

Zeitschrift: L'Enseignement Mathématique
Herausgeber: Commission Internationale de l'Enseignement Mathématique
Band: 23 (1977)
Heft: 1-2: L'ENSEIGNEMENT MATHÉMATIQUE

Artikel: SISTEMI NORMALI DI GENERATORI PER GLI IDEALI DI $Z[x]$
Autor: Franci, R. / Toti Rigatelli, L.
Kapitel: 2. Segnatura
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-48923>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 23.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Passo induttivo: Supponiamo adesso che ogni polinomio in J di grado minore o uguale a $n - 1$ sia esprimibile come combinazione lineare di polinomi normali. Sia $p(x) = c_n x^n + c_{n-1} x^{n-1} + \dots + c_0 \in J$ di grado n . Distinguiamo due casi: $n \in M$. Consideriamo il polinomio normale di grado n ; sia esso $q(x) = a_n x^n + d_{n-1} x^{n-1} + \dots + d_0$. Essendo $c_n \in J_n$ sarà per un opportuno $c \in Z$, $c_n = a_n c$. Il polinomio $p(x) - cq(x)$ è in J ed è al più di grado $n - 1$; quindi per l'ipotesi induttiva è esprimibile come combinazione lineare di polinomi normali.

$n \notin M$. Sia m il massimo grado dei polinomi normali di grado minore di n e $q(x)$ il polinomio normale di grado m . Il polinomio $q(x) x^{n-m}$ è in J ed è di grado n . Essendo per le ipotesi fatte $a_n = a_m$ e $c_n \in J_n$ sarà per un opportuno $c \in Z$, $c_n = a_m c$; $p(x) - cq(x) x^{n-m}$ è un polinomio di grado al più $n - 1$, quindi per l'ipotesi induttiva è combinazione lineare di polinomi normali. Resta da vedere che i polinomi normali costituiscono un sistema di generatori linearmente indipendenti. Questo risultato segue banalmente dall'osservazione che il coefficiente direttivo di ciascun polinomio normale è multiplo proprio del coefficiente direttivo del polinomio normale di grado immediatamente più alto.

Osserviamo che nei casi in cui la situazione è così semplice da suggerire un certo sistema di generatori come « naturale », questo è il sistema normale. Per esempio se J è un ideale principale, $J = (f)$ allora $\{f\}$ è il sistema normale per J . Ancora se $J \cap Z = (p)$ cioè $J = (p, f)$ con $f = x^n + b_{n-1} x^{n-1} + \dots + b_0$ con $0 \leq b_i < p$ allora $\{p, f\}$ è il sistema normale per J .

2. SEGNATURE

DEF. 2. Si dice *segnatura* ogni successione di naturali decrescente rispetto alla divisibilità da un certo indice in poi. Una segnatura si dice *normale* se è decrescente rispetto alla divisibilità.

Ovviamente una segnatura è una successione stazionaria.

Sia \mathcal{S} l'insieme delle segnature. Se $a = (a_n)_{n \in \omega}$, $b = (b_n)_{n \in \omega}$ sono elementi di \mathcal{S} poniamo $a < b$ se e solo se: (i) a_i divide b_i per ogni $i \in \omega$; (ii) l'indice di stazionarietà di a è minore o uguale a quello di b ; (iii) a_i è divisore proprio di b_i per almeno un $i \in \omega$.

E' immediato verificare che $<$ è una relazione transitiva.

La segnatura di un ideale di $Z[x]$ è una segnatura normale. Viceversa ogni segnatura normale $a = (a_n)_{n \in \omega}$ è la segnatura di un opportuno ideale J_a di $Z[x]$, per esempio dell'ideale generato da $\{a_n x^n\}_{n \in \omega}$.

Se a e b sono due segnature normali tali che $a < b$ allora $J_a \supset J_b$. Se J_1, J_2 sono due ideali di $Z[x]$ con $J_1 \subset J_2$ allora la segnatura di J_2 è minore o uguale a quella di J_1 .

LEMMA 4. *La relazione $<$ in \mathcal{S} è fondata.*¹⁾

Dim. Supponiamo che ci sia una successione decrescente di segnature, sia essa $a^0 > a^1 > \dots > a^k > \dots$. Sia $(n_\kappa)_{\kappa \in \omega}$ la successione, ovviamente stazionaria, degli indici di stazionarietà; indichiamo con n il suo valore di stazionarietà. Consideriamo la successione $(a_{n_\kappa}^\kappa)_{\kappa \in \omega}$; tale successione è decrescente rispetto alla divisibilità e quindi stazionaria; sia a il valore di stazionarietà. Dunque dall'indice n in poi ognuna delle successioni di partenza vale a , dovendo essere $a^0 > a^1 > \dots > a^k > \dots$ ne consegue che esiste un indice j , $0 \leq j \leq n - 1$ tale che la successione $(a_j^\kappa)_{\kappa \in \omega}$ decresce. Questo è assurdo, dunque $<$ è fondata.

DEF. 3. Sia p_1, \dots, p_n una sequenza di polinomi di $Z[x]$ di gradi rispettivamente r_1, \dots, r_n , a due a due diversi, ordinata secondo l'ordine crescente dei gradi. La sequenza (infinita)

$$0, \dots, 0, p_1, xp_1, x^2p_1, \dots, x^{r_2-r_1-1} p_1, p_2, xp_2, \dots, x^{r_{n-1}-r_{n-2}-1} p_{n-1}, p_n, \\ xp_n, \dots, x^k p_n, \dots .$$

si dice *prolungamento* della sequenza data.

La sequenza dei coefficienti direttivi di un prolungamento è una segnatura; che chiameremo appunto segnatura dal prolungamento e, per abuso di linguaggio, anche segnatura della sequenza di partenza.

La segnatura di un sistema normale di generatori per un ideale J di $Z[x]$ è una segnatura normale.

TEOREMA 2. *Sia J un ideale di $Z[x]$, p_1, \dots, p_n il suo sistema normale di generatori. Il prolungamento di detto sistema genera l'ideale come Z -modulo.*

Dim. Ovvia.

DEF. 4. Una sequenza finita di polinomi è detta *normale* se e solo se (i) la sua segnatura è normale e coincide con la segnatura dell'ideale da essa generato (ii) i coefficienti direttivi sono a due a due diversi.

¹⁾ Ricordiamo che una relazione binaria R si dice fondata se e solo se ogni sottoinsieme M non vuoto del suo campo ammette un elemento minimale, ciò che equivale alla inesistenza di successioni $(a_n)_{n \in \omega}$ con $a_{n+i} Ra_n$ per ogni $n \in \omega$.

Dai teoremi 1 e 2 segue che ogni sistema normale di generatori è una sequenza normale

DEF. 5. Una sequenza finita di polinomi di $Z[x]$, ordinata secondo l'ordine crescente dei gradi, è detta *ridotta* se e solo se:

- (a) ogni polinomio ha coefficiente direttivo non negativo;
- (b) i coefficienti direttivi decrescono secondo la divisibilità;
- (c) ogni polinomio della sequenza ha i coefficienti non direttivi non negativi e strettamente minori del coefficiente direttivo (se è diverso da zero) del polinomio del prolungamento che ha lo stesso grado.

Dalle definizioni 1 e 5 si ha che: il sistema normale di generatori per un ideale è una sequenza ridotta. Non ogni sequenza ridotta è un sistema normale. Infatti la sequenza $30, 18+15x, 6+6x+5x^2$ è ridotta, ma $6 = 2(15x+18) - 30x - 30$ appartiene all'ideale J generato dai tre polinomi considerati, quindi la segnatura di J è strettamente minore della segnatura della sequenza considerata, per cui essa non è normale.

Osserviamo infine che esistono sequenze normali non ridotte. Infatti $s_1 = \{2, x^3 + 3\}$, $s_2 = \{2, x^3 + 1\}$ sono due sequenze normali che generano lo stesso ideale ma la prima di esse non è ridotta.

LEMMA 5. *Ogni sequenza di generatori per un ideale J di $Z[x]$ che sia normale e ridotta è un sistema normale di generatori per J .*

Dim. Ovvia.

LEMMA 6. *Sia J un ideale di $Z[x]$, p_1, \dots, p_n una sequenza di generatori di gradi a due diversi ordinata secondo l'ordine crescente dei gradi avente segnatura minimale (nell'insieme delle segnature dei sistemi di generatori per J) allora p_1, \dots, p_n è una sequenza normale.*

Dim. Indichiamo con g_1, g_2, \dots, g_n i gradi rispettivi di p_1, p_2, \dots, p_n . Se la sequenza di p_2, \dots, p_n non è normale allora esistono almeno due polinomi, diciamo p_i, p_j tali che il coefficiente direttivo dell'uno non è multiplo del coefficiente direttivo dell'altro. Supponiamo $g_i < g_j$. Siano a, b, i coefficienti direttivi di p_i, p_j rispettivamente, $u = \alpha a + \beta b$ il M.C.D. di a e b . Il polinomio $p = \alpha x^{g_j - g_i} p_i + \beta p_j$ ha grado g_j e coefficiente direttivo u . Per un opportuno $k \in Z$ si ha $b = ku$; il polinomio $q = p_j - kp$ ha grado t strettamente minore di g_j . La sequenza di polinomi ottenuta da quella iniziale sostituendo p al posto di p_j e aggiungendo q se t è diverso da ciascuno dei g_1, \dots, g_n e se invece $t = g_k$ ripetendo il processo a partire

dalla coppia p_k, q genera J e ha ovviamente segnatura minore; questo è assurdo. Dunque p_1, \dots, p_n ha segnatura normale.

Resta da vedere che la segnatura di p_1, \dots, p_2 eguaglia la segnatura dell'ideale. Non sia così. Allora esiste almeno un polinomio $p \in J$ che ha coefficiente direttivo non multiplo di alcun coefficiente direttivo di polinomi della sequenza iniziale. Allora p_1, \dots, p_n, p è un sistema di generatori per J da cui con lo stesso procedimento descritto sopra a partire dal polinomio p e da uno qualunque dei p_i si può ottenere un sistema di generatori di gradi a due distinti e con segnatura minore di quella di partenza, contro il fatto che questa è minimale.

Terminiamo questo paragrafo mettendo in evidenza un problema. Abbiamo già osservato che data una segnatura normale esiste almeno un ideale avente quella segnatura, sorge allora il problema di classificare gli ideali aventi una data segnatura normale. Per chiarire il problema esaminiamo un esempio. Sia data la segnatura normale: $a_0 = 30$, $a_1 = 15$, $a_n = 5$ per ogni $n \geq 2$. I possibili sistemi normali vanno ricercati nell'insieme delle sequenze ridotte:

$$\{ \{30, a + 15x, b + cx + 5x^2\} : 0 \leq a < 30, 0 \leq b < 30, 0 \leq c < 15 \}$$

Con facili calcoli si vede che le sequenze normali sono quelle per cui $a = 15$, $c = 10$ e b assume uno dei valori del seguente insieme $\{5, 10, 15, 20, 25\}$. Dunque alla segnatura data corrispondono cinque ideali.

Osserviamo che in alcuni casi il problema si presenta di facile soluzione. Per esempio:

- (α) Se la segnatura è costante cioè $a_n = a$ per ogni $n \in \omega$ allora c'è un unico sistema normale $\{a\}$ e l'ideale corrispondente è dunque (a). In particolare se $a = 1$ l'ideale è $\mathbb{Z}[x]$.
- (β) Se la segnatura è del tipo $a_n = 1$ per ogni $n > 0$ allora i sistemi normali sono in numero di $a_0 - 1$ precisamente quelli del tipo $\{a_0, x + b\}$ con $0 \leq b < a_0$.
- (β_i) Se la segnatura è del tipo $a_n = a$ per ogni $n < m$ e $a_n = 1$ per ogni $n > m$ con m intero fissato, allora i sistemi normali sono del tipo $\{a, x^n + b_1 x^{n-1} + \dots + b_0\}$ con $0 \leq b_i < a$.
- (γ) Se la segnatura è del tipo $a_0 = 0$ e $a_n = a$ per ogni $n > 0$, i sistemi normali sono del tipo $\{ax + b\}$ con b qualunque.

Si può ulteriormente osservare che le segnature minimali sono quelle del tipo $a_0 = p$ (p primo) $a_n = 1$ per ogni $n > 0$; ad esse dunque corrispondono ideali del tipo $(p, x + b)$ con $0 \leq b < p - 1$, che sono ovvia-

mente massimali, viceversa ad ideali massimali non corrisponde necessariamente una segnatura minimale. Un ideale principale $J = (ax^m + bx^{m-1} + \dots)$ ha segnatura del tipo $a_n = 0$ per ogni $n < m$, $a_n = a$ per ogni $n \geq m$ viceversa ad ogni segnatura di questo tipo corrispondono ideali principali.

3. TEOREMA FONDAMENTALE

DEF. 7. Data una sequenza di polinomi di $Z[x]$, chiamiamo *prolungamento multiplo* di tale sequenza l'insieme di infiniti polinomi ottenuti moltiplicando ciascuno dei polinomi dati per tutte le potenze intere non negative di x .

Il prolungamento multiplo di una sequenza di generatori di un ideale di $Z[x]$ genera l'ideale come Z -modulo.

Se p_1, \dots, p_n è una sequenza di polinomi di $Z[x]$ allora il suo prolungamento multiplo si può pensare come una matrice di n righe e ω colonne nel modo seguente:

$$\begin{aligned} 0, \dots, p_1, xp_1, x^2p_1, \dots, x^\kappa p_1, \dots \\ 0, \dots, 0, 0, \dots, p_2, xp_2, x^2p_2, \dots \\ 0, \dots, 0, \dots, p_n, xp_n, x^2p_n, \dots \end{aligned}$$

Ad ogni prolungamento multiplo resta ovviamente associato un insieme finito di segnature che chiameremo *multi segnatura*.

Nella dimostrazione del prossimo teorema ci servirà un semplice risultato di teoria degli insiemi, probabilmente noto, ma di cui non abbiamo trovato traccia nella letteratura consultata e che perciò riportiamo qui di seguito.

Dato un insieme S e una relazione binaria $<$ in S , definiamo una relazione binaria $<^*$, tra i sottoinsiemi finiti di S nel modo seguente: se A, B sono sottoinsiemi finiti di S , $A <^* B$ se e solo se esiste una applicazione suriettiva $f : B \rightarrow A$ tale che (i) $f(x) \leq x$ (per ogni $x \in B$) (ii) esiste almeno un $y \in B$ con $fy < y$.

PROPOSIZIONE 1. *Se $<$ è fondata allora $<^*$ è fondata.*

Dim. Consideriamo una sequenza decrescente di elementi di S , sia essa $A_0 * > A_1 * > \dots * > A_n * > \dots$. Sia poi f_n una applicazione da A_n ad A_{n+1} con le proprietà suddette. Consideriamo le sequenze di elementi di S ottenute a partire dagli elementi di A_0 per successiva applicazione delle f_n .