

Manuel Di Agostino

manuel.diagostino@studenti.unipr.it

UniPR

Università di Parma

21 ottobre 2025

Tutorato di Logica

1 Principio d'induzione

Definizione (Principio d'induzione)

Siano $A \subseteq \mathbb{N}$ e $S : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ la funzione successore. Se

- $0 \in A$
- $\forall a \in A. (S(a) \in A)$

allora $A = \mathbb{N}$.

- **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.

- **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.
- **Perché funziona?**

- **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.
- **Perché funziona?**
 - » Sia p un certo predicato unario con dominio in \mathbb{N} e sia $P = \{x \in \mathbb{N} \mid "p(x) \text{ è vero}\"\}$ l'insieme degli interi per cui esso è verificato. Se dimostro che $P = \mathbb{N}$, posso affermare che p è vero $\forall n \in \mathbb{N}$.

- **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.
- **Perché funziona?**
 - » Sia p un certo predicato unario con dominio in \mathbb{N} e sia $P = \{x \in \mathbb{N} \mid "p(x) \text{ è vero}\"\}$ l'insieme degli interi per cui esso è verificato. Se dimostro che $P = \mathbb{N}$, posso affermare che p è vero $\forall n \in \mathbb{N}$.
 - » Verifco che $0 \in P \Leftrightarrow "p(0) \text{ è vero}"$.

- **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.
- **Perché funziona?**
 - » Sia p un certo predicato unario con dominio in \mathbb{N} e sia $P = \{x \in \mathbb{N} \mid "p(x) \text{ è vero}\"\}$ l'insieme degli interi per cui esso è verificato. Se dimostro che $P = \mathbb{N}$, posso affermare che p è vero $\forall n \in \mathbb{N}$.
 - » Verifco che $0 \in P \Leftrightarrow "p(0) \text{ è vero}"$.
 - » Verifco che $\forall n.(n \in P \Rightarrow n + 1 \in P)$, che per definizione di P equivale a dire che $\forall n.(p(n) \Rightarrow p(n + 1))$.

- **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.
- **Perché funziona?**
 - » Sia p un certo predicato unario con dominio in \mathbb{N} e sia $P = \{x \in \mathbb{N} \mid "p(x) \text{ è vero}\"\}$ l'insieme degli interi per cui esso è verificato. Se dimostro che $P = \mathbb{N}$, posso affermare che p è vero $\forall n \in \mathbb{N}$.
 - » Verifco che $0 \in P \Leftrightarrow "p(0) \text{ è vero}"$.
 - » Verifco che $\forall n.(n \in P \Rightarrow n + 1 \in P)$, che per definizione di P equivale a dire che $\forall n.(p(n) \Rightarrow p(n + 1))$.
 - » A questo punto, poiché vale il **principio di induzione**, posso affermare che $P = \mathbb{N}$. Per definizione di P , questo equivale a dire che $\forall n \in \mathbb{N}. ("p(x) \text{ è vero})$.

- › **Perché è utile?** Ci permette di dimostrare che una certa proprietà è valida per tutti i numeri naturali.
- › **Perché funziona?**
 - » Sia p un certo predicato unario con dominio in \mathbb{N} e sia $P = \{x \in \mathbb{N} \mid "p(x) \text{ è vero}\"\}$ l'insieme degli interi per cui esso è verificato. Se dimostro che $P = \mathbb{N}$, posso affermare che p è vero $\forall n \in \mathbb{N}$.
 - » Verifco che $0 \in P \Leftrightarrow "p(0) \text{ è vero}"$.
 - » Verifco che $\forall n.(n \in P \Rightarrow n + 1 \in P)$, che per definizione di P equivale a dire che $\forall n.(p(n) \Rightarrow p(n + 1))$.
 - » A questo punto, poiché vale il **principio di induzione**, posso affermare che $P = \mathbb{N}$. Per definizione di P , questo equivale a dire che $\forall n \in \mathbb{N}. ("p(x) \text{ è vero})$.

Notate che non ho specificato nulla sul predicato p .

Esercizio 1

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$ vale

$$\sum_{i=0}^n 2i = 0 + 2 + 4 + \dots + 2n = n \cdot (n + 1) \quad (1)$$

Esercizio 1

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$ vale

$$\sum_{i=0}^n 2i = 0 + 2 + 4 + \dots + 2n = n \cdot (n + 1) \quad (1)$$

Soluzione dell'esercizio 1

In questo caso, possiamo considerare

$p(x)$ = “la somma dei primi x numeri interi pari è data da (1)”

Esercizio 1

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$ vale

$$\sum_{i=0}^n 2i = 0 + 2 + 4 + \dots + 2n = n \cdot (n + 1) \quad (1)$$

Soluzione dell'esercizio 1

In questo caso, possiamo considerare

$p(x)$ = “la somma dei primi x numeri interi pari è data da (1)”

Quindi:

- verifico che valga $p(0)$:

$$p(0) \Leftrightarrow \sum_{i=0}^0 = 0 = 0 \cdot (0 + 1).$$

- ora devo verificare che se $p(n)$ vero per un certo n , allora $p(n + 1)$ è vero. Scriviamo cos'è $p(n + 1)$:

$$p(n + 1) \equiv \sum_{i=0}^{n+1} 2i = (n + 1) \cdot (n + 2)$$

- › ora devo verificare che se $p(n)$ vero per un certo n , allora $p(n + 1)$ è vero. Scriviamo cos'è $p(n + 1)$:

$$p(n + 1) \equiv \sum_{i=0}^{n+1} 2i = (n + 1) \cdot (n + 2)$$

Supponiamo allora $p(n)$ e osserviamo che:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{n+1} 2i &= \sum_{i=0}^n 2i + 2(n + 1) \\ &= n(n + 1) + 2(n + 1) \quad (\text{ip. induttiva}) \\ &= (n + 1) \cdot (n + 2). \quad (\text{prop. distributiva}). \end{aligned}$$

- › ora devo verificare che se $p(n)$ vero per un certo n , allora $p(n + 1)$ è vero. Scriviamo cos'è $p(n + 1)$:

$$p(n + 1) \equiv \sum_{i=0}^{n+1} 2i = (n + 1) \cdot (n + 2)$$

Supponiamo allora $p(n)$ e osserviamo che:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{n+1} 2i &= \sum_{i=0}^n 2i + 2(n + 1) \\ &= n(n + 1) + 2(n + 1) \quad (\text{ip. induttiva}) \\ &= (n + 1) \cdot (n + 2). \quad (\text{prop. distributiva}). \end{aligned}$$

il che equivale a dire che $p(n) \Rightarrow p(n + 1)$.

- › ora devo verificare che se $p(n)$ vero per un certo n , allora $p(n + 1)$ è vero. Scriviamo cos'è $p(n + 1)$:

$$p(n + 1) \equiv \sum_{i=0}^{n+1} 2i = (n + 1) \cdot (n + 2)$$

Supponiamo allora $p(n)$ e osserviamo che:

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^{n+1} 2i &= \sum_{i=0}^n 2i + 2(n + 1) \\ &= n(n + 1) + 2(n + 1) \quad (\text{ip. induttiva}) \\ &= (n + 1) \cdot (n + 2). \quad (\text{prop. distributiva}). \end{aligned}$$

il che equivale a dire che $p(n) \Rightarrow p(n + 1)$.

Per il principio di induzione, (1) è vera $\forall n \in \mathbb{N}$.



Esercizio 2

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ vale:

$$\sum_{i=1}^n 2i - 1 = 1 + 3 + 5 + \dots + (2n - 1) = n^2 \quad (2)$$

Esercizio 2

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ vale:

$$\sum_{i=1}^n 2i - 1 = 1 + 3 + 5 + \dots + (2n - 1) = n^2 \quad (2)$$

Soluzione dell'esercizio 2

- caso base, stavolta $n = 1$:

$$\sum_{i=1}^1 2i - 1 = 2 - 1 = 1 = (1)^2.$$

- passo induttivo, suppongo che per un qualche intero n valga (2); allora:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n+1} 2i - 1 &= \sum_{i=1}^n 2i - 1 + [2(n+1) - 1] \quad (\text{ip. induttiva}) \\ &= n^2 + 2n + 1 \\ &= (n+1)^2.\end{aligned}$$

- passo induttivo, suppongo che per un qualche intero n valga (2); allora:

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^{n+1} 2i - 1 &= \sum_{i=1}^n 2i - 1 + [2(n+1) - 1] \quad (\text{ip. induttiva}) \\ &= n^2 + 2n + 1 \\ &= (n+1)^2.\end{aligned}$$

Per il principio di induzione, $\forall n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ vale: (2). □

Esercizio 3

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$ e per ogni $x \in \mathbb{R}$ con $x > -1$, vale la **diseguaglianza di Bernoulli**:

$$(1 + x)^n \geq 1 + nx \quad (3)$$

Esercizio 3

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$ e per ogni $x \in \mathbb{R}$ con $x > -1$, vale la **diseguaglianza di Bernoulli**:

$$(1 + x)^n \geq 1 + nx \quad (3)$$

Soluzione dell'esercizio 3

Sia $p(n)$ il predicato (3).

➤ caso base, $n = 0$:

$$p(0) \Leftrightarrow (1 + x)^0 = 1 \quad \geq \quad 1 + (0 \cdot x) = 1.$$

$p(0)$ è vera (vale $1 \geq 1$).

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva):
$$(1 + x)^n \geq 1 + nx.$$

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva):
 $(1 + x)^n \geq 1 + nx$. Dobbiamo dimostrare $p(n + 1)$, cioè
 $(1 + x)^{n+1} \geq 1 + (n + 1)x$.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva):
 $(1 + x)^n \geq 1 + nx$. Dobbiamo dimostrare $p(n + 1)$, cioè
 $(1 + x)^{n+1} \geq 1 + (n + 1)x$.
- Sviluppiamo il lato sinistro:

$$\begin{aligned}(1 + x)^{n+1} &= (1 + x)^n \cdot (1 + x) \\&\geq (1 + nx)(1 + x) \quad (\text{ip. induttiva e } 1 + x > 0) \\&= 1 + x + nx + nx^2 \\&= 1 + (n + 1)x + nx^2 \quad (\text{raggruppo}) \\&\geq 1 + (n + 1)x \quad (n, x^2 \geq 0 \Rightarrow nx^2 \geq 0)\end{aligned}$$

- Abbiamo dimostrato che $(1 + x)^{n+1} \geq 1 + (n + 1)x$.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva):
 $(1 + x)^n \geq 1 + nx$. Dobbiamo dimostrare $p(n + 1)$, cioè
 $(1 + x)^{n+1} \geq 1 + (n + 1)x$.
- Sviluppiamo il lato sinistro:

$$\begin{aligned}(1 + x)^{n+1} &= (1 + x)^n \cdot (1 + x) \\&\geq (1 + nx)(1 + x) \quad (\text{ip. induttiva e } 1 + x > 0) \\&= 1 + x + nx + nx^2 \\&= 1 + (n + 1)x + nx^2 \quad (\text{raggruppo}) \\&\geq 1 + (n + 1)x \quad (n, x^2 \geq 0 \Rightarrow nx^2 \geq 0)\end{aligned}$$

- Abbiamo dimostrato che $(1 + x)^{n+1} \geq 1 + (n + 1)x$.
Per il principio di induzione, (3) è vera $\forall n \in \mathbb{N}$. □

Esercizio 4

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$, l'espressione $n^3 - n$ è divisibile per 3.

Esercizio 4

Dimostrare per induzione che $\forall n \in \mathbb{N}$, l'espressione $n^3 - n$ è divisibile per 3.

Soluzione dell'esercizio 4

Sia $p(n) = "n^3 - n \text{ è divisibile per } 3"$.

- caso base, $n = 0$:

$$p(0) \Leftrightarrow 0^3 - 0 = 0.$$

Poiché $0 = 3 \cdot 0$, $p(0)$ è vera.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva), cioè $\exists k \in \mathbb{Z}$ tale che $n^3 - n = 3k$.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva), cioè $\exists k \in \mathbb{Z}$ tale che $n^3 - n = 3k$.
- Dobbiamo dimostrare $p(n + 1)$, cioè che $(n + 1)^3 - (n + 1)$ è divisibile per 3.

$$\begin{aligned}(n + 1)^3 - (n + 1) &= (n^3 + 3n^2 + 3n + 1) - (n + 1) \\&= n^3 + 3n^2 + 3n + 1 - n - 1 \\&= (n^3 - n) + (3n^2 + 3n) && \text{(raggruppo)} \\&= 3k + 3(n^2 + n) && \text{(ip. induttiva)} \\&= 3 \cdot (k + n^2 + n)\end{aligned}$$

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva), cioè $\exists k \in \mathbb{Z}$ tale che $n^3 - n = 3k$.
- Dobbiamo dimostrare $p(n + 1)$, cioè che $(n + 1)^3 - (n + 1)$ è divisibile per 3.

$$\begin{aligned}(n + 1)^3 - (n + 1) &= (n^3 + 3n^2 + 3n + 1) - (n + 1) \\&= n^3 + 3n^2 + 3n + 1 - n - 1 \\&= (n^3 - n) + (3n^2 + 3n) && \text{(raggruppo)} \\&= 3k + 3(n^2 + n) && \text{(ip. induttiva)} \\&= 3 \cdot (k + n^2 + n)\end{aligned}$$

- Poiché $(k + n^2 + n)$ è un numero intero, abbiamo mostrato che $(n + 1)^3 - (n + 1)$ è un multiplo di 3.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ipotesi induttiva), cioè $\exists k \in \mathbb{Z}$ tale che $n^3 - n = 3k$.
- Dobbiamo dimostrare $p(n + 1)$, cioè che $(n + 1)^3 - (n + 1)$ è divisibile per 3.

$$\begin{aligned}(n + 1)^3 - (n + 1) &= (n^3 + 3n^2 + 3n + 1) - (n + 1) \\&= n^3 + 3n^2 + 3n + 1 - n - 1 \\&= (n^3 - n) + (3n^2 + 3n) && \text{(raggruppo)} \\&= 3k + 3(n^2 + n) && \text{(ip. induttiva)} \\&= 3 \cdot (k + n^2 + n)\end{aligned}$$

- Poiché $(k + n^2 + n)$ è un numero intero, abbiamo mostrato che $(n + 1)^3 - (n + 1)$ è un multiplo di 3.

Per il principio di induzione, $p(n)$ è vera $\forall n \in \mathbb{N}$. □

Esercizio 5

Dimostrare per induzione che per ogni insieme finito S , se $|S| = n$ con $n \in \mathbb{N}$, allora $|\mathcal{P}(S)| = 2^n$.

$$\forall n \in \mathbb{N}. (|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n) \quad (4)$$

Esercizio 5

Dimostrare per induzione che per ogni insieme finito S , se $|S| = n$ con $n \in \mathbb{N}$, allora $|\mathcal{P}(S)| = 2^n$.

$$\forall n \in \mathbb{N}. (|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n) \quad (4)$$

Soluzione dell'esercizio 5

Sia $p(n)$ il predicato “ $|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n$ ”.

- caso base, $n = 0$: Se $|S| = 0$, allora $S = \emptyset$. L'insieme delle parti è $\mathcal{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}$. Si ha $|\mathcal{P}(S)| = 1$ e la formula dà $2^0 = 1$. Quindi $p(0)$ è vera.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ip. induttiva):
 $|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n$.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ip. induttiva):
 $|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n$. Dimostriamo $p(n + 1)$:
 $|T| = n + 1 \Rightarrow |\mathcal{P}(T)| = 2^{n+1}$.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ip. induttiva):
 $|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n$. Dimostriamo $p(n + 1)$:
 $|T| = n + 1 \Rightarrow |\mathcal{P}(T)| = 2^{n+1}$.
- Sia T con $|T| = n + 1$. Scegliamo $x \in T$ e sia $S = T \setminus \{x\}$. Chiaramente $|S| = n$.

- passo induttivo. Assumiamo $p(n)$ vera (ip. induttiva):
 $|S| = n \Rightarrow |\mathcal{P}(S)| = 2^n$. Dimostriamo $p(n+1)$:
 $|T| = n + 1 \Rightarrow |\mathcal{P}(T)| = 2^{n+1}$.
- Sia T con $|T| = n + 1$. Scegliamo $x \in T$ e sia $S = T \setminus \{x\}$. Chiaramente $|S| = n$.
- Partizioniamo $\mathcal{P}(T)$ in due insiemi disgiunti:

$$A = \{U \subseteq T \mid x \notin U\} = \mathcal{P}(S).$$
$$B = \{V \subseteq T \mid x \in V\}.$$

$$A = \{U \subseteq T \mid x \notin U\} = \mathcal{P}(S).$$

$$B = \{V \subseteq T \mid x \in V\}.$$

- Per l'ipotesi induttiva, $|A| = |\mathcal{P}(S)| = 2^n$.

$$A = \{U \subseteq T \mid x \notin U\} = \mathcal{P}(S).$$

$$B = \{V \subseteq T \mid x \in V\}.$$

- Per l'ipotesi induttiva, $|A| = |\mathcal{P}(S)| = 2^n$.
- Esiste una biezione $f : A \rightarrow B$ definita da $f(U) = U \cup \{x\}$. Dunque $|B| = |A| = 2^n$.

$$A = \{U \subseteq T \mid x \notin U\} = \mathcal{P}(S).$$

$$B = \{V \subseteq T \mid x \in V\}.$$

- Per l'ipotesi induttiva, $|A| = |\mathcal{P}(S)| = 2^n$.
- Esiste una biezione $f : A \rightarrow B$ definita da $f(U) = U \cup \{x\}$. Dunque $|B| = |A| = 2^n$.
- Essendo A e B partizioni di $\mathcal{P}(T)$:

$$|\mathcal{P}(T)| = |A| + |B| = 2^n + 2^n = 2 \cdot 2^n = 2^{n+1}.$$

Questo dimostra $p(n + 1)$.

$$A = \{U \subseteq T \mid x \notin U\} = \mathcal{P}(S).$$

$$B = \{V \subseteq T \mid x \in V\}.$$

- Per l'ipotesi induttiva, $|A| = |\mathcal{P}(S)| = 2^n$.
- Esiste una biezione $f : A \rightarrow B$ definita da $f(U) = U \cup \{x\}$. Dunque $|B| = |A| = 2^n$.
- Essendo A e B partizioni di $\mathcal{P}(T)$:

$$|\mathcal{P}(T)| = |A| + |B| = 2^n + 2^n = 2 \cdot 2^n = 2^{n+1}.$$

Questo dimostra $p(n+1)$. Per il principio di induzione, (4) è vera $\forall n \in \mathbb{N}$. □

Dimostrare le seguenti proprietà:

$$\sum_{k=1}^n (-1)^{k-1} \frac{1}{k} \geq 0 \quad \forall n \geq 1.$$

$$\sum_{k=1}^n k^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} \quad \forall n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}.$$

$$\sum_{k=1}^n k^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4} = \left(\sum_{k=1}^n k \right)^2 \quad \forall n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}.$$

Sia $a_n := 1 + \frac{1}{n-5}$ allora $a_n \geq 1 \quad \forall n \geq 6.$

(Attenzione al caso base per l'ultimo esercizio!)