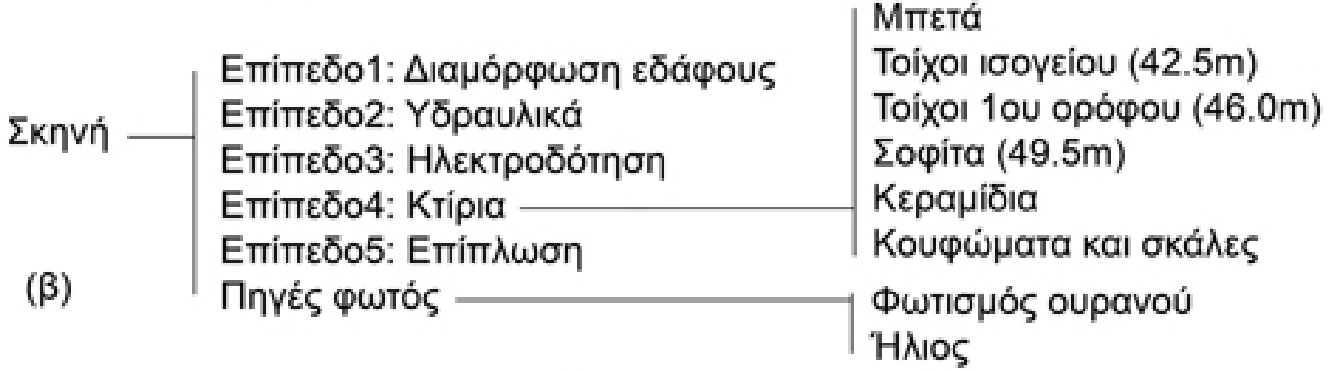
- Στην πραγματικότητα αυτή είναι μόνο η **καθοδηγούμενη από τα δεδομένα** πτυχή της οργάνωσης μιας σκηνής
- Όταν κανείς σχεδιάζει έναν εικονικό **κόσμο**, δηλαδή μια 3Δ σκηνή τείνει να **ομαδοποιεί** τα αντικείμενα που περιέχονται **οντολογικά**
- Δηλαδή με βάση τη **λογική** τους εξάρτηση
- Δε λαμβάνει δηλαδή υπόψη τη **χωρική** τους τοποθέτηση
- Ορισμένες φορές τέτοιες οντολογικές ιεραρχίες τείνουν να αναπαριστούν μια **χωρική οργάνωση** των αντικειμένων
- Άλλες πάλι φορές, **όχι**

Παράδειγμα οργάνωσης μιας σκηνής

Μια σκηνή που αποτελείται από 3 σπίτια ενός συγκροτήματος κατοικιών

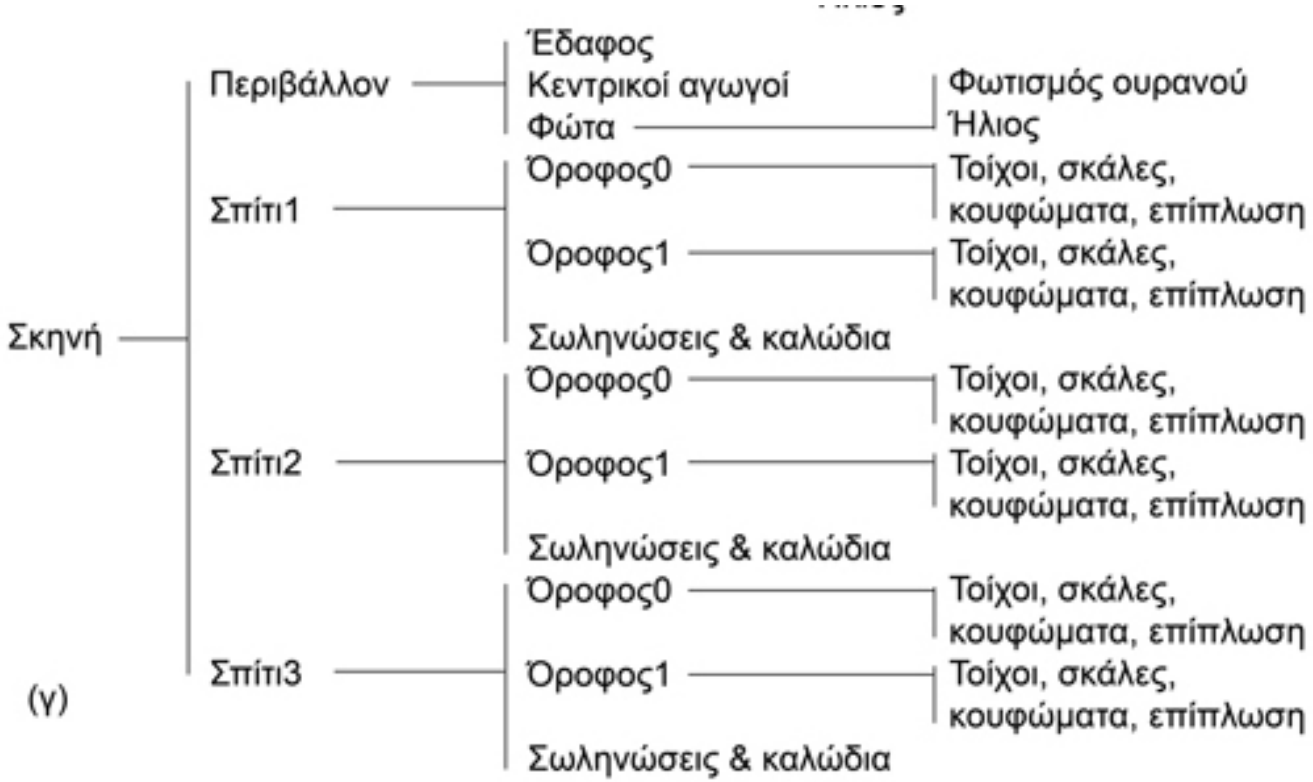
Παράδειγμα οργάνωσης μιας σκηνής

Αρχιτεκτονικά σχέδια κατά επίπεδα, **χωρίς** χωρική συνάφεια



Παράδειγμα οργάνωσης μιας σκηνής

Χωρικά συνεκτική διαμέριση της σκηνής για πλοήγηση σε πραγματικό χρόνο



Παράδειγμα οργάνωσης μιας σκηνής

Τι παρατηρούμε;

- Αν οργανωθεί η σκηνή με βάση μια **αρχιτεκτονική** θεώρηση, τα στοιχεία των μοντέλων **ομαδοποιούνται** ανάλογα με τη λειτουργία τους, το υλικό τους και τη συμβατότητα της οργάνωσης με τις κατόψεις που θα περίμενε κανείς σε ενα τυπικό σχέδιο
- Προφανώς, η χωρική διευθετηση της σκηνής σε τέτοιες ομάδες δε διευκολύνει την **περικοπή** της γεωμετρίας
- Δε διευκολύνεται ούτε γίνεται αποδοτική η **διάσχιση** της ιεραρχίας για **σχεδίαση**
- Φυσικά, **δεν** μπορούμε να ισχυριστούμε ότι **δεν** εξυπηρετείται η εφαρμογή του αρχιτεκτονικού σχεδιασμού!

Παράδειγμα οργάνωσης μιας σκηνής

Τι προσφέρει η άλλη ομαδοποίηση;

- Σημαντική **αύξηση** της **απόδοσης** στις περισσότερες περιπτώσεις
- Η μη ορατή γεωμετρία βρίσκεται στα **φύλλα** της ιεραρχίας
- Μπορεί να **περικοπεί** πολύ **νωρίς** με την εξαίρεση ολόκληρου του υποδένδρου
- Στην προηγούμενη εικόνα π.χ., αν ένα **ολόκληρο** σπίτι είναι εκτός οπτικού πεδίου τότε τα **όριά** του μπορούν να **ελεγχθούν** σε σχέση με την πυραμίδα παρατήρησης που σχηματίζει το οπτικό πεδίο
- Έτσι, **ολόκληρο** το **υποδένδρο** της σκηνής που αντιστοιχεί στο σπίτι μπορεί να **εξαιρεθεί** από τη σχεδίαση με μια απλή πράξη

Οργάνωση σε πραγματικές εφαρμογές

- Σε εφαρμογές **πραγματικού** χρόνου, η πιο κοινή πρακτική είναι να σχεδιάζονται **οντολογικά** οι σκηνές
- Ωστόσο, προσοχή και ιδιαίτερο βάρος δίνεται στη **χωρική** διευθετηση των αντικειμένων
- Λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε τα αντικείμενα να σχηματίζουν **χωρικά διακριτές**, **ανεξάρτητες** ομάδες
- Τα **εσωτερικά** περιβάλλοντα κατασκευάζονται λαμβάνοντας υπόψη από την αρχή την **περικοπή** σε πραγματικό χρόνο
- Τα **εξωτερικά** περιβάλλοντα συνήθως σχεδιάζονται με τη λογική της δημιουργίας **ιεραρχιών** με μεγάλο συντελεστή **διακλάδωσης** για πιο αποδοτική περικοπή

Οργάνωση σε πραγματικές εφαρμογές

- Εκτός από τη βελτίωση της **απόδοσης**, ο σχεδιασμός αυτός μπορεί να προσφέρει καλύτερη **διαχείριση πόρων**
- Μπορεί π.χ., κάποιος να σχεδιάσει ένα **αυτοτελές μοντέλο** όπως ένα σπίτι
- Μπορεί να κάνει **αντίγραφα** μέσα στη σκηνή και εύκολα να φτιάξει μια **πόλη**
- Κάτι τέτοιο μπορεί να έχει σημαντική επίπτωση στη **μείωση** της κατανάλωσης **μνήμης**
- Ο μηχανισμός που χρησιμοποιείται λέγεται "**μηχανισμός στιγμιοτύπων γεωμετρίας**" (geometry instancing)

Οργάνωση σε πραγματικές εφαρμογές

- Η **υπερβολική** διάσπαση της σκηνής σε ιεραρχικά στοιχεία μπορεί πολλές φορές να οδηγήσει στο **αντίθετο** από το επιθυμητό αποτέλεσμα
- Μπορεί να **επιβραδυνθεί** η σχεδίαση για δυο λόγους:
  01. Η εφαρμογή τείνει να **σπαταλά** πολύ **χρόνο** επεξεργασίας για τη **διάσχιση** της ιεραρχίας της σκηνής. Θα ήταν όμως προτιμότερο κάποια τμήματα της γεωμετρίας να σχεδιαστούν και **ας μη φαίνονται** προκειμένου να απλοποιηθεί το δένδρο
  02. Σε γραφικά που σχεδιάζονται στο hardware, μια **πολύ λεπτή** διαμέριση σε γεωμετρικές οντότητες αναγκαστικά παράγει μικρά και **πλεοναστικά** σε πληροφορία ρεύματα γεωμετρικών δεδομένων προς την GPU και εκτελείται **πολύ** μεγαλύτερος αριθμός εντολών από ότι χρειάζεται

Τι είναι ένας γράφος σκηνής;

Ορισμός

Γράφος σκηνής *(scene graph) καλείται μια ιεραρχία από γεωμετρικά στοιχεία που σχετίζονται* ***οντολογικά*** *και αλληλοεξαρτώνται* ***χωρικά***

- Ένας ολοκληρωμένος ορισμός για το γράφο σκηνής είναι **δύσκολο** να διατυπωθεί, καθώς περιλαμβάνει **πολλά** αντικείμενα και έννοιες
- Ωστόσο, ο παραπάνω ορισμός καλύπτει τα πιο **κοινά** χαρακτηριστικά των **περισσότερων** υλοποιήσεών

Από τι αποτελείται ένας γράφος σκηνής;

- Ένας γράφος σκηνής **τυπικά** αποτελείται από:
  1. **κόμβους** που παριστάνουν συναθροίσεις από γεωμετρικά στοιχεία 2Δ, 3Δ
  2. **μετασχηματισμούς**
  3. υπό συνθήκη **διακλαδώσεις** υπο-δένδρων
  4. άλλες **οντότητες** που μπορούν να **αναπαραχθούν** (π.χ., ήχοι), διεργασίες (κόμβοι υπολογισμών) ή ακόμη και άλλους γράφους σκηνής

Με τι μοιάζει ένας γράφος σκηνής;

- Ένας γράφος σκηνής είναι ένα **κατευθυνόμενος ακυκλικός γράφος** (δένδρο) από κόμβους
- Οι **ακμές** του δηλώνουν τη γεωμετρική ή λειτουργική **εξάρτηση** ενός κόμβου-παιδιού από τον **πρόγονό** του
- Οι γράφοι σκηνής δεν αποτελούν **απλά μια δομή** για την αποδοτική αποθήκευση γεωμετρικής πληροφορίας
- Ενθυλακώνουν **όλη τη λειτουργικότητα** που απαιτείται για να αποδοθεί μια **συμπεριφορά** για κάθε τύπο τους
- Ακολουθούν τη λογική του **αντικειμενοστραφούς** προγραμματισμού

Με τι μοιάζει ένας γράφος σκηνής;

- Η **ρίζα** (της ιεραρχίας) είναι συνήθως μια αφηρημένη αναπαράσταση της **σκηνής**
- Σκοπός της είναι να παρέχει ένα σημείο **εισόδου** για τη **διάσχιση** της δενδρικής οργάνωσης των κόμβων του γράφου
- Κατά τη διάσχιση, **προωθούνται** οι τελούμενες **λειτουργίες** στα στοιχεία του
- Έτσι, όταν εφαρμόζεται μια **πράξη** σε έναν κόμβο, αυτή επηρεάζει και **όλα** του τα παιδιά
- Κατ'αυτόν τον τρόπο, μπορεί να εφαρμοστεί ένας γεωμετρικός **μετασχηματισμός** από έναν κόμβο μετασχηματισμού σε **όλα** του τα παιδιά
- Ένας κόμβος-διακόπτης μπορεί να "κλείσει", **εξαιρώντας** το υποδένδρο που "κρέμεται" από αυτόν από τη σχεδίαση

Παράδειγμα: Ταχύπλοο

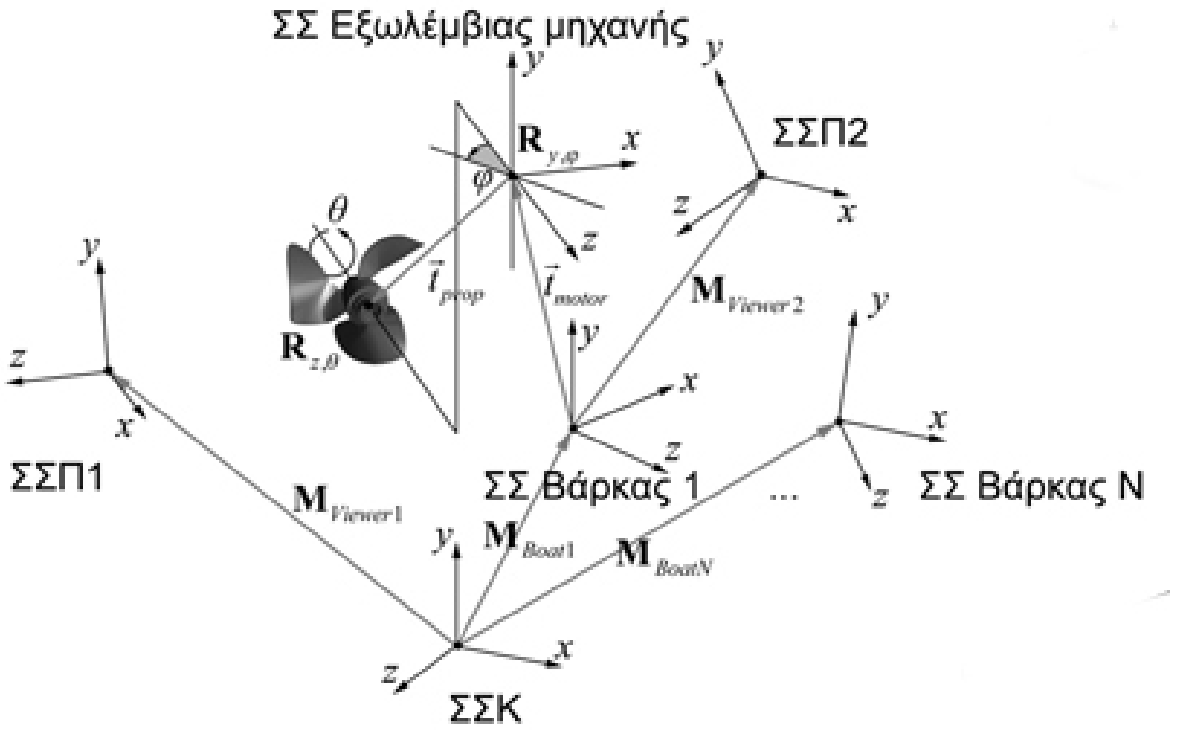
- Ας θεωρήσουμε ένα ταχύπλοο, σαν αυτό της παρακάτω εικόνας

Παράδειγμα: Ταχύπλοο

- Είναι πολύ δύσκολο να περιγράψουμε **απευθείας** την κίνηση και την τοποθέτηση κάθε επιμέρους μηχανικού εξαρτήματος αναφορικά με το καθολικό σύστημα συντεταγμένων
- Η προπέλα **περιστρέφεται** γύρω από τον άξονά της
- Ο άξονας **στρίβει** δεξιά και αριστερά, ακολουθώντας την κίνηση του πηδαλίου
- Η βάρκα **ταξιδεύει** και ταλαντεύεται πάνω στα κύματα της ταραγμένης θάλασσας
- Το ζητούμενο μπορεί π.χ., να είναι:"Ποια είναι η **φαινόμενη** κίνηση της προπέλας **αναφορικά με έναν παρατηρητή** που κάθεται στην κοντινή προκυμαία;"
- Ή ακόμη: "Πώς περιγράφεται η κίνηση της προπέλας σε σχέση με κάποιον που βρίσκεται **μέσα** στη βάρκα;"

Παράδειγμα: Ταχύπλοο

- ΣΣ: συστήματα συντεταγμένων



Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Για να απαντήσουμε σε τέτοιες ερωτήσεις χρειάζεται να κατασκευάσουμε μια **ιεραρχία σχέσεων και εξαρτήσεων μεταξύ αντικειμένων**
- Στο προηγούμενο παράδειγμα, η προπέλα είναι τοποθετημένη στην εξωλέμβια μηχανή με μια **μετατόπιση** $\mathbf{t}_{\text{prop}}$ σε σχέση με το **τοπικό** σύστημα συντεταγμένων της μηχανής
- Επιτρέπεται να **περιστρέφεται** πάνω στον άξονα μετάδοσης της κίνησης (τοπικός άξονας z) σύμφωνα με έναν μεταχηματισμό **περιστροφής** $\mathbf{R}_{z,\theta}$
- Η μηχανή **στρίβει** δεξιά και αριστερά γύρω από το σημείο ανάρτησης της στην καρίνα ($\mathbf{R}_{y,\phi}$), το οποίο σημείο είναι και η αρχή των αξόνων του **τοπικού** συστήματος της εξωλέμβιας

Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

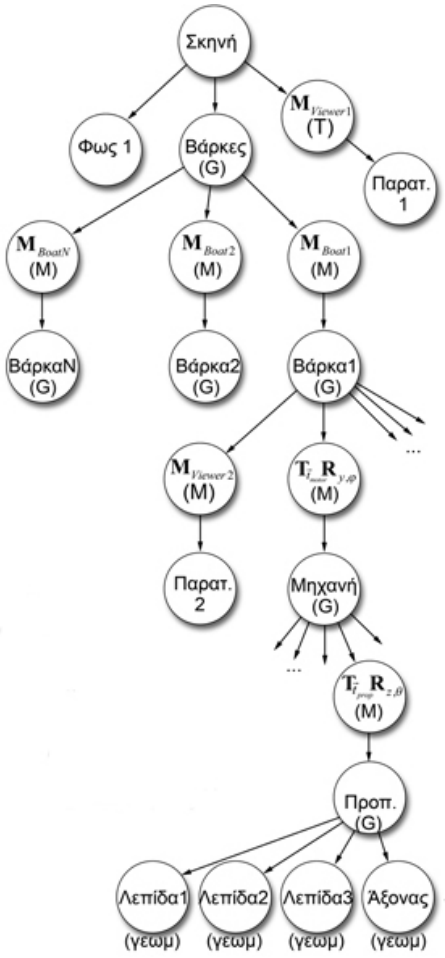
- Η μηχανή είναι **μετατοπισμένη** κατά $\mathbf{t}_{\text{motor}}$ ως προς την αρχή του συστήματος συντεταγμένων **όλης** της βάρκας
- Ο **δεύτερος** παρατηρητής θεωρείται **σταθερός** ως προς το σύστημα συντεταγμένων του σκάφους (κάθεται στο εσωτερικό του, μετασχηματισμός $\mathbf{M}_{\text{viewer2}}$ ως προς το σύστημα **μεταφοράς** της βάρκας
- Η **φαινόμενη** κίνηση της προπέλας όπως την αντιλαμβάνεται ο **δεύτερος** παρατηρητής είναι ο **σύνθετος** γεωμετρικός μετασχηματισμός $\mathbf{M}_{\text{prop(Viewer2)}}$ που περιλαμβάνει τη σχετική μετατόπιση της αρχής των αξόνων της εξωλέμβιας ως προς τον παρατηρητή, την περιστροφή της εξωλέμβιας, τη μετατόπιση της προπέλας ως προς την εξωλέμβια και την περιστροφή της προπέλας: $\mathbf{M}_{\text{prop(Viewer2)}} = \mathbf{M}_{\text{Viewer2}}^{-1}\mathbf{T}_{\mathbf{t}_{\text{motor}}}\mathbf{R}_{y,\phi}\mathbf{T}_{\mathbf{t}_{\text{prop}}}\mathbf{R}_{z,\theta}$

Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Ο **παρατηρητής** είναι τοποθετημένος σε σχέση με το σύστημα αναφοράς της βάρκας σύμφωνα με το **μετασχηματισμό** $\mathbf{M}_{\text{Viewer2}}$
- Το **τοπικό** σύστημα της βάρκας είναι μετασχηματισμένο δυϊκά αναφορικά με τον **παρατηρητή 2** κατά $\mathbf{M}_{\text{Viewer2}}^{-1}$
- Οι υπόλοιποι μετασχηματισμοί που περιγράφει η παραπάνω σχέση είναι το αποτέλεσμα της **μετατόπισης** της εξωλέμβιας ακολουθούμενη από **στροφή** της γύρω από το σημειο ανάρτησης, τη **μετατόπιση** της προπέλας και την **περιστροφή** της τελευταίας
- Αυτός ο **σύνθετος** μετασχηματισμός περιγράφει την κίνηση της προπέλας ως προς το σύστημα συντεταγμένων της βάρκας

Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Καθώς διερευνούμε το μετασχηματισμό ενός ζητούμενου κόμβου προς ένα κόμβο αναφοράς, εκτελούμε μια **ανοδική διάσχιση** του δένδρου από το ζητούμενο κόμβο (π.χ., προπέλα) μέχρι τον **κοινό πρόγονο** μεταξύ του κινούμενου κόμβου και του κόμβου αναφοράς
- Στη συνέχεια **κατεβαίνουμε** προς τον κόμβο του οποίου το τοπικό σύστημα χρησιμοποιείται ως αναφορά
- Εφαρμόζουμε **αντίστροφα** τους μετασχηματισμούς που μεσολαβούν



Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Αντί να χρησιμοποιηθεί ένας κοινός κόμβος-πρόγονος για την αλλαγή της κατεύθυνσης της διάσχισης, θα μπορούσε κανείς να φτάσει **τυφλά** ως την κορυφή του γράφου σκηνής και να **κατέβει** από κει προς τον κόμβο αναφοράς
- Το αποτέλεσμα θα ήταν το **ίδιο**, αφου οι μετασχηματισμοί στο κοινό μονοπάτι της διαδρομής θα **αλληλοαναιρούνταν**
- Προφανώς είναι **οικονομικότερο** από πλευράς υπολογισμών να εντοπισθεί ο κοινός πρόγονος και να αποφευχθούν οι **άσκοπες** μεταβάσεις (άρα και πολλαπλασιασμοί πινάκων)

Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Στη **γενική** περίπτωση, ο μεταχηματισμός ενός κόμβου στο επίπεδο k σε έναν κλάδο A, **αναφορικά με έναν άλλο κόμβο** στο επίπεδο m ενός κλάδου B με κοινή ρίζα που συνδέει τους A, B στο επίπεδο r δίνεται από τη σχέση:

$$\mathbf{M}_{A\to B} = \prod_{j=m}^{r+1} \mathbf{M}_{Bj}^{-1} \prod_{i=r+1}^{k} \mathbf{M}_{ai}^{-1}$$

- Η εξίσωση αυτή είναι απευθείας **συνέπεια** της δυϊκής σχέσης μεταξύ μετασχηματισμών και αλλαγής συστήματος αναφοράς
- Εδώ **αλλάζουμε το σύστημα αναφοράς** από τον κοινό κόμβο στο επίπεδο r σε αυτό του κόμβου αναφοράς (επίπεδο m, στον κλάδο B)

Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Δεδομένου ότι ο κόμβος αναφοράς είναι **μετασχηματισμένος** κατά $\mathbf{M}_{Br+1} \cdot \mathbf{M}_{Br+2} \cdot \mathbf{M}_{Bm}$ ως προς την κοινή ρίζα στο επίπεδο r, ο κόμβος r και οτιδήποτε εξαρτάται από αυτό πρέπει να μετασχηματιστούν **αντίστροφα** για να επιδράσει πάνω τους η αλλαγή του συστήματος συντεταγμένων

Πώς βοηθά ο γράφος σκηνής;

- Το ταχύπλοο του παραδείγματος είναι μια **αυτοτελή οντότητα** με κινούμενα μέρη και πλήρη γεωμετρική περιγραφή
- Μπορεί κανείς να το θεωρήσει ως ένα μαύρο κουτί και να **μην** ασχοληθεί με την **εσωτερική** του λειτουργία και μορφή όταν προσπαθεί να μοντελοποιήσει π.χ., μια μαρίνα με **200** παρόμοια ταχύπλοα
- Καθώς ο **πρώτος** παρατηρητής που κάθεται στην προκυμαία καταγράφει την εικόνα του ταχυπλόου που περνάει μπροστά του, βλέπει το αποτέλεσμα της **λειτουργίας και κίνησης** του σκάφους
- Τα **εμφανή** τμήματα του αντικείμενου αποτυπώνονται στο **πεδίο παράστασής** του

Οργάνωση των δεδομένων

- Το μεγαλύτερο μέρος του γράφου σκηνής περιγράφει **σχέσεις** μεταξύ γεωμετρικών οντοτήτων και **συναθροίσεων** από κόμβους
- Όπως είναι φυσικό, όλα τα καθαρά γεωμετρικά δεδομένα βρίσκονται στα **φύλλα** της ιεραρχικής δομής
- Οι κόμβοι **γεωμετρίας** μπορεί να περιέχουν αταξινόμητα, δεικτοδοτημένα ή αδόμητα πολυγωνικά δεδομένα, σημεία ελέγχου παραμετρικών επιφανειών ή δεδομένα όγκου
- Εναλλακτικά, οι **γεωμετρικοί** κόμβοι ενδέχεται ταυτόχρονα να συμμετέχουν σε μια δομή διαμέρισης χώρου, όπως για παράδειγμα σε ένα **δένδρο από περιβάλλοντα κιβώτια** ευθυγραμμισμένα με τους άξονες (axis-aligned bounding box – AABB-tree)

Οργάνωση των δεδομένων

- Ο παραπάνω μηχανισμός οργάνωσης δεδομένων απαντάται συχνά σε εφαρμογές που **φορτώνουν μεγάλα σύνολα** δεδομένων
- Ο γράφος σκηνής αναπαριστά την οντολογική **ιεραρχία** των δεδομένων μαζί με κάποια ενδεχόμενη **λειτουργικότητα**
- Το σύστημα διαμέρισης χώρου εργάζεται με τα φύλλα του γράφου σκηνής για να **επιταχύνει** τις διαδικασίες σχεδίασης και αναζήτησης γεωμετρίας

Οργάνωση των δεδομένων

- Δεδομένου ότι για την αποδοτική διαμέριση του χώρου απαιτείται σε πρώτη φάση η **προεπεξεργασία** και **ταξινόμηση** των γεωμετρικών στοιχείων στην κατάλληλη δομή, ο συνδυασμός γράφου σκηνής-διαμέρισης χώρου είναι **αποτελεσματικός μόνο για στατικά δεδομένα**
- Δηλαδή για **γεωμετρική** πληροφορία η οποία έχει μια **αναλλοίωτη** αναπαράσταση ως προς το **τοπικό** της σύστημα: ούτε αλλάζει δυναμικά, ούτε παραμορφώνεται
- Σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου, ο γράφος σκηνής είναι συνήθως **ανεξάρτητος** από το μηχανισμό διαμέρισης χώρου, χρησιμοποιείται μόνο για **κινούμενα** αντικείμενα
- Αντίθετα, η **στατική** πληροφορία του χώρου είναι απομονωμένη σε ένα σύστημα διαμέρισης χώρου

Στιγμιότυπα γεωμετρίας

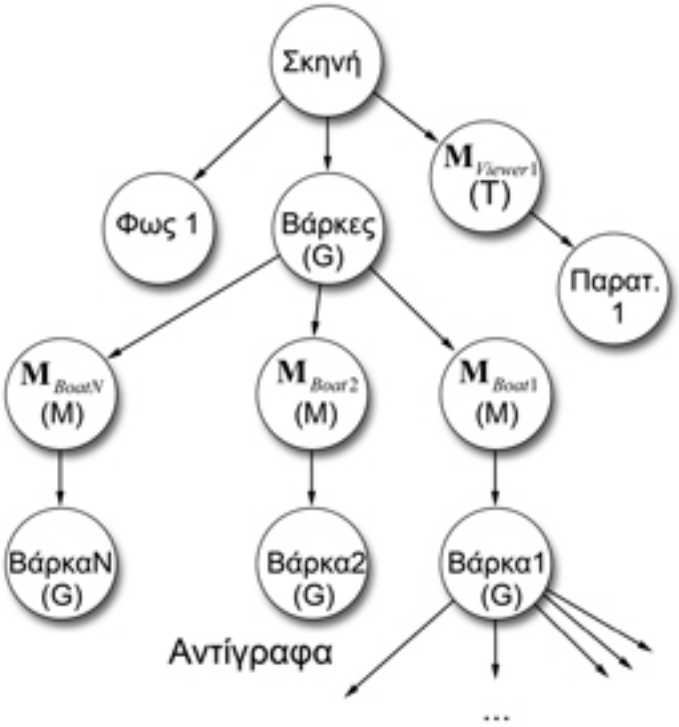
- Στο προηγούμενο παράδειγμα, το ταχύπλοο ήταν μοντελοποιημένο αναφορικά με ένα **τοπικό** σύστημα συντεταγμένων
- Όλο το **υποδένδρο** που αντιστοιχούσε στη **συνάθροιση** των εξαρτημάτων του το θεωρούσαμε ως ένα "μαύρο κουτί" – μια **αφηρημένη** παράσταση της βάρκας
- Θα μπορούσαμε να τοποθετήσουμε τον κόμβο "βάρκα" **οπουδήποτε** μέσα στο γράφο της συνολικής σκηνής
- Θα μπορούσαμε ακόμη και να δημιουργήσουμε **αντίγραφα** αυτού για να αναπαραστήσουμε **πολλαπλές** κινούμενες βάρκες εντός της σκηνής
- Γιατί, όμως πρέπει να αντιγράψουμε **φυσικά** τον κόμβο για να δημιουργήσουμε πολλαπλά στιγμιότυπα;

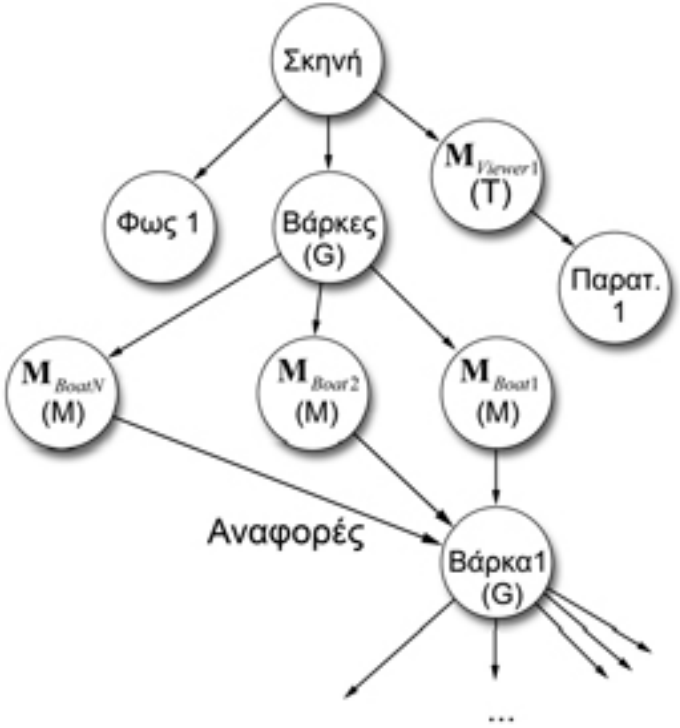
Στιγμιότυπα γεωμετρίας

- Ένας διαδεδομένος μηχανισμός ο οποίος σχετίζεται **άμεσα** με τις αντίστοιχες δομές που φυλάνε τη γεωμετρική πληροφορία του γράφου σκηνής είναι η δημιουργία **στιγμιοτύπων γεωμετρίας** (instancing)
- Αντί να κάνουμε ένα **πλήρες αντίγραφο** όλης της γεωμετρικής πληροφορίας, των μετασχηματισμών και των λοιπών δεδομένων που είναι προσαρτημένα στον κόμβο, απλά δημιουργούμε μια **αναφορά** προς τον αρχικό κόμβο κάθε φορά που ένα ακριβές αντίγραφο του πρέπει να εισαχθεί στον γράφο σκηνής
- Με αυτόν τον τρόπο, η καθαρά δενδρική δομή του γράφου σκηνής μετατρέπεται σε **κατευθυνόμενο γράφο**

Στιγμιότυπα γεωμετρίας

Δημιουργία στιγμιοτύπων γεωμετρίας





Στιγμιότυπα γεωμετρίας

- Προφανώς η δημιουργία στιγμιοτύπων κόμβων αντί για πραγματικά αντίγραφα **μειώνει αρκετά την κατανάλωση μνήμης**
- Επιπλέον, ενδέχεται να **επιταχύνει σημαντικά τους υπολογισμούς** που χρειάζονται για την προσομοίωση και κίνηση των κόμβων μεταξύ διαδοχικών καρέ
- Η προσομοίωση εκτελείται **μια μόνο φορά** για τον ένα κόμβο και όλα τα στιγμιότυπα που αναφέρονται σε αυτόν χρησιμοποιούν τα ίδια ενημερωμένα δεδομένα
- Για παράδειγμα, η ενημέρωση της περιστροφής της προπέλας στο καρέ $k+1$ η οποία υπολογίζεται ως $\mathbf{R}_{\mathbf{v},\theta} : \theta(k+1) = \theta(k) + 2\pi \cdot \Delta t \cdot rpm/60$ μπορεί να εκτελεστεί την πρώτη **μόνο** φορά που μέσω μιας αναφοράς καλείται η μέθοδος προσομοίωσης του κόμβου

Στιγμιότυπα γεωμετρίας

- Από εκεί, ο κόμβος **μαρκάρεται** ως "επεξεργασμένος" για την **τρέχουσα** χρονική στιγμή (τρέχον καρέ)
- Οι **κλήσεις** στη μέθοδο προσομοίωσης από τις υπόλοιπες αναφορές, αφού **ελέγξουν** τη σήμανση του κόμβου ως επεξεργασμένος, θα **παρακάμπτουν** τον υπολογισμό του πίνακα μετασχηματισμού και θα προχωρούν στη χρήση του **ήδη** υπολογισμένου αποτελέσματος
- Στην πράξη, αυτό που θα γινόταν θα ήταν να διασχισθεί **ολόκληρο** το υποδένδρο του ταχύπλοου, θα γίνονταν οι σχετικοί υπολογισμοί την **πρώτη** φορά που η διάσχιση κάποιου άλλου κόμβου έφτανε ως εκεί στο τρέχον καρέ και στη συνέχεια θα υπολογίζονταν **όλοι** οι ιεραρχικοί μετασχηματισμοί από τη ρίζα του υποδένδρου αυτού και κάτω και θα εφαρμόζονταν στη γεωμετρία μόνο μια φορά

Στιγμιότυπα γεωμετρίας

- Ο μηχανισμός αυτός για τη δημιουργία στιγμιοτύπων "**παγώνει**" τις εσωτερικές λειτουργίες και την κίνηση ενός κόμβου και καθιστά τόσο τους υπολογισμούς όσο και την αποθήκευση του κόμβου **πολύ πιο αποδοτικές**
- Παρόλαυτά **δεν** ανταποκρίνεται πάντα στο επιθυμητό αποτέλεσμα
- Αν επανέλθουμε στο παράδειγμα της βάρκας, καθώς κάθε μια από αυτές ακολουθεί **διαφορετική** διαδρομή όταν κινείται, η εξωλέμβια μηχανή της κάθε μίας θα πρέπει να εκτελεί **διαφορετική** στροφή, έτσι ώστε να δικαιολογείται η πορεία που ακολουθεί το αντίστοιχο σκάφος και να γίνεται **πιστευτή** η κίνηση

Στιγμιότυπα γεωμετρίας

- Αν όλα τα στιγμιότυπα χρησιμοποιούσαν τα **ίδια** δεδομένα προσομοίωσης, τότε δεν θα μπορούσαμε να πάρουμε αυτές τις παραλλαγές στην κίνηση
- Το ίδιο και αν ο κόμβος είχε έναν **διακόπτη**: θα έπρεπε να ενεργοποιείται χωριστά για κάθε στιγμιότυπο
- Σε τέτοιες καταστάσεις, η δημιουργία στιγμιοτύπων μπορεί να αφορά **μόνο** το κομμάτι της αποθήκευσης της γεωμετρικής πληροφορίας στη μνήμη και **όχι** κάποια άλλη πράξη π.χ., προσομοίωση
- Η προσομοίωση πρέπει να **ακολουθείται** από τη σχεδίαση του αποτελέσματος για τον κόμβο που επαναλαμβάνεται
- Η προσομοίωση και η σχεδίαση δεν μπορούν να γίνουν πια ως **ανεξάρτητα** περάσματα

Διάσχιση και περικοπή γράφου σκηνής

- Το κύριο πλεονέκτημα της αναπαράστασης του 3Δ κόσμου με γράφο σκηνής είναι το γεγονός ότι κάθε πράξη που θέλουμε να εκτελέσουμε πάνω στα δεδομένα, εφαρμόζεται απλά **στη ρίζα της σκηνής** (ιεραρχίας) και προωθείται **αυτόματα** σε όλα τα τμήματα της σκηνής
- Αυτό γίνεται μέσω του μηχανισμού **διάσχισης** του γράφου σκηνής
- Οι πράξεις που εφαρμόζουμε πάνω στη σκηνή είναι η **αρχικοποίηση**, η **προσομοίωση**, η **περικοπή** και η **σχεδίαση**
- Κάθε μία από αυτές αντιστοιχεί σε μια **διαδικασία** που εφαρμόζεται **ιεραρχικά** σε όλους τους κόμβους

Η διαδικασία της προσομοίωσης

- Η διαδικασία της **προσομοίωσης** είναι υπεύθυνη για τον **προσδιορισμό** όλων των εσωτερικών παραμέτρων του κόμβου και την **ενημέρωση** όλων των μεταβλητών εμφάνισης και κίνησης
- Αυτό γίνεται σε συμφωνία με μια συμπεριφορά εξαρτώμενη από το **είδος** και την **αρχικοποίηση** του κόμβου
- Μερικές φορές, η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως **στάδιο κίνησης** (animation) ή **εφαρμογής** (application stage)
- Ο πρώτος όρος δίνει έμφαση στην επίδραση της διεργασίας στο **οπτικό** αποτέλεσμα
- Ο δεύτερος στο γεγονός ότι το στάδιο αυτό είναι **ανεξάρτητο** από τους αλγόριθμους της καθαρής απεικόνισης

Η διαδικασία της περικοπής

- Η περικοπή στους γράφους σκηνής είναι στενά συνδεδεμένη με τις **εξαρτήσεις** μεταξύ κόμβων
- Κάθε κόμβος θεωρείται ότι περιέχει **όλα** του τα παιδιά με την έννοια ότι αν κατά την περικοπή μαρκαριστεί η **ρίζα** του υποδένδρου ως μη ορατή, για να είναι αποτελεσματική η διαδικασία, θα πρέπει **όλοι** οι κόμβοι από κει και κάτω να μπορούν να θεωρηθούν μη ορατοί
- Άρα, ολόκληρο το υποδένδρο θα μπορεί να **εξαιρεθεί** από τη σχεδίαση
- Αντίστροφα, αν ένας κόμβος ομαδοποίησης θεωρηθεί ορατός, θα πρέπει **όλα** του τα παιδιά να **ελεγχθούν** ένα προς ένα
- Κάποια από αυτά ενδέχεται να μην είναι ορατά, λόγω **μερικής ορατότητας** του προγόνου τους

Η διαδικασία της περικοπής

- Το αποτέλεσμα της περικοπής συνήθως προκύπτει έπειτα από τον **έλεγχο των ορίων** του περιβάλλοντος όγκου του κόμβου
- Επιλέγεται ένα **κριτήριο ορατότητας**, π.χ., αν περιέχεται ολικώς, μερικώς, ή καθόλου στο χώρο της πυραμίδας που χρησιμοποιούμε στην περικοπή παρεμπόδισης του οπτικού πεδίου
- Για έναν κόμβο που περιλαμβάνει άλλους κόμβους-παιδιά, ο περιβάλλων όγκος του **μεταβάλλεται** έτσι ώστε να αντανακλά τα **συνολικά** όρια όλων των παιδιών του

Η διαδικασία της περικοπής

- Αν ένα κόμβος περιέχει έναν κλάδο της ιεραρχίας που υπάρχει **κίνηση**, τα καταγεγγραμένα οριά του πρέπει να προσαρμόζονται **δυναμικά** κάθε φορά που τα αντίστοιχα όρια κάποιου από τα παιδιά **αλλάζουν**
- Ο επαναϋπολογισμός των ακριβών ορίων ενός κόμβου γεωμετρίας απαιτεί να **διατρέξει** κανείς **όλες** τις κορυφές που περιέχει για να εντοπίσει τις μέγιστες και τις ελάχιστες τιμές
- Για κάποιους περιβάλλοντες όγκους ενδέχεται να απαιτείται και η εύρεση **ορμών** και κύριων **αξόνων**
- Για την περίπτωση **κινούμενων** υποδένδρων που έτσι κι αλλιώς είναι αναγκαία η σειριακή επεξεργασία όλων των κορυφών που περιέχουν (π.χ., σκελετική κίνηση) ο έλεγχος **δεν προσθέτει** ιδιαίτερη **επιβάρυνση**

Η διαδικασία της περικοπής

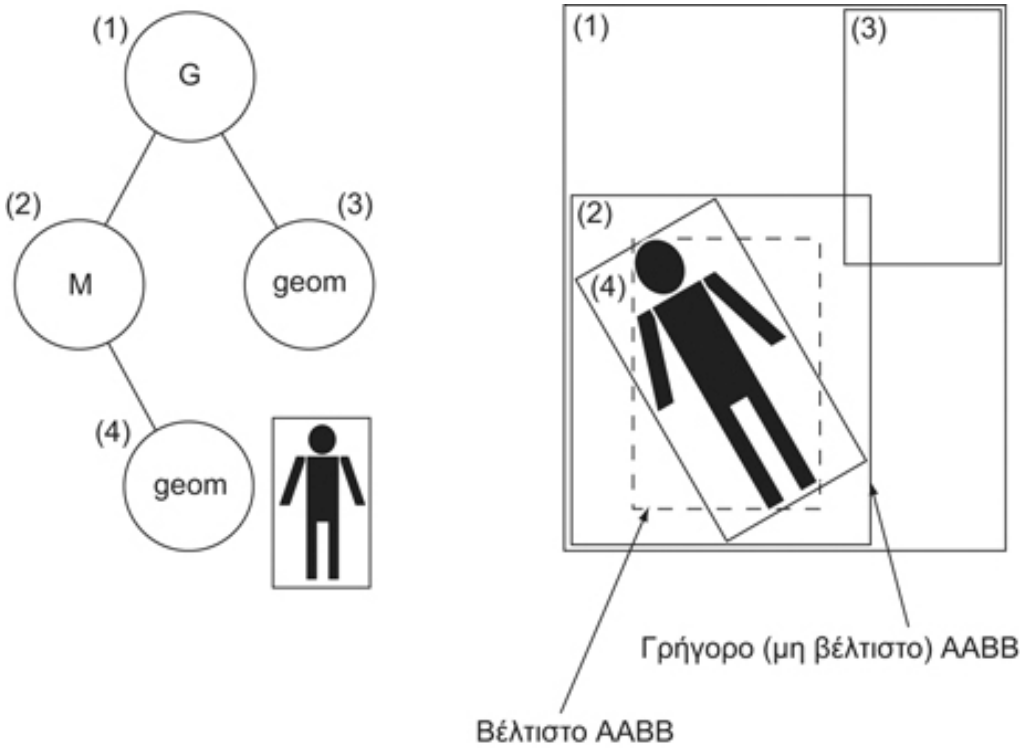
- Για κίνηση **μη παραμορφώσιμων στερεών**, όμως, αυτός ο υπολογισμός απαιτεί **αρκετό** υπολογιστικό χρόνο και μπορεί να είναι **απαγορευτικός** για μεγάλα μοντέλα
- Μια πολύ κοινή τακτική που υιοθετείται εναλλακτικά είναι η **προσαρμογή** του περιβάλλοντος όγκου του κόμβου-προγόνου με βάση τα **όρια** των μετασχηματισμένων περιβαλλόντων όγκων των **παιδιών** τους
- Αυτή η προσέγγιση **προτιμάται** στην περίπτωση που η **ταχύτητα** είναι πιο σημαντική από την **ακρίβεια** των ελέγχων ορατότητας

Η διαδικασία της περικοπής – Παράδειγμα

- Ας θεωρήσουμε μια γεωμετρική οντότητα η οποία **περιβάλλεται** από ένα **τοπικό** κιβώτιο προσανατολισμένο προς τους άξονες
- Επίσης, συνδέεται **έμμεσα** μέσω ενός κόμβου μετασχηματισμού με τον κόμβο ομαδοποίησης
- Τότε τα **όρια** του κόμβου ομαδοποίησης μπορούν να **εξαχθούν** από τις 8 κορυφές του κιβωτίου

Η διαδικασία της περικοπής – Παράδειγμα

Το προσανατολισμένο προς τους άξονες περιβάλλον κιβώτιο δεν ειναι βέλτιστο, αλλά μπορεί να υπολογισθεί πολύ γρήγορα



Η διαδικασία της περικοπής – Παράδειγμα

- Αυτή η λύση **δεν** είναι η **βέλτιστη** από πλευράς **αποδοτικότητας** περικοπής
- Ο περιβάλλων όγκος αφήνει αρκετό **κενό** στο εσωτερικό του
- Αυτό συμβαίνει καθώς τα όρια ενός μετασχηματισμένου περιβάλλοντος όγκου είναι εν γένει **μεγαλύτερα** από τα όρια της μετασχηματισμένης γεωμετρίας που περικλείει ο όγκος
- Τη λεπτομερή περικοπή θα μπορούσε να τη χειριστεί ένας **μηχανισμός διαμέρισης χώρου** σε επίπεδο **καταληκτικών** κόμβων, εφόσον αυτό ήταν επιθυμητό

Η διαδικασία της σχεδίασης

- Η διαδικασία της σχεδίασης κινείται **αναδρομικά** από την κορυφή της ιεραρχίας και προς τα κάτω
- Εφαρμόζει τους αλγόριθμους σχεδίασης σε κάθε **ορατό και ικανό να σχεδιαστεί** κόμβο
- Στην **άμεση απεικόνιση** (direct rendering) και στην **παρακολύθηση ακτίνων** (ray tracing) πρώτου επιπέδου τα μαρκαρισμένα ως μη ορατά υποδένδρα **δεν** τα επισκέπτεται η διαδικασία σχεδίασης
- Κατά τη διάρκεια της σχεδίασης, **ανεξάρτητα** από την απεικονιστική μέθοδο, κάθε φορά που συναντάται ένας κόμβος μεταχηματισμού, η τρέχουσα κατάσταση των δεδομένων σχεδίασης **αλλάζει** έτσι ώστε να ακολουθεί το μετασχηματισμό

Εισαγωγή

- Παρατηρείται συνεχής επιδίωξη της απόδοσης **λεπτομέρειας** και **ρεαλισμού** τόσο στα γραφικά πραγματικού χρόνου, όσο και στα φωτορεαλιστικά γραφικά (μη πραγματικού χρόνου)
- Το ίδιο και στις **παράλληλες** εφαρμογές όπως είναι π.χ., τα παιχνίδια πολλαπλών χρηστών, η εικονική πραγματικότητα κλπ
- Έτσι έχει καταστεί αναγκαίος ο **διαμοιρασμός** των δεδομένων και του φόρτου σχεδίασης σε πολλαπλές μονάδες επεξεργασίας
- Μια μονάδα επεξεργασίας **δεν** είναι απαραίτητα ένας ξεχωριστός υπολογιστής
- Μπορεί να είναι π.χ., εξειδικευμένος **συνεπεξεργαστής** ή ένα παράλληλο **υποσύστημα γραφικών**

Εισαγωγή

- Συεπώς θα πρέπει να εξετάσουμε στη γενικότερη δυνατή περίπτωση το πρόβλημα της οργάνωσης και της διαχείρισης ενός κατανεμημένου συστήματος απεικόνισης με **παράλληλες** διεργασίες που σχεδιάζουν **τμηματικά** τον ίδιο 3Δ κόσμο
- Θα θεωρήσουμε ότι η σκηνή **δεν** βρίσκεται απαραίτητα σε διαμοιραζόμενη μνήμη
- Θα θεωρήσουμε επίσης ότι οι ρυθμοί **μετάδοσης** δεδομένων μεταξύ των μονάδων επεξεργασίας **ποικίλουν**

Εισαγωγή

- Η πράξη της σχεδίασης μιας σκηνής μπορεί να **σπάσει** με τρεις κύριους τρόπους:
  1. στο πεδίο του **χώρου**
  2. στο πεδίο του **χρόνου**
  3. στο πεδίο της **εικόνας**
- Η διαδικασία της απεικόνισης ενός καρέ της **τελικής** συνθετικής εικόνας αποτελείται από 4 στάδια
  1. **κατάτμηση**
  2. **μοίρασμα**
  3. **σχεδίαση**
  4. **σύνθεση** αποτελέσματος

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Όταν **κατανέμεται** η σχεδίαση μιας σκηνής σε μονάδες επεξεργασίας στο πεδίο του χώρου, ένα τμήμα της σκηνής **μεταφέρεται** σε κάθε μονάδα
- Σχεδιάζεται **ανεξάρτητα** και στο τέλος οι επιμέρους εικόνες **συνδυάζονται** για να σχηματιστεί το τελικό αποτέλεσμα
- Η σκηνή χωρίζεται με βάση την **ιεραρχία** του γράφου σκηνής ή της δομής **διαμέρισης** που χρησιμοποιείται
- Στη συνέχεια, τα τμήματα (υποδένδρα του γράφου σκηνής) **κατανέμονται** στις ελεύθερες μονάδες σύμφωνα με κάποιο κριτήριο και **σχεδιάζονται**
- Τα **μερικά** αποτελέσματα συγκεντρώνονται στη μονάδα-αφέντη (master unit) και **συντίθεται** η τελική εικόνα

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

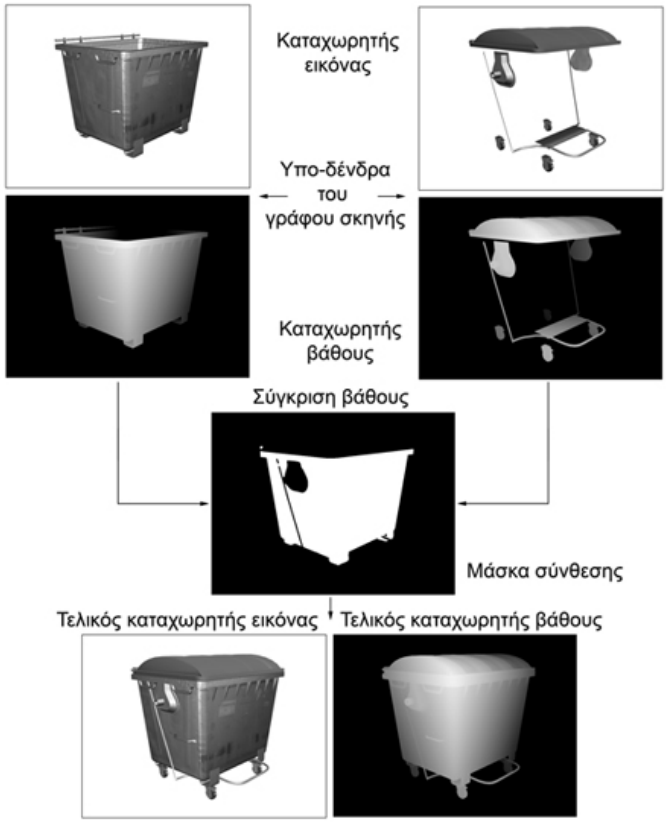
- Στην περίπτωση της άμεσης απεικόνισης, οι επιμέρους εικόνες που παράγουν οι μονάδες **δεν** διαθέτουν κάποια μορφή ταξινόμησης ως προς το **βάθος**
- Επίσης, **επικαλύπτονται** στο πεδίο της εικόνας
- Τα περιεχόμενα των καταχωρητών της εικόνας **δεν** είναι δυνατόν να **συνδυαστούν**
- Η συνήθης πρακτική είναι να **φυλάσσεται** και να **μεταδίδεται** και ο καταχωρητής βάθους στη μονάδα που αναλαμβάνει τη σύνθεση

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Μια **μονάδα** (διεργασία που σχεδιάζει την τελική εικόνα) παίζει το ρόλο της μηχανής σύνθεσης της εικόνας
- Μαζεύει **τμηματικά** αποτελέσματα σε μορφή εικόνων χρώματος και βάθους
- Επιλέγει για κάθε εικονοστοιχείο το **χρώμα** της εισερχόμενης εικόνας που συνοδεύεται από την κοντινότερη τιμή **βάθους** ως προς τον παρατηρητή
- Το χρώμα **αναμιγνύεται** στην τελική εικόνα σύμφωνα με το κανάλι διαφάνειας
- Η τεχνική αυτή αποκαλείται **κατανεμημένη απεικόνιση με μετα-ταξινόμηση**

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

Παράδειγμα κατανεμημένης άμεσης απεικόνισης με μετα-ταξινόμηση



Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Οι μέθοδοι κατανεμημένης απεικόνισης με προ-ταξινόμηση εκτελούν σε πρώτη φάση μια **διαμέριση** του τελικού πεδίου παράστασης
- Κάθε μονάδα σχεδίασης αναλαμβάνει **ένα ή περισσότερα** τμήματα
- Η σύνθεση των σχεδιασμένων κομματιών είναι **τετριμμένη** στην περίπτωση αυτών των μεθόδων καθώς τα συγκεντρωμένα κομμάια δεν έχουν καμία επικάλυψη

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Στην περίπτωση της παραγωγής **κινούμενης ταινίας** (όχι σε πραγματικό χρόνο) μια ευέλικτη και εύκολη στην υλοποίηση στρατηγική κατανεμημένης απεικόνισης είναι ο **χωρισμός** της ταινίας σε ξεχωριστά καρέ
- Κάθε καρέ ανατίθεται σε μια **μονάδα** επεξεργασίας
- Κάθε μονάδα διατηρεί ένα **πλήρες αντίγραφο** όλης της σκηνής και των εξωτερικών πηγών δεδομένων (π.χ., υφές)
- Σχεδιάζει μια **πλήρη** εικόνα και έπειτα αναλαμβάνει το **επόμενο** καρέ κ.ο.κ.

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Αυτός ο τύπος σχεδίασης είναι **τετριμμένα παράλληλος**
- **Δεν ανταλλάσσεται** καμία πληροφορία και δεν απαιτείται **κανένας συγχρονισμός**
- Το μόνο που απαιτείται είναι η αρχική **αντιγραφή** της σκηνής και η **μεταφορά** των αποτελέσματων πίσω στον εξπηρετητή της φάρμας σχεδίασης
- Αυτό το σχήμα επεκτείνεται συνήθως περισσότερο με την **κατάτμηση** της λογικής επιφάνειας της τελικής εικόνας σε περιοχές και το **μοίρασμά** τους σε διαφορετικούς υπολογιστές ή επεξεργαστές

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Οι μέθοδοι κατανεμημένης απεικόνισης με **προ-ταξινόμηση** στο πεδίο της εικόνας είναι πολύ κοινές τόσο στα γραφικά **πραγματικού** χρόνου, όσο και στις **αργές** προσομοιώσεις φωτισμού
- Τα δεδομένα της σκηνής **αντιγράφονται** σε όλες τις μονάδες ή στην περίπτωση συστήματος πολλαπλών CPU ή GPU τοποθετούνται σε κοινή θέση μνήμης που τη μοιράζονται όλες οι διεργασίες σχεδίασης
- Κάθε μονάδα αναλαμβάνει τη σχεδίαση **ενός ή περισσότερων** παραθύρων εντός της τελικής εικόνας
- Τα αποτελέσματα **συντίθενται** εύκολα με αντιγραφή των έτοιμων τμημάτων σε ένα κοινό καταχωρητή εικόνας

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Την **άμεση** σχεδίαση με χρήση πολλαπλών υποσυστημάτων γραφικών στον ίδιο υπολογιστή την αναλαμβάνει το ίδιο το hardware γραφικών
- Εντελώς διάφανα **καταμερίζει** την τελική εικόνα και **κατανέμει** το φόρτο μεταξύ των σωληνώσεων σχεδίασης που είναι διαθέσιμες χρησιμοποιώντας μια αρχιτεκτονική master-slave

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Ο τρόπος χωρισμού της εικόνας παίζει σημαντικό ρόλο στην **αποδοτικότητα** της ισοκατανομής του φορτίου
- Οι πιο κοινές μέθοδοι **κατάτμησης** είναι κατά:
  1. "**γραμμή παρά γραμμή**" σάρωσης (interlaced)
  2. **ψηφίδες** (ορθογώνιες περιοχές ή λωρίδες ή στήλες)
  3. πλήρους οθόνης με **μετατόπιση** για αντιταύτιση

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Όσο μεγαλύτερα είναι τα κομμάτια, τόσο πιο μεγάλη είναι η πιθανότητα ο φόρτος σχεδίασης **να μην είναι ισοκατανεμημένος** στις μονάδες σχεδίασης
- Ας πάρουμε ως παράδειγμα μια **σκηνή** π.χ., με
  01. άδειο ουρανό στο πάνω μέρος
  02. τοπίο με μια πόλη στο κάτω μέρος
- Αν χωρίσουμε την εικόνα σε δύο **οριζόντιες λωρίδες**, η πάνω θα έχει σχεδόν **μηδενικό** φορτίο, ενώ η κάτω θα πρέπει να σχεδιάσει **όλα** τα πολύγωνα της σκηνής
- Μια διαμέριση που θα χώριζε την εικόνα σε **άρτιες και περιττές** γραμμές (ή στήλες) θα εξασφάλιζε βέλτιστη κατανομή φορτίου
- Αρκεί να μην έσπαγε την εικονα σε **υπερβολικά** πολλά τμήματα

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Στην απεικόνιση πραγματικού χρόνου, ένας άλλος σοβαρός παράγοντας επιλογής στρατηγικής διαμέρισης της εικόνας είναι η **επαυξητική** μορφή που έχει η διαδικασία σχεδίασης πολυγώνων και άλλων σχημάτων
- Τα διάφορα στάδια σχεδίασης του συστήματος γραφικών ευνοούνται από τη **χωρική συνάφεια** και την **ομοιόμορφη δειγματοληψία** των σχημάτων
- Π.χ., η σχεδίαση κατά άρτιες και περιττές γραμμές σάρωσης **δε μεταβάλλει σημαντικά** τη σάρωση κατά γραμμές (ο απαριθμητής των γραμμών αυξάνει κατά 2 αντί για 1)

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Όταν χρησιμοποιούμε μετα-φιλτράρισμα ως τεχνική αντιταύτισης μια τεχνική παραλληλίας είναι η κατανομή της πράξης του συγκερασμού στις **μονάδες επεξεργασίας**
- Κάθε μονάδα σχεδιάζει την **πλήρη** εικόνα
- Χρειάζονται τόσες μονάδες όσα και τα **δείγματα** που παίρνουμε
- Σε κάθε μονάδα, το κέντρο του κάθε εικονοστοιχείου έχει **διαφορετική** μετατόπιση, όση και αυτή του δείγματος
- Για το σχηματισμό του εικονοστοιχείου της τελικής εικόνας, **ζυγίζονται** με κατάλληλα βάρη τα αντίστοιχα εικονοστοιχεία των επιμέρους εικόνων που προστίθενται

Μηχανισμοί κατανεμημένης σχεδίασης

- Τέλος, για συστήματα με **πολλαπλές** εξόδους γραφικών ακολουθείται μια λογική **προ-ταξινόμησης** στο πεδίο της εικόνας
- Ο χωρισμός γίνεται σε επίπεδο **πεδίου παρατήρησης** και δε χρειάζεται σύνθεση εικόνας στο τέλος
- Κάθε κόμβος μπορεί π.χ., να κρατάει ένα **πλήρες αντίγραφο** του 3Δ κόσμου και να σχεδιάζει ένα διαφορετικό **παράθυρο** που "βλέπει" μέσα στο εικονικό περιβάλλον
- Είναι εφικτό να απαιτείται αναμεσα σε κόμβους **μόνο** η μετάδοση σημάτων **συγχρονισμού** και δεδομένων **εισόδου** από το χρήστη