# Μαθηματικά Πληροφορικής

## 3ο Μάθημα

Ηλίας Κουτσουπιάς

Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών
Πανεπιστήμιο Αθηνών
elias@@di.uoa.gr

Νοέμβριος 2011

# Γενικό πλάνο


1. Παράδειγμα δομικής επαγωγής
2. Ορισμός δομικής επαγωγής
3. Συμβολοσειρές
4. Γλώσσες
5. Δυαδικά δένδρα

# Δομική επαγωγή

- Η ιδέα της μαθηματικής επαγωγής μπορεί να επεκταθεί και σε άλλες δομές εκτός από το σύνολο των φυσικών $\mathbb{N}$.
- Μπορούμε να μιμηθούμε τον επαγωγικό ορισμό του συνόλου των φυσικών για να ορίσουμε αναδρομικά νέες δομές στις οποίες μπορούμε να κάνουμε επαγωγή.

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{\}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{3\}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{3, 6\}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{3, 6, 9, 12\}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24\}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, \ldots\}$
- Ποιό είναι το σύνολο $S$;

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ορίζουμε ένα σύνολο $S$ ως εξής:
  Βάση του ορισμού: $3 \in S$
  Επαγωγικός ορισμός: Αν $x, y \in S$ τότε και $x + y \in S$
- $S = \{3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, \ldots\}$
- Ποιό είναι το σύνολο $S$;
- Διαισθητικά, το $S$ περιέχει τα πολλαπλάσια του 3. Πως το αποδεικνύουμε;

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού (συνέχ.)

- Έστω $A$ το σύνολο των πολλαπλασίων του 3, που ορίζεται περιγραφικά:
$$A = \{3n \ : \ n \in N\}.$$
- Θέλουμε να δείξουμε ότι τα δυο σύνολα είναι ίσα, $A = S$.
  - $A \subseteq S$, δηλαδή ότι κάθε θετικό πολλαπλάσιο του 3 ανήκει στο $S$. Θα το κάνουμε με μαθηματική επαγωγή.
  - $S \subseteq A$, δηλαδή ότι κάθε αριθμός που παράγεται με τους παραπάνω κανόνες, είναι πολλαπλάσιο του 3. Θα το κάνουμε με δομική επαγωγή.

# Απόδειξη του $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{S}$

**Απόδειξη.**

- Θα δείξουμε με μαθηματική επαγωγή ότι για κάθε $n$ ισχύει ότι $3n \in S$.

$\square$

# Απόδειξη του $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{S}$

## Απόδειξη.

- Θα δείξουμε με μαθηματική επαγωγή ότι για κάθε $n$ ισχύει ότι $3n \in S$.
- Βάση της επαγωγής: Επιβεβαιώνουμε ότι $3 \in S$ από τη βάση του ορισμού του συνόλου $S$.

□

# Απόδειξη του $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{S}$

## Απόδειξη.

- Θα δείξουμε με μαθηματική επαγωγή ότι για κάθε $n$ ισχύει ότι $3n \in S$.
- Βάση της επαγωγής: Επιβεβαιώνουμε ότι $3 \in S$ από τη βάση του ορισμού του συνόλου $S$.
- Επαγωγικό βήμα: Έστω ότι $3n \in S$. Θα δείξουμε ότι $3(n+1) \in S$.

$\square$

# Απόδειξη του $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{S}$

**Απόδειξη.**

- Θα δείξουμε με μαθηματική επαγωγή ότι για κάθε $n$ ισχύει ότι $3n \in S$.
- Βάση της επαγωγής: Επιβεβαιώνουμε ότι $3 \in S$ από τη βάση του ορισμού του συνόλου $S$.
- Επαγωγικό βήμα: Έστω ότι $3n \in S$. Θα δείξουμε ότι $3(n+1) \in S$.
    - Παρατηρούμε ότι $3 \in S$, και $3n \in S$.

□

# Απόδειξη του $\mathbf{A} \subseteq \mathbf{S}$

**Απόδειξη.**

- Θα δείξουμε με μαθηματική επαγωγή ότι για κάθε $n$ ισχύει ότι $3n \in S$.
- Βάση της επαγωγής: Επιβεβαιώνουμε ότι $3 \in S$ από τη βάση του ορισμού του συνόλου $S$.
- Επαγωγικό βήμα: ΄Εστω ότι $3n \in S$. Θα δείξουμε ότι $3(n+1) \in S$.
  - Παρατηρούμε ότι $3 \in S$, και $3n \in S$.
  - ’ρα $3 + 3n \in S$.

$\square$

# Απόδειξη του $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{A}$

## Δομική Επαγωγή.

- Θα δείξουμε ότι και οι δύο κανόνες που παράγουν στοιχεία του $S$ παράγουν πολλαπλάσια του 3.

$\square$

# Απόδειξη του $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{A}$

## Δομική Επαγωγή.

- Θα δείξουμε ότι και οι δύο κανόνες που παράγουν στοιχεία του $S$ παράγουν πολλαπλάσια του 3.
- Βάση δομικής επαγωγής: Η βάση του ορισμού παράγει μόνο ένα στοιχείο, το 3, που είναι πολλαπλάσιο του 3.

$\square$

# Απόδειξη του $\mathbf{S} \subseteq \mathbf{A}$

**Δομική Επαγωγή.**

- Θα δείξουμε ότι και οι δύο κανόνες που παράγουν στοιχεία του $S$ παράγουν πολλαπλάσια του 3.
- Βάση δομικής επαγωγής: Η βάση του ορισμού παράγει μόνο ένα στοιχείο, το 3, που είναι πολλαπλάσιο του 3.
- Επαγωγικό βήμα: Αν $x, y \in S$ με $x, y$ πολλαπλάσια του 3, αρκεί να δείξουμε ότι $x + y$ είναι επίσης πολλαπλάσιο του 3.
  Αυτό όμως είναι εύκολο (προφανές).

$\square$

# Δομική επαγωγή

## Ορισμός (Δομική επαγωγή)

Έστω σύνολο ή δομή $\Delta$ που ορίζεται επαγωγικά. Για να αποδείξουμε μια ιδιότητα $P$ για κάθε στοιχείο του συνόλου $\Delta$ αρκεί να ακολουθήσουμε τα επόμενα βήματα:

- Βάση της επαγωγής: Αποδεικνύουμε ότι τα στοιχεία του συνόλου $\Delta$ που ορίζονται στο βήμα *Βάση του ορισμού* του έχουν την ιδιότητα.
- Επαγωγικό βήμα: Θεωρούμε ότι σε κάποιο βήμα της κατασκευής του $\Delta$, τα στοιχεία του έχουν την ιδιότητα. Αποδεικνύουμε ότι αν τα στοιχεία του $\Delta$ έχουν την ιδιότητα $P$, τότε και τα νέα στοιχεία που ορίζονται στο *επαγωγικό βήμα* του ορισμού του $\Delta$ έχουν την ιδιότητα.

# Αλφάβητο

## Ορισμός

Αλφάβητο είναι ένα οποιοδήποτε πεπερασμένο σύνολο.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (Παραδείγματα)

- $G = \{\alpha, \beta, \ldots, \omega\}$
- $D = \{0, 1, \ldots, 9\}$

# Συμβολοσειρές

## Ορισμός

Οι πεπερασμένες ακολουθίες των συμβόλων (δηλαδή των στοιχείων) ενός αλφαβήτου λέγονται συμβολοσειρές. Το σύνολο των συμβολοσειρών ενός αλφαβήτου $\Sigma$ συμβολίζεται με $\Sigma^*$.
Η κενή συμβολοσειρά συμβολίζεται με $\epsilon$.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (Παραδείγματα συμβολοσειρών)

- Η συμβολοσειρά $(\epsilon, \upsilon, \rho, \eta, \kappa, \alpha)$ του αλφαβήτου $\Sigma = \{\alpha, \beta, \ldots, \omega\}$. Για απλότητα παραλείπουμε παρενθέσεις και κόμματα και γράφουμε $\epsilon\upsilon\rho\eta\kappa\alpha$.
- Η συμβολοσειρές του αλφαβήτου $D = \{0, 1, \ldots, 9\}$ είναι

$$D^* = \{\epsilon, 0, 1, \ldots, 9, 00, 01, \ldots, 99, 000, 001, \ldots\}$$

# Αναδρομικός ορισμός συμβολοσειρών

**Ορισμός (Σύνολο συμβολοσειρών $\Sigma^*$ αλφάβητου $\Sigma$)**

- Βάση του ορισμού: Η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$ ανήκει στο $\Sigma^*$, $\epsilon \in \Sigma^*$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w \in \Sigma^*$ και $\sigma \in \Sigma$ τότε $w\sigma \in \Sigma^*$.

# Μήκος συμβολοσειράς

## Ορισμός (Μήκος $\ell$ συμβολοσειράς)

- Βάση του ορισμού: Ορίζουμε $\ell(\epsilon) = 0$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w \in \Sigma^*$ και $\sigma \in \Sigma$ ορίζουμε $\ell(w\sigma) = \ell(w) + 1$.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- $\ell(\epsilon\upsilon\rho\eta\kappa\alpha) = 6$
- $\ell(010) = 3$

# Παράθεση δύο συμβολοσειρών

## Ορισμός (Παράθεση δύο συμβολοσειρών)

- Βάση του ορισμού: Αν $w \in \Sigma^*$ ορίζουμε $w \cdot \epsilon = w$
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w_1, w_2 \in \Sigma^*$ και $\sigma \in \Sigma$ ορίζουμε $w_1 \cdot (w_2\sigma) = (w_1 \cdot w_2)\sigma$

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- $\epsilon\upsilon \cdot \rho\eta\kappa\alpha = \epsilon\upsilon\rho\eta\kappa\alpha$
- $010 \cdot 00 = 01000$

# Μήκος παράθεσης δυο συμβολοσειρών

## Πρόταση

*Για κάθε συμβολοσειρές* $x, y \in \Sigma^*$ *ισχύει ότι* $\ell(x \cdot y) = \ell(x) + \ell(y)$.

## Απόδειξη.

- Με δομική επαγωγή. Θεωρούμε τη συμβολοσειρά $x$ σταθερά.
- Βάση της επαγωγής: $y = \epsilon$. Έχουμε $\ell(x \cdot \epsilon) = \ell(x) + \ell(\epsilon)$.
- Επαγωγικό βήμα:

$$\begin{aligned}
\ell(x \cdot (y\sigma)) &= \ell((x \cdot y)\sigma) && \text{από τον ορισμό της παράθεσης} \\
&= \ell(x \cdot y) + 1 && \text{από τον ορισμό του μήκους} \\
&= (\ell(x) + \ell(y)) + 1 && \text{από την επαγωγική υπόθεση} \\
&= \ell(x) + (\ell(y) + 1) && \\
&= \ell(x) + \ell(y\sigma) && \text{από τον ορισμό του μήκους.}
\end{aligned}$$

□

# Γλώσσες

## Ορισμός

Έστω $\Sigma$ ένα αλφάβητο. Τα υποσύνολα των συμβολοσειρών του $\Sigma$ ονομάζονται γλώσσες.

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (Παραδείγματα γλωσσών)

- Η γλώσσα της δεκαδικής παράστασης των περιττών αριθμών: {1, 3, 5, 7,...}. Το αλφάβητο είναι το $\Sigma = \{0, 1, \ldots, 9\}$.
- Η γλώσσα της δυαδικής παράστασης των περιττών αριθμών: {1, 11, 101, 111,...}. Το αλφάβητο είναι το $\Sigma = \{0, 1, \ldots, 9\}$ ή το $\Sigma = \{0, 1\}$.
- Οι δυο γλώσσες είναι διαφορετικές. Τα στοιχεία των γλωσσών αυτών είναι συμβολοσειρές, όχι αριθμοί.
- 'λλο είναι το σύνολο των περιττών αριθμών και άλλο είναι το σύνολο της δεκαδικής παράστασης των περιττών αριθμών.

# Παραδείγματα γλωσσών (συνέχ.)

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (Παραδείγματα γλωσσών)

- Η γλώσσα των λέξεων της Ελληνικής γλώσσας: {αβαείο, αβάθεια, ..., ωώδης}. Το αλφάβητο είναι {α, ά, ..., ώ}.
- Η γλώσσα των συντακτικά ορθών προγραμμάτων της γλώσσας C. Το αλφάβητο είναι οι λατινικοί χαρακτήρες και κάποια επιπλέον σύμβολα όπως οι παρενθέσεις, τα σύμβολα των αριθμητικών πράξεων κλπ.
- Η γλώσσα των προγραμμάτων της γλώσσας C που υπολογίζουν ορθά αν η είσοδος είναι ένας πρώτος αριθμός (στο δεκαδικό σύστημα).

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού γλώσσας

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ας ορίσουμε μια γλώσσα $L$ του αλφαβήτου $\{0, 1\}$ ως εξής:
- Βάση του ορισμού: Η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$ ανήκει στη γλώσσα $L$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w, v \in L$ τότε και οι συμβολοσειρές
  - $0w1v$
  - $1w0v$

  ανήκουν στη γλώσσα $L$.
- Ποιές συμβολοσειρές ανήκουν στην γλώσσα $L$;
- $L = \{ \quad \}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού γλώσσας

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ας ορίσουμε μια γλώσσα $L$ του αλφαβήτου $\{0, 1\}$ ως εξής:
- Βάση του ορισμού: Η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$ ανήκει στη γλώσσα $L$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w, v \in L$ τότε και οι συμβολοσειρές
  - $0w1v$
  - $1w0v$

  ανήκουν στη γλώσσα $L$.
- Ποιές συμβολοσειρές ανήκουν στην γλώσσα $L$;
- $L = \{ \epsilon \quad \}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού γλώσσας

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ας ορίσουμε μια γλώσσα $L$ του αλφαβήτου $\{0, 1\}$ ως εξής:
- Βάση του ορισμού: Η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$ ανήκει στη γλώσσα $L$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w, v \in L$ τότε και οι συμβολοσειρές
  - $0w1v$
  - $1w0v$

  ανήκουν στη γλώσσα $L$.
- Ποιές συμβολοσειρές ανήκουν στην γλώσσα $L$;
- $L = \{ \epsilon , 01, 10 \quad \}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού γλώσσας

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ας ορίσουμε μια γλώσσα $L$ του αλφαβήτου $\{0, 1\}$ ως εξής:
- Βάση του ορισμού: Η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$ ανήκει στη γλώσσα $L$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w, v \in L$ τότε και οι συμβολοσειρές
  - $0w1v$
  - $1w0v$

  ανήκουν στη γλώσσα $L$.
- Ποιές συμβολοσειρές ανήκουν στην γλώσσα $L$;
- $L = \{\ \epsilon\ ,\ 01,\ 10\ ,\ 0011,\ 0101,\ 0110,\ 1001,\ 1010,\ 1100\ \ \}$

# Παράδειγμα αναδρομικού ορισμού γλώσσας

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ

- Ας ορίσουμε μια γλώσσα $L$ του αλφαβήτου $\{0, 1\}$ ως εξής:
- Βάση του ορισμού: Η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$ ανήκει στη γλώσσα $L$.
- Επαγωγικός ορισμός: Αν $w, v \in L$ τότε και οι συμβολοσειρές
    - $0w1v$
    - $1w0v$

  ανήκουν στη γλώσσα $L$.
- Ποιές συμβολοσειρές ανήκουν στην γλώσσα $L$;
- $L = \{\ \epsilon$ , 01, 10 , 0011, 0101, 0110, 1001, 1010, 1100 , 000111, 001011, 001101, 001110, $\ldots\ \}$

# Παράδειγμα γλώσσας (συνέχ.)

## Πρόταση

*Κάθε συμβολοσειρά $u$ της γλώσσας $L$ έχει ίσο αριθμό από 0 και 1.*

## Απόδειξη.

- $n_0(u)$ = αριθμός 0 στην $u$
- $n_1(u)$ = αριθμός 1 στην $u$
- Θέλουμε να δείξουμε $n_0(u) = n_1(u)$ για κάθε $u \in L$.

- Με δομική επαγωγή.
- Βάση της επαγωγής: $n_0(\epsilon) = n_1(\epsilon) = 0$.
- Επαγωγικό βήμα:
  - Επαγωγική υπόθεση $n_0(w) = n_1(w)$ και $n_0(v) = n_1(v)$.
  - Έχουμε $n_0(0w1v) = n_0(w) + n_0(v) + 1$
  - Έχουμε $n_1(0w1v) = n_1(w) + n_1(v) + 1$
  - 'ρα $n_0(0w1v) = n_1(0w1v)$
  - Με τον ίδιο τρόπο προκύπτει $n_0 1w0v) = n_1(1w0v)$,

□

# Παράδειγμα γλώσσας (συνέχ.)

## Πρόταση

*Κάθε συμβολοσειρά του αλφαβήτου $\{0, 1\}$ με ίσο αριθμό από 0 και 1 ανήκει στη γλώσσα L.*

## Απόδειξη.

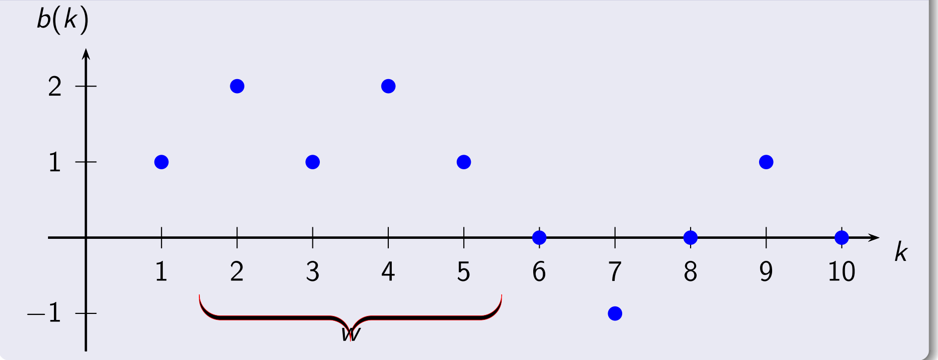
Με ισχυρή μαθηματική επαγωγή στο μήκος της συμβολοσειράς.
Βάση της επαγωγής: Αν η συμβολοσειρά έχει μήκος 0, δηλαδή είναι η κενή συμβολοσειρά $\epsilon$, ανήκει στη γλώσσα $L$.
Επαγωγικό βήμα:

- Υποθέτουμε ότι κάθε συμβολοσειρά με μήκος το πολύ $n$ που έχει ίσο αριθμό από 0 και 1 ανήκει στη γλώσσα $L$.
- Έστω μια συμβολοσειρά $u$ με μήκος $n + 1$ και ίσο αριθμό από 0 και 1.
- Λόγω συμμετρίας υποθέτουμε ότι η συμβολοσειρά $u$ αρχίζει με 0.
- Θέλουμε να δείξουμε ότι υπάρχουν $w$ και $v$ τέτοια ώστε $u = 0w1v$.

# Απόδειξη

Έστω ότι $b(k)$ συμβολίζει τη διαφορά του αριθμού των 0 και του αριθμού των 1 στα πρώτα $k$ σύμβολα της συμβολοσειράς $u$.

**Η συνάρτηση $b(k)$ για $u = 0010111001$**




$$u = 0010111001 = 0010111001$$

# Αναδρομικός ορισμός κανονικών δυαδικών δένδρων

**Ορισμός (Κανονικά δυαδικά δένδρα με ρίζα ενός συνόλου $U$)**

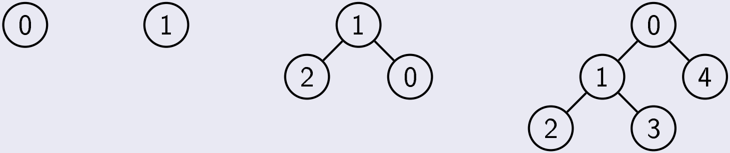
Βάση του ορισμού: Κάθε στοιχείο $v$ του $U$ είναι δυαδικό δένδρο $T = (v)$. Θα λέμε ότι το δένδρο αυτό έχει ρίζα το $v$, σύνολο κόμβων το $\{v\}$, και ύψος $h(T) = 0$.

Επαγωγικός ορισμός: Έστω $T_1$, $T_2$ είναι δένδρα με σύνολα κόμβων ξένα μεταξύ τους και με ρίζες $r_1, r_2$ αντίστοιχα. Έστω επίσης $r$ ένα στοιχείο του $U$, που δεν ανήκει στους κόμβους των δένδρων $T_1$, $T2$.

- Ορίζουμε το δένδρο $T = (r, \{T_1, T_2\})$ με ρίζα το $r$.
- Το σύνολο των κόμβων του $T$ είναι όλοι οι κόμβοι των $T_1$, $T_2$ μαζί με το $r$.
- Το ύψος $h(T)$ του δένδρου $T$ ορίζεται σαν $1 + \max\{h(T_1), h(T_2)\}$.

# Παραδείγματα δένδρων

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (Παραδείγματα δένδρων)



# Ύψος κανονικών δυαδικών δένδρων

## Πρόταση

*Για κάθε κανονικό δυαδικό δένδρο $T$ ισχύει ότι το πλήθος των κόμβων του $n(T)$ είναι το πολύ $2^{h(T)+1} - 1$.*

## Απόδειξη.

- Βάση δομικής επαγωγής: Αν το δένδρο αποτελείται μόνο από τη ρίζα του, έχει εξ' ορισμού ύψος 0 και ένα κόμβο· η πρόταση προφανώς ισχύει.
- Επαγωγικό βήμα: Έστω δυαδικό δένδρο $T$ με δύο υποδένδρα $T_1$ και $T_2$. Εξ' ορισμού, οι κόμβοι του $T$ είναι οι κόμβοι του $T_1$, οι κόμβοι του $T_2$, και η ρίζα του $T$. 'ρα ο αριθμός των κόμβων του είναι $n(T) = n(T_1) + n(T_2) + 1$. Επίσης εξ' ορισμού, το ύψος του είναι $h(T) = 1 + \max\{h(T_1), h(T_2)\}$.
- Επαγωγική υπόθεση: $n(T_1) \leq 2^{h(T_1)+1} - 1$ και $n(T_2) \leq 2^{h(T_2)+1} - 1$.

$\square$

# Ύψος κανονικών δυαδικών δένδρων (συνέχ.)

## Συνέχ.

$$
\begin{aligned}
n(T) &= n(T_1) + n(T_2) + 1 \\
&\leq (2^{h(T_1)+1} - 1) + (2^{h(T_2)+1} - 1) + 1 \\
&= 2^{h(T_1)+1} + 2^{h(T_2)+1} - 1 \\
&\leq 2 \cdot \max\{2^{h(T_1)+1}, 2^{h(T_2)+1}\} - 1 \\
&= 2 \cdot 2^{\max\{h(T_1)+1, h(T_2)+1\}} - 1 \\
&= 2 \cdot 2^{\max\{h(T_1), h(T_2)\}+1} - 1 \\
&= 2 \cdot 2^{h(T)} - 1 \\
&= 2^{h(T)+1} - 1
\end{aligned}
$$

$\square$