



Il Polinomio di Kauffman: un invariante di isotopia regolare

Tesi di Laurea Triennale

Antonio De Lucreziis

Dipartimento di Matematica
Università di Pisa

18 Luglio 2025



Indice

Teoria dei Nodi

Polinomio di Kauffman

Laboratorio Computazionale



Nodi e Diagrammi

Nodo. $K \subset \mathbb{R}^3$ è un **nodo (tame)** se $\exists f : S^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$ *embedding loc. piatto* con $K = f(S^1)$.

Link. $S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \rightsquigarrow S^1 \sqcup \dots \sqcup S^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$



Nodi e Diagrammi

Nodo. $K \subset \mathbb{R}^3$ è un **nodo (tame)** se $\exists f : \mathbb{S}^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$ *embedding loc. piatto* con $K = f(\mathbb{S}^1)$.

Link. $\mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \rightsquigarrow \mathbb{S}^1 \sqcup \dots \sqcup \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$

Def. K_0, K_1 sono equivalenti se $\exists H : \mathbb{R}^3 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$ **isotopia ambiente**, ovvero tale che:

- $\forall t \in [0, 1], H(\cdot, t)$ è un omeomorfismo

e posta $H_t(x) := H(x, t)$ si ha:

- $H_0 = \text{id}_{\mathbb{R}^3}$
- $H_1(K_0) = K_1$



Nodi e Diagrammi

Nodo. $K \subset \mathbb{R}^3$ è un **nodo (tame)** se $\exists f : \mathbb{S}^1 \hookrightarrow \mathbb{R}^3$ *embedding loc. piatto* con $K = f(\mathbb{S}^1)$.

Link. $\mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3 \rightsquigarrow \mathbb{S}^1 \sqcup \dots \sqcup \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{R}^3$

Def. K_0, K_1 sono equivalenti se $\exists H : \mathbb{R}^3 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$ **isotopia ambiente**, ovvero tale che:

- $\forall t \in [0, 1], H(\cdot, t)$ è un omeomorfismo

e posta $H_t(x) := H(x, t)$ si ha:

- $H_0 = \text{id}_{\mathbb{R}^3}$
- $H_1(K_0) = K_1$

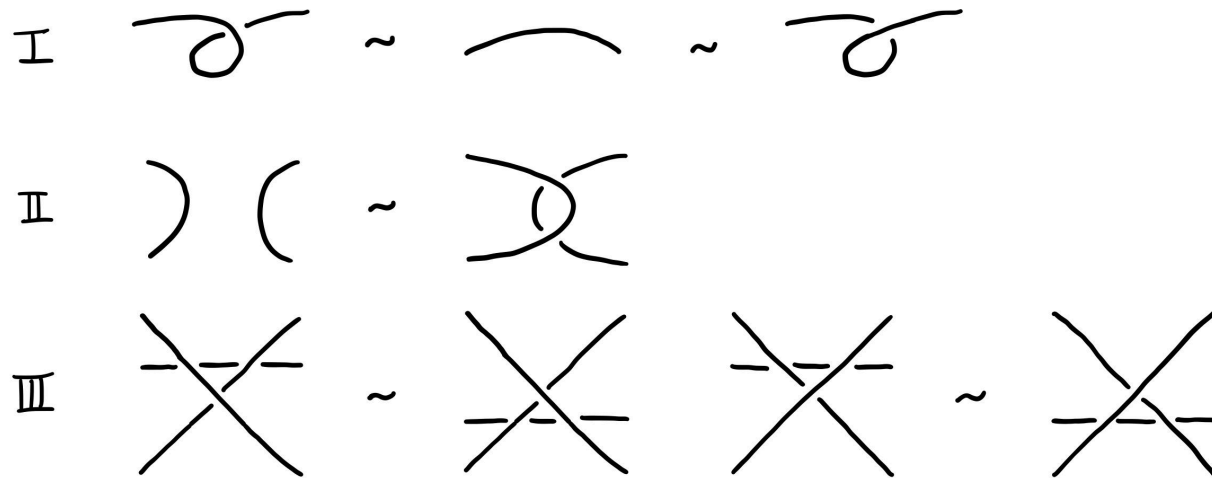
Def. Un **diagramma** $D \subset \mathbb{R}^2$ proviene da un link $L \subset \mathbb{R}^3$ attraverso una proiezione regolare. I punti doppi del diagramma sono detti **incroci**.



Teorema di Reidemeister

Mosse di Reidemeister. Le mosse I, II, III in figura sono dette.

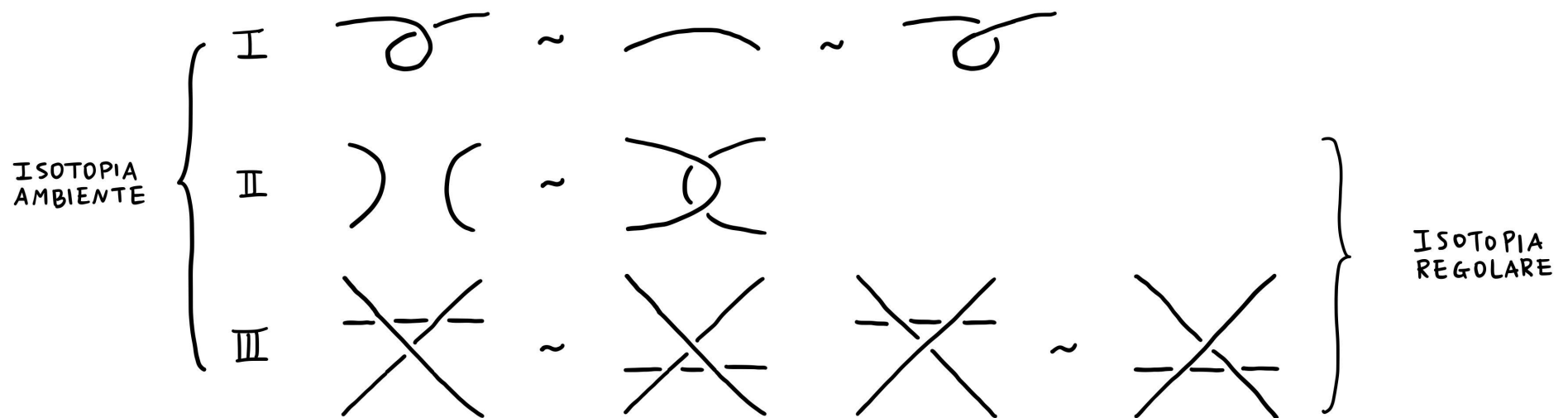
Teorema (di Reidemeister). Due diagrammi di link *equivalenti* sono collegati da una *successione finita di mosse di Reidemeister* e isotopie planari.





Isotopia Regolare

L'**isotopia regolare** è la relazione di equivalenza su diagrammi di link generata solo dalle mosse II e III.

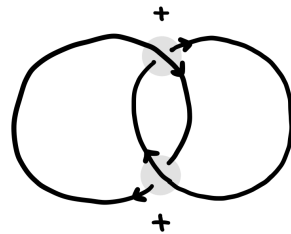




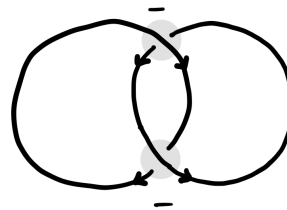
Writhe

Il **segno** di un incrocio di un diagramma orientato è: $\varepsilon\left(\begin{array}{c} \nearrow \\ \nwarrow \end{array}\right) = +1, \varepsilon\left(\begin{array}{c} \nwarrow \\ \nearrow \end{array}\right) = -1$

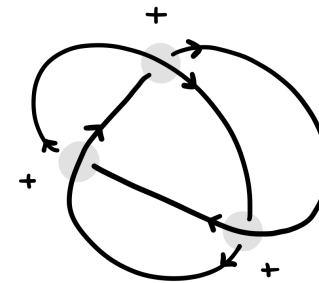
D diagramma di un link orientato, il **writhe** $w(D) := \sum_{c \text{ incrocio}} \varepsilon(c)$.



$$w = +2$$



$$w = -2$$



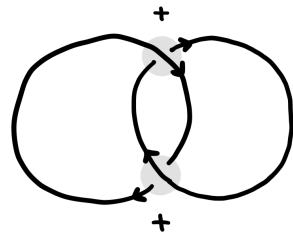
$$w = 3$$



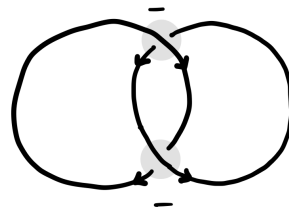
Writhe

Il **segno** di un incrocio di un diagramma orientato è: $\varepsilon\left(\begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array}\right) = +1, \varepsilon\left(\begin{array}{c} \nwarrow \\ \nearrow \end{array}\right) = -1$

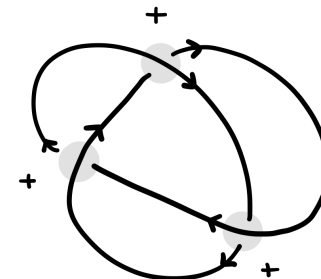
D diagramma di un link orientato, il **writhe** $w(D) := \sum_{c \text{ incrocio}} \varepsilon(c)$.



$$w = +2$$



$$w = -2$$



$$w = 3$$

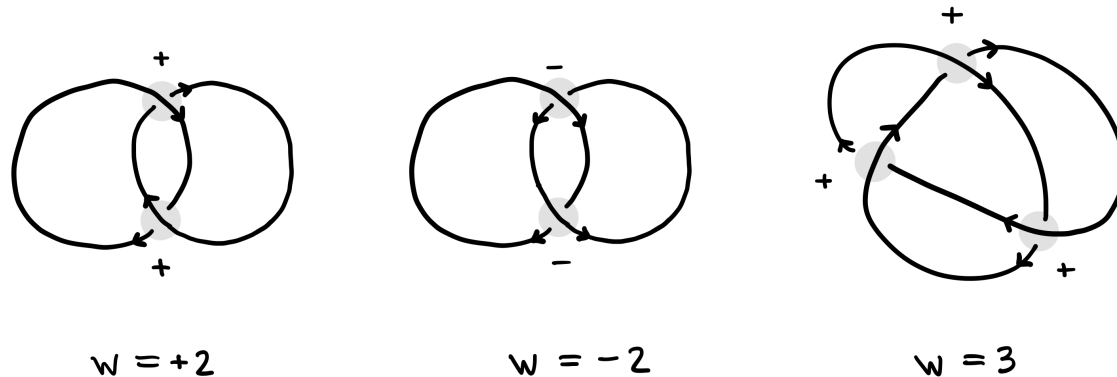
Prop. Se D è il diagramma di un nodo, il *writhe* **non dipende dall'orientazione**.



Writhe

Il **segno** di un incrocio di un diagramma orientato è: $\varepsilon\left(\begin{array}{c} \nearrow \\ \searrow \end{array}\right) = +1, \varepsilon\left(\begin{array}{c} \nwarrow \\ \swarrow \end{array}\right) = -1$

D diagramma di un link orientato, il **writhe** $w(D) := \sum_{c \text{ incrocio}} \varepsilon(c)$.



Prop. Se D è il diagramma di un nodo, il *writhe* **non dipende dall'orientazione**.

Prop. Il writhe è un **invariante di isotopia regolare**, ovvero $D_1 \sim D_2 \Rightarrow w(D_1) = w(D_2)$.



Indice

Teoria dei Nodi

Polinomio di Kauffman

Laboratorio Computazionale



Assiomi

Dimostreremo che per ogni diagramma di link *non orientato* esiste un polinomio L_D per ogni diagramma di link *non orientato* D , il polinomio $L_D \in \mathbb{Z}[a, a^{-1}, z, z^{-1}]$ verifica i seguenti assiomi:

i) $D \sim D' \Rightarrow L_D = L_{D'}$.

ii) Valgono le seguenti relazioni:

a) $L[\text{crossing}] + L[\text{crossing}] = z(L[\text{cup}] + L[\text{cap}])$

b) $L[\text{circle}] = 1$

c) $L[\text{curl}] = aL[\text{arc}]$

d) $L[\text{curl}] = a^{-1}L[\text{arc}]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.
- $F\left[\bigcirc\right] =$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.
- $F[\overline{\mathcal{D}}] = a^{-w(\mathcal{D})} \cdot L[\overline{\mathcal{D}}]$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.
- $F[\overline{\mathcal{D}}] = a^{-w(\overline{\mathcal{D}})} \cdot L[\overline{\mathcal{D}}]$ $L[\overline{\mathcal{D}}] = aL[\neg], \quad w(\overline{\mathcal{D}}) = w(\neg) + 1$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.
- $F[\overline{\mathcal{D}}] = a^{-w(\overline{\mathcal{D}})} \cdot L[\overline{\mathcal{D}}]$
 $= a^{-w(\neg)-1} \cdot aL[\neg]$
 $L[\overline{\mathcal{D}}] = aL[\neg], \quad w(\overline{\mathcal{D}}) = w(\neg) + 1$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.
 - $F[\overline{\bigcirc}] = a^{-w(\overline{\bigcirc})} \cdot L[\overline{\bigcirc}]$
 $= a^{-w(\bigcirc)-1} \cdot aL[\bigcirc]$
 $= a^{-w(\bigcirc)} \cancel{a^{-1}} \cdot \cancel{a}L[\bigcirc]$
- $L[\overline{\bigcirc}] = aL[\bigcirc], \quad w(\overline{\bigcirc}) = w(\bigcirc) + 1$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad F[\overline{\bigcirc}] &= a^{-w(\overline{\bigcirc})} \cdot L[\overline{\bigcirc}] & L[\overline{\bigcirc}] &= aL[\frown], \quad w(\overline{\bigcirc}) = w(\frown) + 1 \\
 &= a^{-w(\frown)-1} \cdot aL[\frown] \\
 &= a^{-w(\frown)} \cancel{a} \cdot \cancel{a}L[\frown] \\
 &= a^{-w(\frown)} \cdot L[\frown]
 \end{aligned}$$



Normalizzazione a invariante di isotopia ambiente

Definizione. $F_D(a, z) := a^{-w(D)} \cdot L_D(a, z)$

Prop. F_K invariante di isotopia ambiente.

Dimostrazione.

- $w(D)$ inv. isotopia regolare $\Rightarrow a^{-w(D)}$ inv. isotopia regolare.

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad F[\overline{\bigcirc}] &= a^{-w(\overline{\bigcirc})} \cdot L[\overline{\bigcirc}] & L[\overline{\bigcirc}] &= aL[\neg], \quad w(\overline{\bigcirc}) = w(\neg) + 1 \\
 &= a^{-w(\neg)-1} \cdot aL[\neg] \\
 &= a^{-w(\neg)} \cancel{a} \cdot \cancel{a}L[\neg] \\
 &= a^{-w(\neg)} \cdot L[\neg] \\
 &= F[\neg]
 \end{aligned}$$



Calcoli impliciti

$$\text{Link } L[\bigcirc \bigcirc]$$



Calcoli impliciti

$$\text{Link } L[\bigcirc \bigcirc]$$

$$(\text{figure-eight}, \text{figure-eight}, \text{figure-eight}, \text{figure-eight})$$



Calcoli impliciti

Link $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{figure 8}] + L[\text{figure 8}] = z \left(L[\text{figure 8}] + L[\text{figure 8}] \right)$$



Calcoli impliciti

Link $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{link}] + L[\text{link}] = z(L[\text{link}] + L[\text{link}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$



Calcoli impliciti

Link $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L\left[\begin{array}{c} \diagup \diagdown \\ \diagdown \diagup \end{array}\right] + L\left[\begin{array}{c} \diagdown \diagup \\ \diagup \diagdown \end{array}\right] = z\left(L\left[\begin{array}{c} \bigcirc \\ \bigcirc \end{array}\right] + L\left[\begin{array}{c} \diagup \diagdown \\ \diagup \diagdown \end{array}\right]\right)$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$



Calcoli impliciti

Link $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{link}] + L[\text{link}] = z(L[\text{link}] + L[\text{link}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{a + 1/a}{z} - 1$$



Calcoli impliciti

Link $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{link}] + L[\text{link}] = z(L[\text{two circles}] + L[\text{two circles}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{a + 1/a}{z} - 1$$

$$\leadsto L[K_1 \sqcup K_2] = \delta L[K_1]L[K_2]$$



Calcoli impliciti

Link $L[\bigcirc \bigcirc]$

$$L[\text{figure 8}] + L[\text{figure 8}] = z(L[\text{figure 8}] + L[\text{figure 8}])$$

$$\Rightarrow aL[\bigcirc] + a^{-1}L[\bigcirc] = z(\delta + L[\bigcirc])$$

$$\Rightarrow a + a^{-1} = z(\delta + 1)$$

$$\Rightarrow \delta = \frac{a + 1/a}{z} - 1$$

$$\leadsto L[K_1 \sqcup K_2] = \delta L[K_1]L[K_2]$$

Link di Hopf

$$L[\text{Hopf link}] + L[\text{Hopf link}] = z(L[\text{Hopf link}] + L[\text{Hopf link}])$$

$$\Rightarrow L[\text{Hopf link}] + \delta = z(a + a^{-1})$$

$$\Rightarrow L[\text{Hopf link}] = -(a + a^{-1})z^{-1} + 1 + (a + a^{-1})z$$

Nodo trifoglio

$$L[\text{trifoglio}] + L[\text{trifoglio}] = z(L[\text{trifoglio}] + L[\text{trifoglio}])$$

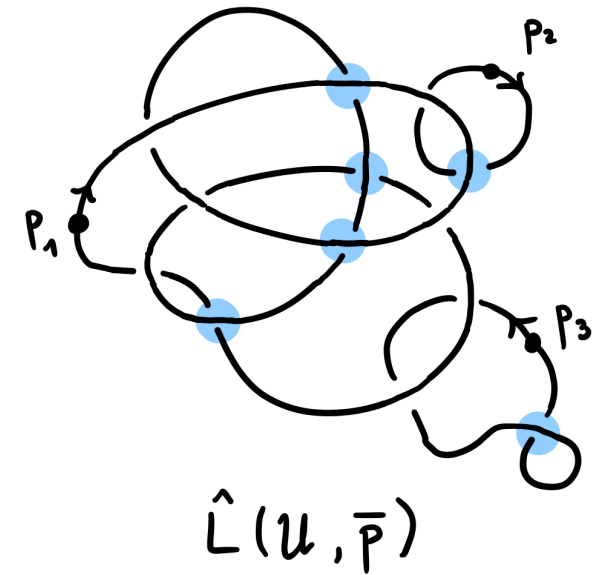
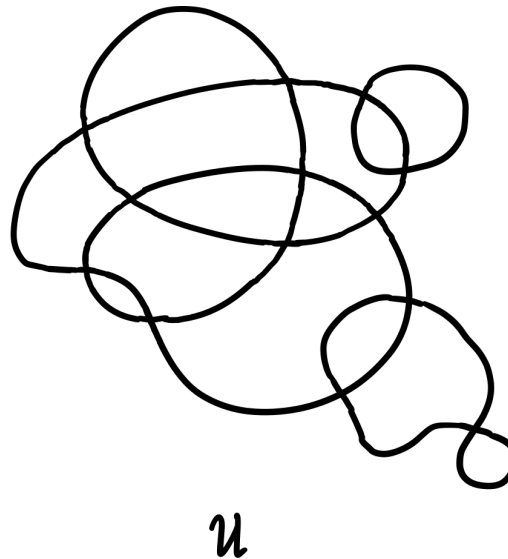
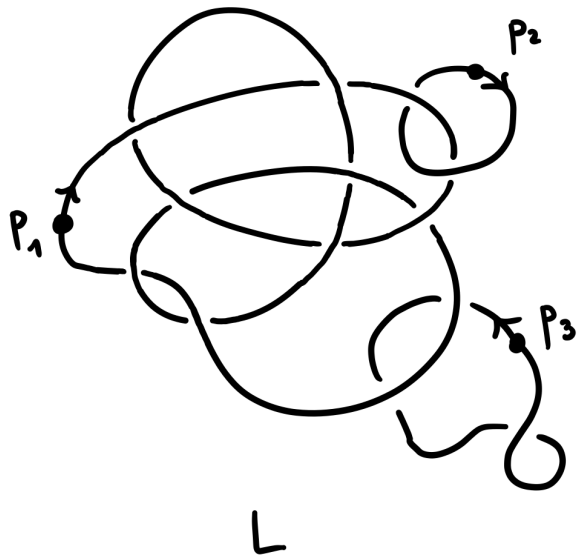
$$\Rightarrow L[\text{trifoglio}] + a = z(L[\text{Hopf link}] + a^{-2})$$

$$\Rightarrow L[\text{trifoglio}] = -(2a + a^{-1}) + (1 + a^{-2})z + (a + a^{-1})z^2$$



Considerazioni preliminari

Il **nodo banale standard** (o in *forma discendente*) associato K è $\hat{K}(\mathcal{U}, p)$:





Considerazioni preliminari

D un diagramma di un nodo, i etichetta di uno degli incroci

$$\begin{array}{cccc}
 \begin{array}{c} i \\ \diagup \diagdown \\ \diagdown \diagup \end{array} & \begin{array}{c} i \\ \diagup \diagdown \\ \diagdown \diagup \end{array} & \begin{array}{c} i \\ \frown \\ \smile \end{array} & \begin{array}{c} i \\ \big) \big(\end{array} \\
 K & S_i K & E_i K & e_i K
 \end{array}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$L[K] + L[S_0 K] = z(L[E_0 K] + L[e_0 K])$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$L[K] + L[S_0 K] = z(L[E_0 K] + L[e_0 K])$$

$$L[S_0 K] + L[S_1 S_0 K] = z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K])$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$L[K] + L[S_0 K] = z(L[E_0 K] + L[e_0 K])$$

$$L[S_0 K] + L[S_1 S_0 K] = z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K])$$

$$L[S_1 S_0 K] + L[S_2 S_1 S_0 K] = z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K])$$

$$\vdots$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$L[K] + L[S_0 K] = z(L[E_0 K] + L[e_0 K])$$

$$L[S_0 K] + L[S_1 S_0 K] = z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K])$$

$$L[S_1 S_0 K] + L[S_2 S_1 S_0 K] = z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K])$$

$$\vdots$$

$$L[S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[\hat{K}(p)] = z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K])$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + L[S_0 K] &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(L[S_0 K] + L[S_1 S_0 K]) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 L[S_1 S_0 K] + L[S_2 S_1 S_0 K] &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (L[S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K])
 \end{aligned}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + \cancel{L[S_0 K]} &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(\cancel{L[S_0 K]} + \cancel{L[S_1 S_0 K]}) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 \cancel{L[S_1 S_0 K]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 K]} &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 K]} + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K]) \\
 \Rightarrow L[K] + (-1)^n L[\hat{K}(p)] &= z \sum_{i=0}^n (-1)^i (L[E_i S_{i-1} \cdots S_0 K] + L[e_i S_{i-1} \cdots S_0 K])
 \end{aligned}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + \cancel{L[S_0 K]} &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(\cancel{L[S_0 K]} + \cancel{L[S_1 S_0 K]}) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 \cancel{L[S_1 S_0 K]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 K]} &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 K]} + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K]) \\
 \\
 \Rightarrow L[K] + (-1)^n L[\hat{K}(p)] &= z \sum_{i=0}^n (-1)^i \underbrace{(L[E_i S_{i-1} \cdots S_0 K])}_{A_i^\lambda} + \underbrace{L[e_i S_{i-1} \cdots S_0 K]}_{B_i^\lambda}
 \end{aligned}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + \cancel{L[S_0 K]} &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(\cancel{L[S_0 K]} + \cancel{L[S_1 S_0 K]}) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 \cancel{L[S_1 S_0 K]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 K]} &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 K]} + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K]) \\
 \Rightarrow L[K] + (-1)^n L[\hat{K}(p)] &= z \sum_{i=0}^n (-1)^i (L[A_i^\lambda K] + L[B_i^\lambda K])
 \end{aligned}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + \cancel{L[S_0 K]} &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(\cancel{L[S_0 K]} + \cancel{L[S_1 S_0 K]}) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 \cancel{L[S_1 S_0 K]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 K]} &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 K]} + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K]) \\
 \Rightarrow L[K] &= (-1)^{n+1} L[\hat{K}(p)] + z \sum_{i=0}^n (-1)^i (L[A_i^\lambda K] + L[B_i^\lambda K])
 \end{aligned}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + \cancel{L[S_0 K]} &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(\cancel{L[S_0 K]} + \cancel{L[S_1 S_0 K]}) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 \cancel{L[S_1 S_0 K]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 K]} &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 K]} + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K]) \\
 \Rightarrow L[K] &= (-1)^{|\lambda(q)|+1} L[\hat{K}(p)] + z \sum_K (\lambda)
 \end{aligned}$$



Considerazioni preliminari

p punto base direzionato, λ una sequenza di scambi che porta K a $\hat{K}(p)$:

$$\begin{aligned}
 L[K] + \cancel{L[S_0 K]} &= z(L[E_0 K] + L[e_0 K]) \\
 -(\cancel{L[S_0 K]} + \cancel{L[S_1 S_0 K]}) &= -z(L[E_1 S_0 K] + L[e_1 S_0 K]) \\
 \cancel{L[S_1 S_0 K]} + \cancel{L[S_2 S_1 S_0 K]} &= z(L[E_1 S_1 S_0 K] + L[e_1 S_1 S_0 K]) \\
 &\vdots \\
 (-1)^n (\cancel{L[S_{n-1} \cdots S_0 K]} + L[\hat{K}(p)]) &= (-1)^n z(L[E_n S_{n-1} \cdots S_0 K] + L[e_n S_{n-1} \cdots S_0 K])
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow L[K] = (-1)^{|\lambda(q)|+1} L[\hat{K}(p)] + z \sum_K (\lambda)$$



Definizione induttiva

Definizione di L_K . Il polinomio $L_K(a, z)$ è definito induttivamente come segue:

- i) Se K è in *forma discendente*: $L_K(a, z) := a^{w(K)}$
- ii) Se $K = K_1 \cup K_2$: $L(K_1 \cup K_2) := \delta L(K_1)L(K_2)$ (con $\delta := \frac{a+1/a}{z} - 1$)
- iii) Altrimenti $K = K_1 \cup \dots \cup K_n$:
 - a) Se $n > 1$: $L_K(a, z) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((-1)^{|\lambda(p_i)|+1} \delta L_{K_i} L_{K-K_i} + z \sum_K (\lambda(p_i)) \right)$
 - b) Se $n = 1$: $L_K(a, z) := (-1)^{|\lambda(p)|+1} L[\hat{K}(p)] + z \sum_K (\lambda(p))$



Definizione induttiva

Definizione di L_K . Il polinomio $L_K(a, z)$ è definito induttivamente come segue:

- i) Se K è in *forma discendente*: $L_K(a, z) := a^{w(K)}$
- ii) Se $K = K_1 \cup K_2$: $L(K_1 \cup K_2) := \delta L(K_1)L(K_2)$ (con $\delta := \frac{a+1/a}{z} - 1$)
- iii) Altrimenti $K = K_1 \cup \dots \cup K_n$:
 - a) Se $n > 1$: $L_K(a, z) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left((-1)^{|\lambda(p_i)|+1} \delta L_{K_i} L_{K-K_i} + z \sum_K (\lambda(p_i)) \right)$
 - b) Se $n = 1$: $L_K(a, z) := (-1)^{|\lambda(p)|+1} L[\hat{K}(p)] + z \sum_K (\lambda(p))$



Definizione induttiva

Def (induttiva di L_K). Il polinomio $L_K(a, z)$ è definito induttivamente come segue:

- i) Se K è in *forma discendente*: $L_K(a, z) := a^{w(K)}$
- ii) Se $K = K_1 \cup K_2$: $L(K_1 \cup K_2) := \delta L(K_1)L(K_2)$ (con $\delta := \frac{a+1/a}{z} - 1$)
- iii) Altrimenti $K = K_1 \cup \dots \cup K_n$:

$$\text{a) Se } n > 1: L_K(a, z) := \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \sum_{q=p_i, \bar{p}_i} \left((-1)^{|\lambda(q)|+1} \delta L_{K_i} L_{K-K_i} + z \sum_K (\lambda(q)) \right)$$

$$\text{b) Se } n = 1: L_K(a, z) := \frac{1}{2} \sum_{q=p, \bar{p}} \left((-1)^{|\lambda(q)|+1} L_{\widehat{K}(q)} + z \sum_K (\lambda(q)) \right)$$



Ipotesi induttiva

Ipotesi induttiva. Dimostreremo induttivamente le seguenti proprietà: per ogni diagramma di link K con $< N$ incroci e per diagrammi contenenti  con $< N$ incroci:

- a) L_K è ben definito (non dipende dalla scelta di punto base).
- b) L_K verifica gli assiomi:
 - $L[K] + L[S_i K] = z(L[e_i K] + L[E_i K])$
 - $L[\text{positive crossing}] = aL[\text{negative crossing}], L[\text{negative crossing}] = a^{-1}L[\text{positive crossing}]$
- c) L_K è invariante per mosse di tipo II e III che non aumentano il numero di incroci.
- d) Per certi diagrammi vale $L_K = a^{w(K)}$



Dimostrazione buona definizione

Dimostrazione.

- a) L_K è ben definito (non dipende dalla scelta di punto base)
 - Invarianza $\sum_K(\lambda)$ per rotazioni
 - Caso più componenti
 - Caso una sola componente
 - Splice di un nodo in forma discendente
 - Assiomi di L_K per nodi in forma discendente
- b) L_K verifica gli assiomi
- c) L_K è invariante per mosse di tipo II e III che non aumentano il numero di incroci
- d) Per certi diagrammi vale $L_K = a^{w(K)}$



Indice

Teoria dei Nodi

Polinomio di Kauffman

Laboratorio Computazionale



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape**: scritto in C, degli anni ~1990.
- **KnotTheory**: ultimo aggiornamento ~2010, per Mathematica.



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape**: scritto in C, degli anni ~1990.
- **KnotTheory**: ultimo aggiornamento ~2010, per Mathematica.

Per il progetto di Lab. Comp. abbiamo scritto una **nuova implementazione** in *Python* open source:

- Rappresentazione di nodi attraverso **codici PD** e **SG**.
- Algoritmo per il calcolo di L_K e F_K .



Implementazione in Python

Implementazioni esistenti:

- **KnotScape**: scritto in C, degli anni ~1990.
- **KnotTheory**: ultimo aggiornamento ~2010, per Mathematica.

Per il progetto di Lab. Comp. abbiamo scritto una **nuova implementazione** in *Python* open source:

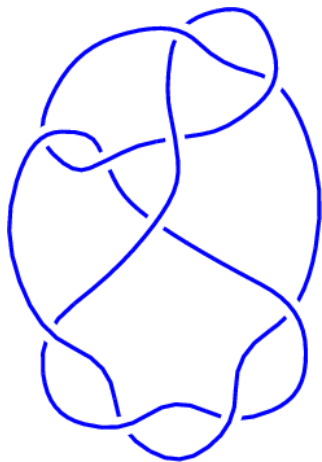
- Rappresentazione di nodi attraverso **codici PD** e **SG**.
- Algoritmo per il calcolo di L_K e F_K .
- Verifica di tutti i polinomi contenuti nel **database di KnotInfo**.
- *Trovato un errore nel nodo 10_{125} , c'è $F[10_{125}]$ invece di $F[10_{125}]$ ovvero $F_{10_{125}}(1/a, z)$.*



Implementazione in Python

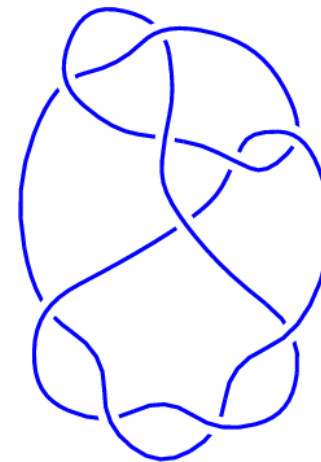
Polinomio corretto

$$\begin{aligned}
 F[10_{125}] = & z^8 \left(\frac{1}{a^2} + 1 \right) + z^7 \left(a + \frac{2}{a} + \frac{1}{a^3} \right) + z^6 \left(-6 - \frac{6}{a^2} \right) \\
 & + z^5 \left(-5a - \frac{11}{a} - \frac{6}{a^3} \right) + z^4 \left(2a^2 + 13 + \frac{11}{a^2} \right) \\
 & + z^3 \left(a^3 + 8a + \frac{17}{a} + \frac{10}{a^3} \right) + z^2 \left(a^4 - 6a^2 - 15 - \frac{8}{a^2} \right) \\
 & + z \left(a^5 - a^3 - 6a - \frac{8}{a} - \frac{4}{a^3} \right) + 3a^2 + 7 + \frac{3}{a^2}
 \end{aligned}$$



Polinomio in KnotInfo

$$\begin{aligned}
 F[m(10_{125})] = & z^8(a^2 + 1) + z^7 \left(a^3 + 2a + \frac{1}{a} \right) + z^6(-6a^2 - 6) \\
 & + z^5 \left(-6a^3 - 11a - \frac{5}{a} \right) + z^4 \left(11a^2 + 13 + \frac{2}{a^2} \right) \\
 & + z^3 \left(10a^3 + 17a + \frac{8}{a} + \frac{1}{a^3} \right) + z^2 \left(-8a^2 - 15 - \frac{6}{a^2} + \frac{1}{a^4} \right) \\
 & + z \left(-4a^3 - 8a - \frac{6}{a} - \frac{1}{a^3} + \frac{1}{a^5} \right) + 3a^2 + 7 + \frac{3}{a^2}
 \end{aligned}$$





Appendice

Grazie per l'attenzione