

VI. POLINOMI ORTOGONALI

1 Definizioni e Risultati Generali

Sia I un intervallo della retta reale, sia limitato sia non limitato. Sia $\rho(x)$ una funzione non negativa e misurabile su I tale che $\int_I \rho(x) dx < +\infty$ e $\rho(x) > 0$ quasi ovunque. Sia $L_2(I; \rho(x)dx)$ lo spazio di Hilbert di tutte le funzioni misurabili (identificando le funzioni uguali quasi ovunque) $f : I \rightarrow \mathbb{C}$ tali che $\int_I |f|^2 \rho dx < +\infty$, con prodotto scalare

$$(f, g)_\rho = \int_I f(x) \overline{g(x)} \rho(x) dx.$$

Inoltre supponiamo che gli integrali $\int_I |x|^n \rho(x) dx < +\infty$ ($n = 0, 1, 2, \dots$).¹ Quest'ipotesi implica che tutti i polinomi appartengono ad $L_2(I; \rho(x) dx)$.

Partendo dalla successione $\{1, x, x^2, x^3, \dots\}$ di funzioni linearmente indipendenti, possiamo applicare il processo di Gram-Schmidt, cioè lo schema ricorrente

$$p_0 = \frac{e_0}{\|e_0\|_\rho}, \quad p_{n+1} = \frac{e_{n+1} - \sum_{j=0}^n (e_{n+1}, p_j)_\rho p_j}{\|e_{n+1} - \sum_{j=0}^n (e_{n+1}, p_j)_\rho p_j\|_\rho},$$

dove $e_j(x) = x^j$ per $j \geq 0$, per costruire una successione $\{p_n\}_{n=0}^\infty$ con le seguenti proprietà:

1. I polinomi $p_n(x)$ sono reali.
2. Il grado del polinomio $p_n(x)$ è uguale ad n .
3. Il coefficiente principale di $p_n(x)$ (cioè, quello di x^n) è positivo.
4. I polinomi sono ortonormali, cioè

$$(p_n, p_m)_\rho = \int_I p_n(x) \overline{p_m(x)} \rho(x) dx = \delta_{n,m}.$$

Siccome l'insieme dei polinomi è denso in $L_2(I; \rho(x)dx)$ [Non lo dimostremo!], risulta una base ortonormale dello spazio di Hilbert $L_2(I; \rho(x)dx)$.

¹Se I è limitato, quest'ipotesi vale automaticamente.

Esiste un'unica successione di polinomi p_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) con le proprietà (1)-(4). Questi polinomi si chiamano i *polinomi ortogonali* rispetto al prodotto scalare $(\cdot, \cdot)_\rho$ (oppure rispetto al "peso" $\rho(x)$).

Lemma 1.1 *Si ha $(f, p_n)_\rho = 0$ per ciascun polinomio f di grado $< n$.*

Dimostrazione. Sia f un polinomio di grado $< n$. Allora f è una combinazione lineare dei polinomi p_0, p_1, \dots, p_{n-1} . Siccome $(p_j, p_n)_\rho = 0$ per $j = 0, 1, \dots, n-1$, risulta $(f, p_n)_\rho = 0$. \square

Teorema 1.2 *Gli zeri del polinomio p_n sono tutti semplici e contenuti all'interno dell'intervallo I .*

Dimostrazione. Sia $I = (a, b)$ dove $-\infty \leq a < b \leq +\infty$. Supponiamo che p_n ha m (con $m < n$) zeri $\alpha_1, \dots, \alpha_m$ in (a, b) e $n - m$ zeri in $\mathbb{C} \setminus (a, b)$. Allora p_n ammette la rappresentazione

$$p_n(x) = (x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m) q(x),$$

dove q è un polinomio di grado $n - m$ che non cambia segno in (a, b) ; dunque $q(x) \geq 0$ per $x \in (a, b)$. Consideriamo il polinomio f definito da

$$f(x) = (x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m).$$

Secondo il Lemma 1.1 risulta $(f, p_n)_\rho = 0$. In particolare,

$$0 = (f, p_n)_\rho = c \int_I [(x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m)]^2 q(x) \rho(x) dx,$$

dove la funzione sotto il segno dell'integrale è non negativa. Ciò implica che $c \int_I [(x - \alpha_1) \cdots (x - \alpha_m)]^2 q(x) \rho(x) = 0$ quasi ovunque. Contraddizione. Si conclude pertanto che tutti gli zeri di p_n appartengono ad (a, b) .

Per escludere l'esistenza di zeri multipli di p_n , rappresentiamo p_n come

$$p_n(x) = c(x - \beta_1)^{m_1} \cdots (x - \beta_r)^{m_r},$$

dove β_1, \dots, β_r sono gli zeri distinti di p_n e $m_1 + \dots + m_r = n$. Bisogna dimostrare che $r = n$, $m_1 = \dots = m_n = 1$ e $c > 0$. Se esiste un indice j con $m_j > 1$, definiamo $n_j = 0$ se m_j è pari e $n_j = 1$ se m_j è dispari (cioè, se $m_j = 3, 5, 7, \dots$). Poi consideriamo il polinomio g definito da

$$g(x) = (x - \beta_1)^{m_1} \cdots (x - \beta_{j-1})^{m_{j-1}} (x - \beta_j)^{n_j} (x - \beta_{j+1})^{m_{j+1}} \cdots (x - \beta_r)^{m_r}.$$

Siccome il grado di g è strettamente minore di n , si ha $(g, p_n)_\rho = 0$. In altre parole

$$0 = c \int_I (x - \beta_1)^{2m_1} \cdots (x - \beta_{j-1})^{2m_{j-1}} (x - \beta_j)^{m_j + n_j} (x - \beta_{j+1})^{2m_{j+1}} \cdots (x - \beta_r)^{2m_r},$$

dove la funzione sotto il segno dell'integrale è non negativa.² Quindi la funzione sotto il segno dell'integrale si annulla quasi ovunque. Contraddizione. Si conclude che tutti gli n zeri di p_n sono semplici. \square

I polinomi ortogonali soddisfano una relazione di ricorrenza a tre termini. Se si conoscono i coefficienti in tale relazione, risulta un metodo veloce (in particolare, dal punto di vista numerico) per calcolarli.

Teorema 1.3 Sia $\alpha_n = (xp_{n+1}, p_n)_\rho$, $c_n = (xp_n, p_n)_\rho$ e $\alpha_{-1} = 0$. Allora

$$(x - c_n)p_n(x) = \alpha_n p_{n+1}(x) + \alpha_{n-1} p_{n-1}(x), \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Dimostrazione. Siccome $xp_n(x)$ è un polinomio di grado $n+1$, è una combinazione lineare di $p_0, p_1, \dots, p_n, p_{n+1}$. Purtroppo

$$(xp_n, p_j)_\rho = \int_I p_n(x) \cdot xp_j(x) \rho(x) dx = 0, \quad j < n-1,$$

poichè $xp_j(x)$ con $j < n-1$ è un polinomio di grado $< n$. Quindi $xp_n(x)$ è una combinazione lineare di soltanto tre polinomi ortogonali: p_{n-1}, p_n, p_{n+1} . Scriviamo

$$xp_n(x) = c_n p_n(x) + \alpha_n p_{n+1}(x) + \beta_n p_{n-1}(x),$$

dove non c'è il terzo termine nella parte a destra per $n=0$. Si vede facilmente che

$$\begin{cases} \alpha_n = (xp_n, p_{n+1})_\rho \\ \beta_n = (xp_n, p_{n-1})_\rho = (xp_{n-1}, p_n)_\rho = \alpha_{n-1} \\ c_n = (xp_n, p_n)_\rho \end{cases}$$

Abbiamo dimostrato la tesi. \square

2 Esempi

Discutiamo alcuni esempi notevoli.

1. $I = (-1, 1)$, $\rho(x) \equiv 1$. In tal caso i polinomi ortogonali sono proporzionali ai polinomi di Legendre $P_n(x)$. Infatti, la normalizzazione $\int_{-1}^1 P_n(x)^2 dx = 2/(2n+1)$ implica

$$p_n(x) = \sqrt{\frac{2n+1}{2}} P_n(x),$$

dove $P_0(x) = 1$, $P_1(x) = x$ e $(2n+1)xP_n(x) = (n+1)P_{n+1}(x) + nP_{n-1}(x)$.

²Si osservi che $m_j + n_j$ è pari.

2. $I = (-1, 1)$, $\rho(x) = (1 - x^2)^m$ dove $m = 0, 1, 2, \dots$. Le funzioni associate di Legendre $P_l^m(x)$ hanno la forma [Vladimirov, p. 333]

$$P_l^m(x) = (1 - x^2)^{m/2} \mathcal{P}_l^m(x),$$

dove $l = m, m + 1, m + 2, \dots$ e $\mathcal{P}_l^m(x)$ è un polinomio di grado $l - m$ tale che $P_l^0(x) = \mathcal{P}_l^0(x) = P_l(x)$ è il polinomio di Legendre di grado l . Le funzioni associate di Legendre soddisfano la relazione di ortogonalità

$$\int_{-1}^1 P_l^m(x) P_{l'}^m(x) dx = \frac{2}{2l + 1} \frac{(l + m)!}{(l - m)!} \delta_{l, l'}.$$

Quindi i polinomi ortogonali sono

$$p_n(x) = \sqrt{\frac{2n + 2m + 1}{2} \frac{n!}{(n + 2m)!}} \mathcal{P}_{n+m}^m(x).$$

3. Applicando il binomio di Newton alla formula di De Moivre $(\cos x + i \sin x)^n = \cos(nx) + i \sin(nx)$, separando la parte reale da quella immaginaria e utilizzando $(i)^{2k} = (-1)^k$, si trovano le rappresentazioni

$$\begin{aligned} \cos(nx) &= \sum_{\substack{j=0, \dots, n \\ n-j \text{ pari}}} \binom{n}{j} (\cos x)^j (-1)^{(n-j)/2} (\sin x)^{n-j} \\ &= \sum_{\substack{j=0, \dots, n \\ n-j \text{ pari}}} \binom{n}{j} (\cos x)^j ((\cos x)^2 - 1)^{(n-j)/2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sin(nx) &= \sum_{\substack{j=0, \dots, n \\ n-j \text{ dispari}}} \binom{n}{j} (\cos x)^j (-1)^{(n-j)/2} (\sin x)^{n-j-1} \\ &= \sum_{\substack{j=0, \dots, n \\ n-j \text{ dispari}}} \binom{n}{j} (\cos x)^j ((\cos x)^2 - 1)^{(n-j-1)/2}, \end{aligned}$$

sostituendo $(\sin x)^2 = 1 - (\cos x)^2$ per trovare il terzo membro delle due uguaglianze. Queste equazioni mostrano che $\cos(nx)$ e $\sin((n+1)x)/\sin x$ sono polinomi di $\cos x$ di grado n con coefficiente principale positivo. Definiamo il polinomio di Chebyshev di prima specie

$$T_n(t) = \cos(nx), \quad t = \cos x \in [-1, 1],$$

ed il polinomio di Chebyshev di seconda specie

$$U_n(t) = \frac{\sin((n+1)x)}{\sin x}, \quad t = \cos x.$$

Questi polinomi soddisfano le relazioni di ricorrenza

$$2tT_n(t) = \frac{1}{2}(T_{n+1}(t) + T_{n-1}(t)), \quad T_0(t) = 1, \quad T_1(t) = t, \quad T_2(t) = 2t^2 - 1;$$

$$2tU_n(t) = \frac{1}{2}(U_{n+1}(t) + U_{n-1}(t)), \quad U_0(t) = 1, \quad U_1(t) = 2t.$$

Queste relazioni seguono facilmente dalle formule di addizione per le funzioni trigonometriche. Finalmente proviamo le relazioni di ortogonalità. Si ha (sostituendo $t = \cos x$)

$$\int_{-1}^1 T_n(t)T_m(t) \frac{dt}{\sqrt{1-t^2}} = \int_0^\pi \cos(nx) \cos(mx) dx = \frac{\pi}{2}(1 + \delta_{n,0})\delta_{n,m};$$

$$\int_{-1}^1 U_n(t)U_m(t)\sqrt{1-t^2} dt = \int_0^\pi \sin((n+1)x) \sin((m+1)x) dx = \frac{\pi}{2}\delta_{n,m}.$$

In altre parole, i polinomi ortogonali per $I = (-1, 1)$ e $\rho(t) = 1/\sqrt{1-t^2}$ sono

$$p_n(t) = \sqrt{\frac{2 - \delta_{n,0}}{\pi}} T_n(t).$$

I polinomi ortogonali per $I = (-1, 1)$ e $\rho(t) = \sqrt{1-t^2}$ sono

$$p_n(t) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} U_n(t).$$

4. $I = (-1, 1)$, $\rho(x) = (1-x)^\alpha(1+x)^\beta$, dove $\alpha, \beta > -1$. In tal caso i polinomi ortogonali sono multipli dei polinomi di Jacobi $P_n^{(\alpha, \beta)}(x)$.
5. $I = \mathbb{R}$, $\rho(x) = e^{-x^2}$. In tal caso i polinomi ortogonali sono multipli dei polinomi di Hermite $H_n(x)$.
6. $I = (0, +\infty)$, $\rho(x) = x^\alpha e^{-x}$, dove $\alpha > -1$. In tal caso i polinomi ortogonali sono i polinomi di Laguerre $L_n^{(\alpha)}(x)$.

I polinomi di Jacobi $P_n^{(\alpha, \beta)}$ contengono come casi particolari quelli di Legendre ($\alpha = \beta = 0$), di Legendre associato ($\alpha = \beta = m$ dove $m = 0, 1, 2, \dots$), di Chebyshev di prima specie ($\alpha = \beta = -1/2$) e di Chebyshev di seconda specie ($\alpha = \beta = 1/2$). I polinomi di Jacobi, Hermite e Laguerre si chiamano anche i polinomi ortogonali classici. Queste classi di polinomi hanno le seguenti proprietà:

1. I polinomi di una certa classe (con α, β fissate) soddisfano una relazione di ricorrenza a tre termini, come tutti i polinomi ortogonali con peso fissato. I polinomi di Jacobi (con $\alpha = \beta > -1$) e di Hermite soddisfano $p_n(-x) = (-1)^n p_n(x)$, poichè l'intervallo I è simmetrico rispetto allo zero e $\rho(x)$ è una funzione pari; quindi $c_n = (xp_n, p_n)_\rho = 0$ nelle loro relazioni di ricorrenza.

2. I polinomi di una certa classe ammettono una funzione generatrici facile:

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n^{(\alpha,\beta)}(x)t^n = 2^{\alpha+\beta} R^{-1} (1-t+R)^{-\alpha} (1+t+R)^{-\beta}, \quad R = \sqrt{1-2xt+t^2};$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{H_n(x)}{n!} t^n = e^{2xt-t^2}; \quad \sum_{n=0}^{\infty} L_n^{(\alpha)}(x)t^n = (1-t)^{-\alpha-1} e^{-xt/(1-t)}.$$

3. I polinomi di una certa classe soddisfano una formula di Rodrigues:

$$P_n^{(\alpha,\beta)}(x) = \frac{(-1)^n}{2^n n!} (1-x)^{-\alpha} (1+x)^{-\beta} \left(\frac{d}{dx} \right)^n [(1-x)^{n+\alpha} (1+x)^{n+\beta}];$$

$$H_n(x) = (-1)^n e^{x^2} \left(\frac{d}{dx} \right)^n e^{-x^2}; \quad L_n^{(\alpha)}(x) = x^{-\alpha} e^x \left(\frac{d}{dx} \right)^n (x^{n+\alpha} e^{-x}).$$

4. I polinomi di una certa classe (con α, β fissate) sono gli autovettori di un opportuno operatore di Sturm-Liouville e quindi soddisfano un'equazione differenziale lineare omogenea del secondo ordine. Esempi:

$$(1-x^2)u'' + [\beta - \alpha - (\alpha + \beta + 2)x]u' + n(n + \alpha + \beta + 1)u = 0, \quad u(x) = P_n^{(\alpha,\beta)}(x);$$

$$u'' - 2xu' + 2nu = 0, \quad u(x) = H_n(x);$$

$$xu'' + (\alpha + 1 - x)u' + nu = 0, \quad u(x) = L_n^{(\alpha)}(x).$$

Osserviamo che queste tre equazioni differenziali si possono riscrivere nella forma

$$L_{\text{Jacobi}}^{(\alpha,\beta)} u = -((1-x)^{\alpha+1} (1+x)^{\beta+1} u')' = n(n + \alpha + \beta + 1) (1-x)^\alpha (1+x)^\beta u;$$

$$L_{\text{Hermite}} u = -\left(e^{-x^2} u'\right)' = 2n e^{-x^2} u;$$

$$L_{\text{Laguerre}}^{(\alpha)} u = -\left(x^{\alpha+1} e^{-x} u'\right)' = n x^\alpha e^{-x} u.$$

Grazie alle analogie tra loro, i polinomi ortogonali classici vengono spesso studiati insieme.

3 Polinomi di Legendre

I polinomi di Legendre $P_l(\xi)$ si possono definire nei seguenti modi:

1. tramite la formula generatrice

$$\frac{1}{\sqrt{1-2\xi h + h^2}} = \sum_{l=0}^{\infty} P_l(\xi) h^l,$$

2. tramite l'equazione differenziale,

$$-[(1-x^2)P_l']'(x) = l(l+1)P_l(x), \quad -1 < x < +1; \quad P_l(1) = 1,$$

3. tramite l'ortogonalità: $P_l(\xi)$ sono i polinomi in ξ di grado l con coefficiente principale positivo tali che

$$\int_{-1}^1 P_l(\xi)P_{l'}(\xi) = \delta_{ll'} \frac{2}{2l+1},$$

4. tramite la formula di Rodrigues

$$P_l(\xi) = \frac{1}{2^l l!} \left(\frac{d}{d\xi} \right)^l (\xi^2 - 1)^l,$$

5. tramite la formula di ricorrenza

$$(2l+1)\xi P_l(\xi) = (l+1)P_{l+1}(\xi) + lP_{l-1}(\xi), \quad P_0(\xi) = 1, \quad P_1(\xi) = \xi.$$

Noi dimostriamo l'equivalenza tra queste definizioni.

Consideriamo l'equazione differenziale

$$-[(1-x^2)u']'(x) = \lambda u(x), \quad -1 < x < +1, \quad (3.1)$$

sotto le condizioni iniziali che i limiti di $u(x)$ per $x \rightarrow \pm 1$ esistano finiti. Questo problema al contorno ha soluzioni polinomiali per $\lambda = l(l+1)$ dove $l = 0, 1, 2, \dots$. Verifichiamo se i polinomi

$$P_l(x) = \frac{1}{2^l l!} \left(\frac{d}{dx} \right)^l (x^2 - 1)^l, \quad l = 0, 1, 2, \dots, \quad (3.2)$$

soddisfano la (3.1) per $\lambda = l(l+1)$. Questi polinomi (di grado l) sono detti *polinomi di Legendre* e la (3.2) si dice *formula di Rodrigues*. Infatti, ponendo $W_l(x) = (x^2 - 1)^l$ e derivando l'identità

$$(x^2 - 1)W_l'(x) - 2lxW_l(x) = 0$$

$l+1$ volte, si ottiene

$$(x^2 - 1)W_l^{(l+2)}(x) + 2xW_l^{(l+1)}(x) - l(l+1)W_l^{(l)}(x) = 0.$$

Dunque la funzione $W_l^{(l)}(x) = 2^l l! P_l(x)$ soddisfa l'equazione (3.1).

Si dimostra facilmente che i polinomi di Legendre sono ortogonali nello spazio $L_2(-1, 1)$. Infatti, utilizzando la (3.1) si ha

$$\begin{aligned} & [l(l+1) - k(k+1)] \int_{-1}^1 P_l(x)P_k(x) dx \\ &= \int_{-1}^1 \left[P_l(k) [(1-x^2)P_k']' - P_k(x) [(1-x^2)P_l']' \right] dx \\ &= - \int_{-1}^1 \left[P_l'(k)(1-x^2)P_k'(x) - P_k'(x)(1-x^2)P_l'(x) \right] dx = 0, \end{aligned}$$

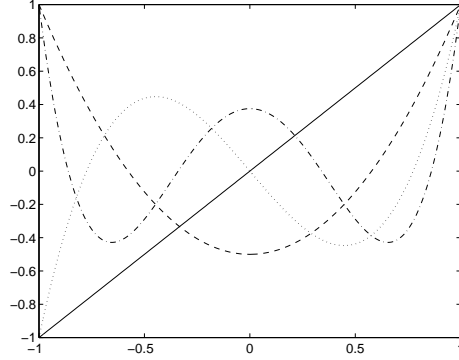


Figura 3.1: I polinomi di Legendre di ordine 1, 2, 3 e 4. Si osservi che il numero degli zeri è uguale al grado del polinomio.

dopo un'integrazione per parti. Quindi $(P_l, P_k) = \int_{-1}^1 P_l(x)P_k(x) dx = 0$ se $l \neq k$. Per trovare il fattore di normalizzazione, calcoliamo (P_l, P_l) tramite l integrazioni per parti consecutive. Otteniamo

$$\begin{aligned} (P_l, P_l) &= \frac{(-1)^l}{2^{2l} \cdot (l!)^2} \int_{-1}^1 (x^2 - 1)^l \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l \\ &= \frac{(2l)!}{2^{2l} \cdot (l!)^2} \int_{-1}^1 (1 - x^2)^l dx = \frac{(2l)!}{2^{2l} \cdot (l!)^2} \frac{2^{l+1} \cdot l!}{(2l+1)(2l-1)\cdots 1} = \frac{2}{2l+1}, \end{aligned}$$

dove è stata applicata la formula di ricorrenza $(I_{l-1}/I_l) = 1 + (1/2l)$, $I_0 = 2$, per $I_l = \int_{-1}^1 (1 - x^2)^l dx$. Quindi $\sqrt{l + \frac{1}{2}} P_l(x)$ ha norma 1 in $L_2(-1, 1)$.

Per trovare una formula di ricorrenza per i polinomi di Legendre calcoliamo prima il prodotto scalare (P_{l+1}, xP_l) . Infatti, dopo $l+1$ integrazioni per parti consecutive e utilizzando $(xf)^{(l+1)} = xf^{(l+1)} + (l+1)f^{(l)}$ si ottiene

$$\begin{aligned} (P_{l+1}, xP_l) &= \frac{(-1)^{l+1}}{2^{2l+1} \cdot ((l+1)!(l!))} \\ &\cdot \int_{-1}^1 (x^2 - 1)^{l+1} \left[x \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l+1} (x^2 - 1)^l + (l+1) \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l \right] dx \\ &= \frac{(-1)^{l+1}}{2^{2l+1} \cdot (l!)^2} \int_{-1}^1 (x^2 - 1)^{l+1} \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l dx \\ &= \frac{1}{2^{2l+1} \cdot (l!)^2} \int_{-1}^1 (1 - x^2)^{l+1} \left(\frac{d}{dx} \right)^{2l} (x^2 - 1)^l dx \\ &= \frac{(2l)!}{2^{2l+1} \cdot (l!)^2} \frac{2^{l+2} \cdot (l+1)!}{(2l+3)(2l+1)\cdots 3 \cdot 1} = \frac{2(l+1)}{(2l+1)(2l+3)}. \end{aligned}$$

Siccome i polinomi di Legendre sono ortogonali, essi sono linearmente indipendenti. Dunque

$$(2l+1)xP_l(x) = \sum_{j=0}^{\infty} a_j P_j(x),$$

dove $a_j = 0$ per $j > l+1$ [poichè $xP_l(x)$ ha grado $l+1$]. Risultano $(2l+1)(xP_l, P_j) = (2l+1)(P_l, xP_j) = 0$ per $l < j-1$ [poichè $xP_j(x)$ ha grado $< l$] e $(2l+1)(xP_l, P_l) = 0$ [poichè $xP_l(x)^2$ è una funzione dispari]. Quindi

$$(2l+1)xP_l(x) = a_{l+1}P_{l+1}(x) + a_{l-1}P_{l-1}(x).$$

Infine troviamo

$$\begin{aligned} (2l+1)(xP_l, P_{l+1}) &= a_{l+1}(P_{l+1}, P_{l+1}) = a_{l+1}(2/(2l+3)); \\ (2l+1)(xP_{l-1}, P_l) &= a_{l-1}(P_{l-1}, P_{l-1}) = a_{l-1}(2/(2l-1)). \end{aligned}$$

Quindi $a_{l+1} = l+1$ e $a_{l-1} = l$. Risulta la *formula di ricorrenza*

$$(2l+1)xP_l(x) = (l+1)P_{l+1}(x) + lP_{l-1}(x), \quad P_0(x) = 1, \quad P_1(x) = x. \quad (3.3)$$

Per induzione matematica si dimostrano facilmente

$$\begin{aligned} P_l(1) = 1, \quad P_l(-1) = (-1)^l, \quad P_l(-x) = (-1)^l P_l(x); \\ -1 \leq P_l(x) \leq +1, \quad -1 \leq x \leq +1. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Dimostriamo ora la *formula generatrice*

$$\sum_{l=0}^{\infty} P_l(x)h^l = \frac{1}{\sqrt{1-2xh+h^2}}, \quad |h| < 1. \quad (3.5)$$

Infatti, scriviamo $F(x, h)$ per la parte a sinistra della (3.5). Per $|h| < 1$ è permessa la derivazione termine a termine rispetto ad h , grazie alla (3.4). Si trovano facilmente le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} \sum_{l=0}^{\infty} (2l+1)xP_l(x)h^l &= xF(x, h) + 2xh \sum_{l=0}^{\infty} lP_l(x)h^{l-1} = xF(x, h) + 2xh \frac{\partial F}{\partial h}; \\ \sum_{l=0}^{\infty} (l+1)P_{l+1}(x)h^l &= \sum_{l=1}^{\infty} lP_l(x)h^{l-1} = \sum_{l=0}^{\infty} lP_l(x)h^{l-1} = \frac{\partial F}{\partial h}; \\ \sum_{l=1}^{\infty} lP_{l-1}(x)h^l &= h^2 \sum_{l=1}^{\infty} (l-1)P_{l-1}(x)h^{l-2} + h \sum_{l=1}^{\infty} P_{l-1}(x)h^{l-1} \\ &= h^2 \frac{\partial F}{\partial h} + hF(x, h). \end{aligned}$$

Applicando la (3.3) si ha

$$xF(x, h) = (1-2xh+h^2) \frac{\partial F}{\partial h} + hF(x, h),$$

dove $F(x, 0) = P_0(x) = 1$. Oppure:

$$\frac{\partial F/\partial h}{F(x, h)} = \frac{x - h}{1 - 2xh + h^2}, \quad F(x, 0) = 1.$$

La soluzione unica di questo problema di Cauchy è la funzione $F(x, h)$ data dalla parte a destra della (3.5).