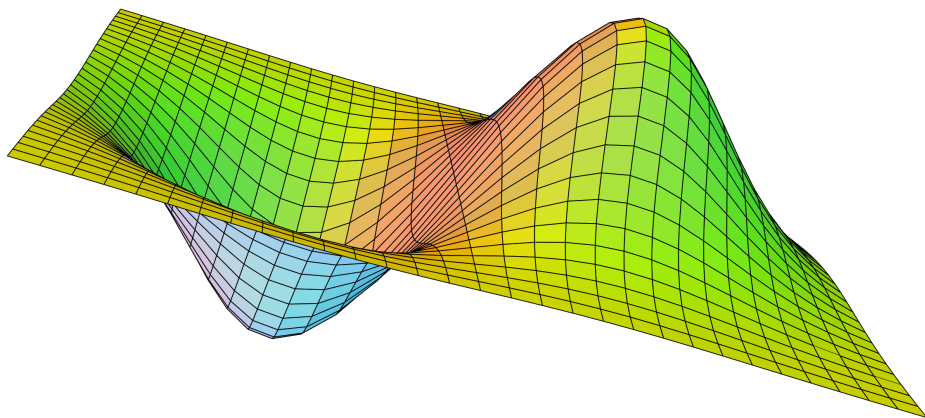


NOTE DI ANALISI 2

MANUEL DEODATO



INDICE

1	Calcolo differenziale in più variabili	3
1.1	Derivate parziali	3
1.2	Derivate direzionali	3
1.3	Derivate successive	4
1.4	Funzioni differenziabili	5
1.5	Funzioni composte	7
1.6	Massimi e minimi relativi	8
2	Calcolo integrale in più variabili	9
2.1	Integrazione in dimensioni superiori	9
2.2	Misura di insiemi	10
2.2.1	Insiemi generati da funzioni	11
2.3	Integrabilità di funzioni continue	11
2.4	Integrali doppi	12
2.5	Integrali tripli	14
2.6	Cambiamento di variabili	15
2.6.1	Ammissibilità del cambiamento di variabili	16
2.6.2	Matrice Jacobiana	17
2.7	Integrali impropri	17
2.7.1	Integrali in domini non limitati	18
2.7.2	Integrali di funzioni non limitate	19
3	Curve e superfici	20
3.1	Curve in \mathbb{R}^n	20
3.2	Lunghezza di una curva	22
3.3	Superfici	27
3.4	Area di una superficie	29
3.5	Il teorema delle funzioni implicite	30
3.6	Massimi e minimi vincolati	33
4	Forme differenziali	37
4.1	Lavoro di una forza	37
4.2	Introduzione alle forme differenziali	38
4.3	Forme esatte	40
4.3.1	La formula di Gauss-Green	44

1 CALCOLO DIFFERENZIALE IN PIÙ VARIABILI

1.1 Derivate parziali

Una funzione di più variabili $f(x, y) : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ può essere derivata mantenendo fissa una variabile e derivando rispetto all'altra. Questo corrisponde al valutare la variazione di f lungo un asse specifico.

Definizione 1.1 (Derivata parziale)

Sia $f(x_1, \dots, x_n) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$; la sua derivata parziale rispetto a x_k è:

$$\frac{\partial f}{\partial x_k}(x_1, \dots, x_n) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_1, \dots, x_k + h, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_k, \dots, x_n)}{h} \quad (1.1.1)$$

Il vettore che ha per componenti le derivate di f rispetto a ciascuna delle sue variabili si chiama **gradiente** e si indica con ∇f .

1.2 Derivate direzionali

È possibile studiare la variazione di f lungo una particolare direzione individuata dal versore \hat{n} . Una retta parallela a \hat{n} e passante per un punto x si individua con $x + t\hat{n}$; fissando i punti x e \hat{n} , $g(t) := f(x + t\hat{n})$ è una funzione di una variabile e $g'(0)$ è la derivata direzionale di f lungo \hat{n} :

$$\frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x) = g'(0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x + h\hat{n}) - f(x)}{h} \quad (1.2.1)$$

Più in generale:

$$g'(t) \stackrel{\text{def}}{=} \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(t+h) - g(t)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_t + h\hat{n}) - f(x_t)}{h} \equiv \frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x_t) \quad (1.2.2)$$

con $x_t = x + t\hat{n}$.

Osservazione 1.1. Conoscendo ∇f , si può calcolare la derivata direzionale di f come $\nabla f \cdot \hat{n}$.

Esempio 1.1. Si calcola la derivata direzionale di $f(x, y) = x^2y - e^{x+y}$ lungo la direzione $\hat{n} = \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}\right)$.

Svolgimento. Si ha

$$g(t) = f\left(x + \frac{t}{2}, y + \frac{\sqrt{3}}{2}t\right) = \left(x + \frac{t}{2}\right)^2 \left(y + \frac{\sqrt{3}}{2}t\right) - \exp\left[x + y + t\left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)\right]$$

Allora

$$\frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x, y) = g'(0) = xy + \frac{\sqrt{3}}{2}x^2 - \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)e^{x+y}$$

Alternativamente $\nabla f = (2xy - e^{x+y}, x^2 - e^{x+y})$, quindi $\partial_{\hat{n}} f = \nabla f \cdot \hat{n} = xy - \frac{1}{2}e^{x+y} + \frac{\sqrt{3}}{2}x^2 - \frac{\sqrt{3}}{2}e^{x+y} = xy + \frac{\sqrt{3}}{2}x^2 - \left(\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)e^{x+y}$. ■

Teorema 1.1

Se $f : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ ha un massimo o minimo relativo in x_0 interno ad A e se ammette derivata lungo \hat{n} in x_0 , allora:

$$\frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x_0) = 0 \quad (1.2.3)$$

Dimostrazione. Si prende $g(t) = f(x_0 + t\hat{n})$ che, per costruzione, ha un minimo in $t = 0$, quindi $g'(0) = 0$, da cui segue la tesi. \square

In particolare, se f è derivabile in x_0 , tutte le derivate parziali si annullano in quel punto; in questo caso, x_0 è detto **punto stazionario**.

Osservazione 1.2. Nel caso a una variabile, i punti di massimo/minimo che cadevano sulla frontiera di un insieme erano, solitamente, un numero finito; qua chiaramente non è più così.

Esempio 1.2. Calcolare massimi e minimi di $f(x, y) = (x^2 + y^2 - 1)e^{x+y}$ nel cerchio chiuso centrato nell'origine e di raggio 1.

Svolgimento. Sul bordo del cerchio $x^2 + y^2 = 1$, quindi $f \equiv 0$. All'interno:

$$\begin{aligned} f_x &= 2xe^{x+y} + (x^2 + y^2 - 1)e^{x+y} \\ f_y &= 2ye^{x+y} + (x^2 + y^2 - 1)e^{x+y} \end{aligned}$$

che si annullano quando

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 + 2x - 1 &= 0 \\ x^2 + y^2 + 2y - 1 &= 0 \end{aligned} \Rightarrow 2x - 2y = 0 \Rightarrow x = y$$

Sostituendo $x = y$ nella prima equazione, ad esempio, si ottengono due soluzioni, una sola delle quali appartiene al cerchio; questo corrisponderà al punto di minimo della funzione:

$$f\left(\frac{\sqrt{3}-1}{2}, \frac{\sqrt{3}-1}{2}\right) = (1 - \sqrt{3})e^{\sqrt{3}-1} < 0$$

■

In più dimensioni vale un analogo del teorema di Lagrange:

Teorema 1.2

Sia $f(x) : A \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ e $x_0 \in A$, con $I(x_0, r) \subset A$. Considerando una direzione \hat{n} , si definisce $g(s) = f(x_0 + s\hat{n})$ per $|s| < r$. Vale l'analogo del teorema di Lagrange:

$$f(x_0 + s\hat{n}) - f(x_0) = g(s) - g(0) = sg'(\tau) = s \frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x_0 + \tau\hat{n}) \quad (1.2.4)$$

1.3 Derivate successive

Sia f una funzione per cui esistono le derivate prime e sono anch'esse derivabili; le derivate seconde potranno essere derivate prima rispetto a x_i e poi rispetto a x_j o viceversa. In generale se f è una funzione di m , si hanno m^n derivate di ordine n . Per le derivate seconde miste¹ vale il seguente.

¹Chiaramente il risultato vale in generale, ma si affronta per funzione di due variabili nel caso delle derivate seconde miste per semplicità.

Teorema 1.3 (Teorema di Schwarz)

Sia f una funzione derivabile in un intervallo I del punto (x, y) e siano queste continue nello stesso intervallo; allora $f_{xy}(x, y) = f_{yx}(x, y)$.

Dimostrazione. Siano $h, k \in \mathbb{R} : (x + h, y + k) \in I$ e sia

$$A(h, k) = f(x + h, y + k) - f(x + h, y) - f(x, y + k) + f(x, y)$$

Prendendo $p(t) = f(t, y + k) - f(t, y)$, si ha $A(h, k) = p(x + h) - p(x)$; per Lagrange:

$$A(h, k) = p'(\xi)h = [f_x(\xi, y + k) - f_x(\xi, y)]h, \quad x < \xi < x + h$$

Applicando nuovamente Lagrange, si ha $A(h, k) = f_{yx}(\xi, \eta)hk$, $y < \eta < y + k$. Ripetendo il discorso con $q(t) = f(x + h, t) - f(x, t)$, si trova $A(h, k) = f_{xy}(\sigma, \tau)hk$, quindi $f_{yx}(\xi, \eta) = f_{xy}(\sigma, \tau)$, dove $x < \sigma < x + h$ e $y < \tau < y + k$. Prendendo il limite per $h, k \rightarrow 0$, risulta $f_{xy}(x, y) = f_{yx}(x, y)$ per continuità delle derivate seconde. □

Come per funzioni di una variabile, vale la formula di Taylor.

Teorema 1.4 (Formula di Taylor)

Sia $f(x)$ di classe C^2 in $A \subset \mathbb{R}^n$ e x_0 punto interno ad A ; in un intorno di x_0 , allora, si ha:

$$f(x) = f(x_0) + \langle \nabla f(x_0), x - x_0 \rangle + \frac{1}{2} \langle Hf(x_0)(x - x_0), x - x_0 \rangle + R_2(x; x_0) \quad (1.3.1)$$

con

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{R_2(x; x_0)}{\|x - x_0\|^2} = 0$$

1.4 Funzioni differenziabili

Una funzione derivabile, anche in ogni direzione, non è necessariamente continua in più variabili.

Esempio 1.3. La funzione $f(x, y) = \begin{cases} \frac{xy^2}{x^2+y^2} & , (x, y) \neq 0 \\ 0 & , (x, y) = 0 \end{cases}$ ha derivate in ogni direzione nel punto $(0, 0)$, ma non è continua; prendendo $x_k = (1/k, 1/k^2)$ per $k \rightarrow \infty$, si ha $x_k \rightarrow (0, 0)$, ma $f(x_k) = \frac{1/k^4}{2/k^4} \rightarrow \frac{1}{2}$.

Definizione 1.2 (Differenziabilità)

Una funzione $f(x)$ si dice differenziabile in x_0 se è derivabile in x_0 e se:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0) - \langle \nabla f(x_0), x - x_0 \rangle}{\|x - x_0\|} = 0 \quad (1.4.1)$$

Questa definizione impone che una funzione sia differenziabile in punto se esiste un piano tangente che la approssima precisamente nel punto stesso.

Teorema 1.5

Una funzione $f(x)$ differenziabile in x_0 è continua in x_0 ed è derivabile in ogni direzione.

Dimostrazione. Si mostra che è continua:

$$f(x) - f(x_0) = \frac{f(x) - f(x_0) - \langle \nabla f(x_0), x - x_0 \rangle}{\|x - x_0\|} \|x - x_0\| + \langle \nabla f(x_0), x - x_0 \rangle$$

Per $x \rightarrow x_0$ il primo termine di destra va a 0 per assunzione di differenziabilità e l'altro anche perché diventa un prodotto scalare per 0, quindi si verifica $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$.

Data generica direzione \hat{v} con $x = x_0 + t\hat{v}$, usando ancora definizione di differenziabilità:

$$\lim_{t \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + t\hat{v}) - f(x_0) - \langle \nabla f(x_0), t\hat{v} \rangle}{t} = 0$$

Visto che $\langle \nabla f(x_0), t\hat{v} \rangle = t\langle \nabla f(x_0), \hat{v} \rangle$, si ottiene la tesi. \square

La direzione di massimo incremento di una funzione è quella del gradiente. Per mostrarlo, si parte da x_0 , assumendo che non sia un punto stazionario; si definisce, allora, $\hat{n} = \frac{\nabla f(x_0)}{\|\nabla f(x_0)\|}$, da cui:

$$\frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x_0) = \langle \nabla f(x_0), \hat{n} \rangle = \|\nabla f(x_0)\|$$

Prendendo altra direzione generica \hat{v} , si ha:

$$\frac{\partial f}{\partial \hat{v}}(x_0) = \langle \nabla f(x_0), \hat{v} \rangle \leq \|\nabla f(x_0)\| \|\hat{v}\| = \|\nabla f(x_0)\| \equiv \frac{\partial f}{\partial \hat{n}}(x_0)$$

Dalla definizione di funzione differenziabile il piano $z = f(x_0, y_0) + f_x(x_0, y_0)(x - x_0) + f_y(x_0, y_0)(y - y_0)$ è quello che meglio approssima la funzione in (x_0, y_0) .

Si è concluso che una funzione differenziabile è derivabile in ogni direzione, ma una funzione derivabile non è differenziabile in generale. Vale, però, il seguente.

Teorema 1.6 (Teorema del differenziale totale)

Sia $f(x)$ derivabile in x_0 e siano le sue derivate continue nello stesso punto; allora f è differenziabile in x_0 .

Dimostrazione. Si vuole dimostrare che

$$\lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} \frac{f(x,y) - f(x_0,y_0) - f_x(x_0,y_0)(x - x_0) - f_y(x_0,y_0)(y - y_0)}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} = 0$$

Si usa il teorema di Lagrange per riscrivere $f(x,y) - f(x_0,y_0)$:

$$\begin{aligned} f(x, y_0) - f(x_0, y_0) &= f_x(\xi, y_0)(x - x_0), \quad x_0 < \xi < x \\ f(x, y) - f(x, y_0) &= f_y(x, \eta)(y - y_0), \quad y_0 < \eta < y \\ \Rightarrow f(x, y) - f(x_0, y_0) &= f_x(\xi, y_0)(x - x_0) + f_y(x, \eta)(y - y_0) \end{aligned}$$

Il limite scritto sopra si riscrive come:

$$\begin{aligned} \lim_{(x,y) \rightarrow (x_0,y_0)} [f_x(\xi, y_0) - f_x(x_0, y_0)] \frac{x - x_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} + \\ + [f_y(x, \eta) - f_y(x_0, y_0)] \frac{y - y_0}{\sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}} \end{aligned}$$

Essendo le frazioni ≤ 1 e visto che le quantità fra parentesi quadre, questo limite si maggiore con la somma delle parentesi quadre, che tende a 0 per $(x, y) \rightarrow (x_0, y_0)$. \square

1.5 Funzioni composte

Data una funzione $x(t) : \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^n$, si definisce, per una generica direzione v :

$$\frac{\partial x}{\partial v} = \left(\frac{\partial x_1}{\partial v}, \dots, \frac{\partial x_n}{\partial v} \right)^\top \quad (1.5.1)$$

Vale il seguente per la derivata della funzione composta.

Teorema 1.7

Siano $E \subset \mathbb{R}^k$, $F \subset \mathbb{R}^n$ e $x(t) : E \rightarrow F$, $f(x) : F \rightarrow \mathbb{R}$ funzioni di classe C^1 . Allora la funzione composta $g(t) = f(x(t)) : E \rightarrow \mathbb{R}$ è di classe C^1 e per ogni direzione v :

$$\frac{\partial g}{\partial v}(t) = \left\langle \nabla f(x(t)), \frac{\partial x}{\partial v}(t) \right\rangle \quad (1.5.2)$$

Dimostrazione. Si ha $g(t + hv) - g(t) = f(x(t + hv)) - f(x(t)) = f(x(t) + [x(t + hv) - x(t)]) - f(x(t))$. Si prende $s = \|x(t + hv) - x(t)\|$ e la direzione $w = \frac{x(t + hv) - x(t)}{s}$ e si usa il teorema di Lagrange:

$$g(t + hv) - g(t) = f(x(t) + sw) - f(x(t)) = s \frac{\partial f}{\partial w}(x(t) + \tau w) = s \langle \nabla f(x(t) + \tau w), w \rangle$$

con $0 < \tau < s$. Dividendo per h e prendendo il limite $h \rightarrow 0$, per definizione $s \rightarrow 0$ e, quindi, $\tau \rightarrow 0$, mentre $\frac{x(t + hv) - x(t)}{h} \rightarrow \frac{\partial x}{\partial v}(t)$ quindi:

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(t + hv) - g(t)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \left\langle \nabla f(x(t) + \tau w), \frac{x(t + hv) - x(t)}{h} \right\rangle = \left\langle \nabla f(x(t)), \frac{\partial x}{\partial v}(t) \right\rangle$$

\square

Nel caso particolare $k = 1$, $x(t)$ è una curva e $g(t)$ è funzione di una sola variabile con

$$g'(t) = \sum_{h=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_h}(x(t)) x'_h(t) \equiv \left\langle \nabla f(x(t)), x'(t) \right\rangle$$

Spesso si prende $x(t) = x + tv$, cioè retta passante per x lungo direzione v ; in questo caso $g'(t) = \nabla f(x + tv) \cdot v$. Se le derivate seconde sono continue, le derivate prime sono differenziabili e si può scrivere:

$$g''(t) = \sum_{i=1}^n v_i \frac{d}{dt} D_i f(x + tv) = \sum_{i=1}^n v_i \sum_{j=1}^n v_j D_{ij} f(x + tv) \quad (1.5.3)$$

Indicando con $Hf = \nabla f \nabla^\top$ la matrice Hessiana di f , allora $\sum_j v_j D_{ij} f(x + tv) \equiv [Hf(x + tv)v]_i$, cioè è la componente i -esima del vettore tra parentesi quadre, essendo Hf una matrice. Allora:

$$\begin{aligned} g'(0) &= \nabla f(x) \cdot v \\ g''(0) &= \langle Hf(x)v, v \rangle \end{aligned} \quad (1.5.4)$$

1.6 Massimi e minimi relativi

Perché una funzione f di più variabili abbia un punto di massimo o di minimo in x_0 , è condizione necessaria che per ogni direzione v , valga $g'(0) = 0$ e $g''(0) \leq 0$ o $g''(0) \geq 0$, cioè:

$$\begin{aligned}\langle Hf(x_0)v, v \rangle &\leq 0 \text{ punto di massimo} \\ \langle Hf(x_0)v, v \rangle &\geq 0 \text{ punto di minimo}\end{aligned}\tag{1.6.1}$$

Allora vale il seguente.

Teorema 1.8

Sia $f(x)$ una funzione con derivate seconde continue; se in x_0 , $\nabla f(x_0) = 0$ e la matrice Hessiana è tale che $Hf(x_0) > 0$ (definita positiva), allora x_0 è di minimo relativo per f .
Se fosse $Hf(x_0) < 0$, x_0 sarebbe di massimo relativo.

Possono verificarsi altri due casi:

- se $\langle Hf(x_0)v, v \rangle$ assume sia valori positivi che negativi al variare di v , si ha un **punto di sella**;
- se la matrice Hessiana è semidefinita, ma non definita, non si può concludere niente e bisogna esaminare cosa accade attorno a x_0 .

2 CALCOLO INTEGRALE IN PIÙ VARIABILI

2.1 Integrazione in dimensioni superiori

Per le definizioni di base, si deve definire cos'è un rettangolo.

Definizione 2.1

Dati due intervalli $[a, b]$ e $[c, d]$, il rettangolo che identificano è definito come $R = [a, b] \times [c, d]$, con $a \leq x < b$ e $c \leq y < d$.

Si suddividono due intervalli in intervalli più piccoli, cioè $[a, b]$ si suddivide in n sotto-intervalli $I_h = [x_{h-1}, x_h]$, con $x_0 = a, \dots, x_n = b$ e $[c, d]$ in m sotto-intervalli $J_k = [y_{k-1}, y_k]$. Allora il rettangolo sarà suddiviso in $n \times m$ sotto-rettangoli $R_{hk} = I_h \times J_k$.

Una funzione semplice $\varphi(x)$ è una funzione che assume un valore costante su ogni sotto-rettangolo e che vale 0 fuori da R . Indicando con λ_{hk} il valore costante che assume in R_{hk} :

$$\varphi(x) = \sum_{h=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_{hk} \chi_{R_{hk}}(x) \quad (2.1.1)$$

con χ_D funzione caratteristica del dominio D . L'integrale di funzioni simili è dato da:

$$\int \varphi(x) dx dy = \sum_{h=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_{hk} m(R_{hk}) = \sum_{h=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_{hk} m(I_h) m(J_k) = \sum_{h=1}^n \sum_{k=1}^m \lambda_{hk} (x_h - x_{h-1}) (y_k - y_{k-1}) \quad (2.1.2)$$

È necessario dare anche la definizione di supporto di una funzione:

Definizione 2.2

Il supporto di una funzione f è la chiusura dell'insieme in cui $f \neq 0$, cioè:

$$\text{supp}(f) = \overline{\{x : f(x) \neq 0\}} \quad (2.1.3)$$

Infine, si indica con $\mathcal{S}^+(D)$ la classe delle funzioni semplici φ che maggiorano f in D e $\mathcal{S}^-(D)$ la classe delle funzioni semplici ψ che minorano f in D ; da questo, si ha la seguente definizione di integrale di Riemann.

Definizione 2.3 (Integrazione di funzioni a supporto compatto)

Sia f una funzione a supporto compatto, con $\text{supp}(f) \subset K$; f è integrabile secondo Riemann se:

$$\sup_{\psi \in \mathcal{S}^-(K)} \int \psi dx dy = \inf_{\varphi \in \mathcal{S}^+(K)} \int \varphi dx dy \quad (2.1.4)$$

dove

$$\begin{aligned} \int_* f(x) dx &= \inf_{\varphi \in \mathcal{S}^+(K)} \int \varphi dx dy \quad \text{integrale inferiore} \\ \int^* f(x) dx &= \sup_{\psi \in \mathcal{S}^-(K)} \int \psi dx dy \quad \text{integrale superiore} \end{aligned} \quad (2.1.5)$$

La condizione di integrabilità si può esprimere come:

$$\int_* f(x) dx = \int^* f(x) dx \quad (2.1.6)$$

Osservazione 2.1. Anche per più variabili, è condizione sufficiente e necessaria perché f a supporto compatto sia integrabile che $\forall \varepsilon > 0$, esistono funzioni semplici φ, ψ tali che:

$$\int \varphi dx dy - \int \psi dx dy < \varepsilon \quad (2.1.7)$$

2.2 Misura di insiemi

L'integrabilità di una funzione su un certo insieme E è legata alla misura dell'insieme stesso.

Definizione 2.4 (Misurabilità di insiemi)

Un insieme E è *misurabile* (secondo Peano-Jordan) se la sua funzione caratteristica φ_E è integrabile. In questo caso, la misura è:

$$m(E) = \int \varphi_E d\mathbf{x}$$

Se φ_E è integrabile, allora $\forall \varepsilon > 0$, si avrebbero ψ, φ funzioni semplici con $\psi \leq \varphi_E \leq \varphi$ tali che:

$$\int \varphi d\mathbf{x} - \int \psi d\mathbf{x} < \varepsilon$$

L'idea è suddividere il piano x, y in rettangoli R_{hk} dove $\varphi = 1$ nei rettangoli R_{hk} che hanno punti in comune con E ed è nulla negli altri, mentre si prende $\psi = 1$ nei rettangoli contenuti in E e pari a 0 negli altri. Così facendo, l'integrale di φ è la somma delle misure dei rettangoli R_{hk} che hanno punti in comune con E , mentre quello di ψ è la somma delle misure degli R_{hk} contenuti in E . Il risultato della differenza è la somma delle misure dei rettangoli che hanno punti in comune con E , ma che non vi sono contenuti, quindi sarà la somma delle misure dei rettangoli che hanno punti in comune con la frontiera di E .

Si definisce **plurirettangolo** l'unione P di un numero finito di rettangoli senza punti comuni, la cui misura coincide con la somma delle misure dei rettangoli che lo compongono; si ha la seguente.

Proposizione 2.1

Un insieme E è misurabile $\iff \forall \varepsilon > 0, \exists$ un plurirettangolo P contenuto in E e un plurirettangolo Q che contiene E tali che $m(Q) - m(P) < \varepsilon$.

Usando Prop 2.1, se P, Q plurirettangoli t.c. $P \subset E \subset Q$, con $m(Q - P) = m(Q) - m(P)$, si ha che:

$$\text{Un insieme } E \text{ è misurabile} \iff \forall \varepsilon > 0 \text{ esiste } Z \text{ plurirettangolo che contiene } \partial E, \text{ con } m(Z) < \varepsilon.$$

Quindi:

$$\text{Un insieme } E \text{ è misurabile (secondo Peano-Jordan)} \iff \text{la sua frontiera } \partial E \text{ ha misura nulla.}$$

Proposizione 2.2

Se due insiemi A, B sono misurabili, allora sono misurabili anche $A \cup B$, $A \cap B$ e $A \setminus B$.

Dimostrazione. A, B misurabili $\implies \partial A, \partial B$ sono contenute in plurirettangoli Z_A, Z_B che hanno misura minore di ε , $\forall \varepsilon > 0$, quindi $m(Z_A \cup Z_B) < 2\varepsilon$. Questo vuol dire che $m(\partial A \cup \partial B) = 0$, quindi le frontiere di $A \cup B$, $A \cap B$ e $A \setminus B$ hanno misura nulla. \square

2.2.1 Insiemi generati da funzioni

Siano $g(x) : [a, b] \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{\geq 0}$ e $G := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq g(x)\}$. Se g è integrabile, l'insieme G è misurabile, con

$$m(G) = \int_a^b g(x) \, dx \quad (2.2.1)$$

Dimostrazione. Essendo g integrabile, $\forall \varepsilon > 0$, esistono φ, ψ con $\int (\varphi - \psi) \, dx < \varepsilon$. Considerando i plurirettangoli

$$\Phi := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq \varphi(x)\}, \quad \Psi := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq \psi(x)\}$$

per i quali

$$m(\Phi) = \int \varphi \, dx, \quad m(\Psi) = \int \psi \, dx$$

si ha $\Psi \subset G \subset \Phi$ con $m(\Phi) - m(\Psi) < \varepsilon \implies G$ misurabile. Inoltre, per quanto detto, sia $m(G)$ che $\int g \, dx$ sono contenuti tra $m(\Phi)$ e $m(\Psi)$, cioè:

$$\left| m(G) - \int_a^b g(x) \, dx \right| < m(\Phi) - m(\Psi) < \varepsilon, \quad \forall \varepsilon \implies m(G) = \int_a^b g(x) \, dx$$

\square

Siano, ora, g, h due funzioni integrabili in $[a, b]$ con $0 \leq g(x) \leq h(x)$. L'insieme $E := \{(x, t) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, g(x) \leq y \leq h(x)\}$ è misurabile per quanto detto sopra, essendo E dato dalla differenza degli insiemi H, G definiti come sopra e misurabili a loro volta. Inoltre, sempre applicando quanto detto sopra alla differenza di H, G :

$$m(E) = \int_a^b [h(x) - g(x)] \, dx$$

Osservazione 2.2. Questo è valido anche per g, h non-positive; è, infatti, sufficiente applicare il ragionamento alle funzioni $h + c, g + c$, con c preso in modo che siano entrambe positive e osservando che E_c corrisponde a E traslato di c verso l'alto.

2.3 Integrabilità di funzioni continue

Teorema 2.1

Sia $f(\mathbf{x})$ continua in rettangolo chiuso R e sia E un insieme misurabile con $E \subset R$. Allora f è integrabile in E .

Dimostrazione. Si mostra che $f\varphi_E$ è integrabile. Per Weierstrass, f è uniformemente

continua in R , quindi $\forall \varepsilon > 0, \exists \delta(\varepsilon) > 0$ t.c. la divisione di R in rettangoli R_{hk} di diametro minore di $\delta(\varepsilon)$, risulta:

$$M_{hk} - m_{hk} = \sup_{R_{hk}} f - \inf_{R_{hk}} f < \varepsilon$$

Inoltre, f ha massimo e minimo in R , indicati, rispettivamente, con M e m . Allo stesso tempo, E è misurabile, quindi $\forall \varepsilon > 0, \exists$ suddivisione di R in R_{hk} , assunta di diametro inferiore di $\delta(\varepsilon)$, tale che la misura dei rettangoli che hanno almeno un punto in comune con ∂E è minore di ε .

Con questa suddivisione, si classificano con $\mathcal{I}, \mathcal{E}, \mathcal{F}$ rispettivamente i rettangoli interni, esterni e a contatto con la frontiera di E . Per la misurabilità di E :

$$\sum_{R_{jk} \in \mathcal{F}} m(R_{hk}) < \varepsilon$$

Si definiscono:

- funzione maggiorante φ che è nulla nei rettangoli esterni, $\phi = \max\{M, 0\}$ in quelli di frontiera e $\phi = M_{hk}$ in quelli interni.
- funzione minorante ψ che è nulla in quelli esterni, $\psi = \min\{m, 0\}$ in quelli di frontiera e $\psi = m_{hk}$ in quelli interni.

Quindi $\psi \leq f \leq \varphi$ e

$$\begin{aligned} \int (\varphi - \psi) \, dx dy &= (\max\{M, 0\} - \min\{m, 0\}) \sum_{R_{hk} \in \mathcal{F}} m(R_{hk}) + \sum_{R_{hk} \in \mathcal{I}} (M_{hk} - m_{hk}) m(R_{hk}) \\ &< (|M| + |m|) \varepsilon + \varepsilon \sum_{R_{hk} \in \mathcal{I}} m(R_{hk}) < \varepsilon (|M| + |m| + m(R)) \end{aligned}$$

Allora f è integrabile su E . □

Più in generale, vale il seguente.

Teorema 2.2

Sia f limitata in un rettangolo R . Questa è integrabile in $E \subset R$ se l'insieme D dei suoi punti di discontinuità ha misura nulla.

Dimostrazione. Si ripete la dimostrazione precedente con D al posto di ∂E . □

2.4 Integrali doppi

Si analizza prima caso per funzioni semplici. Si considera suddivisione del rettangolo $R = I \times J$ in rettangoli $R_{hk} = I_h \times J_k$. Sia $\varphi = \sum \lambda_{hk} \chi_{R_{hk}}$ funzione semplice; fissando $x \in I_h$, si considera φ come funzione della sola y e:

$$\int \phi(x, y) \, dy = \sum_k \lambda_{hk} m(J_k)$$

L'integrale a primo membro è costante per $x \in I_h$, pertanto è a sua volta una funzione semplice; integrandolo rispetto a x :

$$\int dx \int \phi(x, y) dy = \sum_h m(I_h) \sum_k \lambda_{hk} m(J_k) = \sum_{h,k} \lambda_{hk} m(I_h) m(J_k) = \sum_{h,k} \lambda_{hk} m(R_{hk}) = \int \varphi dx dy$$

Il discorso è analogo integrando prima rispetto a x e poi rispetto a y . Si generalizza con il seguente.

Teorema 2.3 (Teorema di Fubini)

Sia $f(x, y)$ integrabile in $R = [a, b] \times [c, d]$ e sia questa integrabile $\forall x \in [a, b]$ rispetto alla variabile $y \in [c, d]$. Allora la funzione $F(x) = \int_c^d f(x, y) dy$ è integrabile in $[a, b]$ e

$$\int_R f(x, y) dx dy = \int_a^b F(x) dx = \int_a^b dx \int_c^d f(x, y) dy$$

Dimostrazione. Visto che f è integrabile in R , allora esistono ψ, φ funzioni semplici t.c.

$$\psi \leq f \leq \varphi, \text{ con } \int (\varphi - \psi) dx dy < \varepsilon$$

Integrando le disuguaglianze rispetto alla y , si ottiene:

$$\Psi(x) = \int_c^d \psi dy \leq F(x) = \int_c^d f dy \leq \int_c^d \varphi dy = \Phi(x) \quad (2.4.1)$$

Le funzioni Φ, Ψ sono ancora funzioni semplici, rispettivamente maggiorante e minorante di F , per le quali vale

$$\int_a^b (\Phi - \Psi) dx = \int (\varphi - \psi) dx dy < \varepsilon$$

Quindi $F(x)$ è integrabile in $[a, b]$. Ora, integrando in $[a, b]$ l'eq. 2.4.1, si ha:

$$\int_R \psi dx dy \leq \int_a^b F(x) dx \leq \int_R \varphi dx dy$$

Allo stesso tempo, integrando la disuguaglianza iniziale su R :

$$\int_R \psi dx dy \leq \int_R f dx dy \leq \int_R \varphi dx dy$$

Unendo le due disuguaglianze:

$$\left| \int_R f(x, y) dx dy - \int_a^b F(x) dx \right| \leq \int_R (\varphi - \psi) dx dy < \varepsilon$$

Valendo $\forall \varepsilon > 0$, si ottiene la tesi. □

Questo teorema si applica anche a integrali su *insiemi normali rispetto all'asse y* ¹

$$E := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, g(x) \leq y \leq h(x)\}$$

¹Insiemi, la cui intersezione con la retta verticale $x = \text{cost.}$ è un segmento o un punto.

con g, h continue in $[a, b]$. Per quanto visto, E è misurabile e, se f è continua su E , è anche integrabile in E stesso. In generale, la funzione $f^* = f\varphi_E$ è integrabile in ogni rettangolo $R = [a, b] \times [c, d] \supset E$.

Fissata $x \in [a, b]$, la funzione $f^*(x, y)$ vale $f(x, y)$ se $g(x) \leq y \leq h(x)$ e 0 altrimenti, quindi è continua tranne, al più, nei punti $g(x), h(x)$. Allora f^* è integrabile e si può applicare Fubini:

$$\int_R f^*(x, y) \, dx dy = \int_a^b dx \int_c^d f^*(x, y) \, dy \implies \int_E f \, dx dy = \int_a^b dx \int_{g(x)}^{h(x)} f \, dy$$

Esempio 2.1. Calcolare

$$\int_E x^2 y \, dx dy, \quad E := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : -1 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq \sqrt{1-x^2}\}$$

con E semicirconferenza di raggio 1 e centro l'origine.

Svolgimento. L'insieme è normale rispetto all'asse y e, per Fubini:

$$\begin{aligned} \int_E x^2 y \, dx dy &= \int_{-1}^{+1} dx \int_0^{\sqrt{1-x^2}} x^2 y \, dy = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} [x^2 y^2]_0^{\sqrt{1-x^2}} dx \\ &= \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} x^2 (1-x^2) \, dx = \left(\frac{x^3}{6} - \frac{x^5}{10} \right) \Big|_{-1}^{+1} = \frac{2}{15} \end{aligned}$$

■

2.5 Integrali tripli

Il teorema di Fubini si applica anche nel caso di tre o più variabili: se $f(x, y, z)$ è integrabile nel parallelepipedo $P = [a, b] \times [c, d] \times [r, s]$ e, $\forall (x, y) \in R = [a, b] \times [c, d]$, è integrabile rispetto a z , allora:

$$\int_P f(x, y, z) \, dx dy dz = \int_R dx dy \int_r^s f(x, y, z) \, dz$$

In particolare, se f è continua in E insieme normale rispetto a z , cioè della forma $E := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y) \in R, g(x, y) \leq z \leq h(x, y)\}$, si ha:

$$\int_E f(x, y, z) \, dx dy dz = \int_R dx dy \int_{g(x, y)}^{h(x, y)} f(x, y, z) \, dz \quad (2.5.1)$$

Ovviamente il ragionamento si può poi applicare quando si dovrà calcolare l'integrale doppio.

Esempio 2.2. Per $E := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x > 0, y > 0, z > 0, x + y + z < 2\}$, calcolare

$$\int_E (x + y - z) \, dx dy dz$$

Svolgimento. L'insieme è normale rispetto a z , quindi:

$$\int_E (x + y - z) \, dx dy dz = \int_T dx dy \int_0^{2-x-y} (x + y - z) \, dz$$

con $T := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x > 0, y > 0, x + y < 2\} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 0 < x < 2, 0 < y < 2 - x\}$.

L'ultimo integrale è:

$$\int_0^{2-x-y} (x+y-z) dz = \left[xz + yz - \frac{z^2}{2} \right]_0^{2-x-y} = 4(x+y) - \frac{3}{2}(x+y)^2 - 2$$

L'integrale doppio rimanente si può nuovamente spezzare con Fubini:

$$\begin{aligned} \int_T \left[4(x+y) - \frac{3}{2}(x+y)^2 - 2 \right] dx dy &= \int_0^2 dx \int_0^{2-x} \left[4(x+y) - \frac{3}{2}(x+y)^2 - 2 \right] dy \\ &= \int_0^2 \left[4xy + 2y^2 - \frac{3}{2} \left(x^2y + xy^2 + \frac{1}{3}y^3 \right) - 2y \right]_{y=0}^{y=x-2} dx \\ &= \int_0^2 \left(\frac{1}{2}x^3 - 2x^2 + 2x \right) dx = \left[\frac{1}{8}x^4 - \frac{2}{3}x^3 + x^2 \right]_0^2 = \frac{2}{3} \end{aligned}$$

■

L'eq. 2.5.1 si può usare nel calcolo di volumi degli insiemi normali. Dato

$$E := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y) \in F, g(x, y) \leq z \leq h(x, y)\}$$

e posto $f = 1$ in eq. 2.5.1, si ha:

$$m(E) = \int_F [h(x, y) - g(x, y)] dx dy \quad (2.5.2)$$

Esempio 2.3. Per $Q = (0, 1) \times (0, 1)$, calcolare il volume dell'insieme

$$E := \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y) \in Q, x + y \leq z \leq x^2 + y^2 + 1\}$$

Svolgimento. Usando direttamente eq. 2.5.2, si ha:

$$\begin{aligned} m(E) &= \int_Q (1 + x^2 + y^2 - x - y) dx dy = \int_0^1 dy \int_0^1 (1 + x^2 + y^2 - x - y) dx \\ &= \int_0^1 \left(1 + \frac{1}{3} + y^2 - \frac{1}{2} - y \right) dy = \frac{2}{3} \end{aligned}$$

■

2.6 Cambiamento di variabili

Si inizia con il caso di $f(x, y)$ funzione di due variabili, integrabile e a supporto compatto. Nell'ipotesi che valga il teorema di Fubini:

$$\int f(x, y) dx dy = \int dx \int f(x, y) dy$$

Si fissa x nell'ultimo integrale e si cambia variabile con $y = \varphi(x, v) \Rightarrow dy = \varphi_v(x, v) dv$, da cui

$$\int f(x, y) dx dy = \int dx \int f(x, \varphi(x, v)) |\varphi_v(x, v)| dv$$

Usando il teorema di Fubini due volte, si può scrivere l'ultimo integrale prima come integrale doppio e poi come integrale prima rispetto a x e poi rispetto a v :

$$\int f(x, y) \, dx dy = \int f(x, \varphi(x, v)) |\varphi(x, v)| \, dx dv = \int dv \int f(x, \varphi(x, v)) |\varphi_v(x, v)| dx$$

Nell'ultimo integrale, si fissa v e si cambia variabile con $x = x(u, v) \Rightarrow dx = x_u(u, v) du$:

$$\int f(x, y) \, dx dy = \int dv \int f(x(u, v), \varphi(x(u, v), v)) |\varphi_v(x(u, v), v) x_u(u, v)| \, du$$

Infine, si prendono:

$$\begin{cases} x = x(u, v) \\ y = \varphi(x(u, v), v) = y(u, v) \end{cases} \implies \begin{cases} y_u(u, v) = \varphi_x(x(u, v), v) x_u(u, v) \\ y_v(u, v) = \varphi_x(x(u, v), v) x_v(u, v) + \varphi_v(x(u, v), v) \end{cases}$$

da cui

$$\begin{aligned} \varphi_v(x(u, v), v) x_u(u, v) &= [y_v(u, v) - \varphi_x(x(u, v), v) x_v(u, v)] x_u(u, v) \\ &= y_v(u, v) x_u(u, v) - y_u(u, v) x_v(u, v) \end{aligned}$$

Sostituendo nell'integrale, si ottiene:

$$\int f(x, y) \, dx dy = \int f(x(u, v), y(u, v)) |x_u y_v - x_v y_u| \, du dv \quad (2.6.1)$$

Questa si adatta agli integrali su insieme E , notando che questo corrisponde a integrare $f \varphi_E$:

$$\int_E f(x, y) \, dx dy = \int f(x(u, v), y(u, v)) \varphi_E(x(u, v), y(u, v)) |x_u y_v - x_v y_u| \, du dv$$

Visto che φ_E vale 1 se $(x(u, v), y(u, v)) \in E$ e 0 altrimenti, essa è la funzione caratteristica dell'insieme F , immagine inversa di E attraverso la trasformazione $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$. Quindi:

$$\int_E f(x, y) \, dx dy = \int_F f(x(u, v), y(u, v)) |x_u y_v - x_v y_u| \, du dv \quad (2.6.2)$$

2.6.1 Ammissibilità del cambiamento di variabili

Si vuole capire quando è possibile trovare $\varphi(x, v)$ tale che $y(u, v) = \varphi(x(u, v), v)$. Questo è possibile quando $x = x(u, v)$ si può risolvere rispetto a u , quindi se esiste $u = \gamma(x, v)$. L'equazione che occorre è $\varphi(x, v) = y(\gamma(x, v), v)$, infatti $\gamma(x(u, v), v) = u \Rightarrow \varphi(x(u, v), v) = y(u, v)$. L'equazione $x = x(u, v)$ si può risolvere se $\forall v$, $x(u, v)$, considerata come funzione della sola u , è monotona, cioè se $x_u(u, v) \neq 0$, $\forall u, v$.

L'altra ipotesi necessaria è $\varphi_v(x, v) \neq 0$ che, dovendo valere $x_u(u, v) \neq 0$, equivale a richiedere $\varphi_v(x, v) x_u(u, v) \neq 0$, ossia $x_u y_v - x_v y_u \neq 0$.

Complessivamente, il cambio di variabili è lecito se sono verificate

$$\begin{cases} x_u \neq 0 \\ x_u y_v - x_v y_u \neq 0 \end{cases} \quad (2.6.3)$$

Visto che lo stesso risultato si sarebbe ottenuto iniziando col cambio di variabili $y = \psi(x, u)$, dovendo comunque valere $x_u y_v - x_v y_u \neq 0$, si può sostituire $x_u \neq 0$ con $x_v \neq 0$. Per questo, è sufficiente che x_u, x_v non si annullino contemporaneamente¹ (altrimenti anche $x_u y_v - x_v y_u = 0$).

Siano, ora, x_u, x_v continue in rettangolo chiuso $R \supset F$. Si può dividere R in numero finito di rettangoli R_1, \dots, R_N , in ognuno dei quali o x_u , o x_v è diversa da 0. Allora si riscrive la formula del cambio di variabili in $F_k = F \cap R_k$:

$$\int_{E_k} f(x, y) \, dx dy = \int_{F_k} f(x(u, v), y(u, v)) |x_u y_v - x_v y_u| \, du dv$$

con E_k immagine di F_k tramite la trasformazione $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$. Sommando su k :

$$\sum_{k=1}^N \int_{E_k} f(x, y) \, dx dy = \int_F f(x(u, v), y(u, v)) |x_u y_v - x_v y_u| \, du dv$$

Se gli E_k sono tutti disgiunti, ossia se il cambio di variabili è invertibile, la somma dell'integrale al primo membro diventa un integrale su E e si riottiene l'eq. 2.6.2. Questa, quindi, risulta valida solo nell'ipotesi che l'applicazione $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$ sia iniettiva e che $x_u y_v - x_v y_u \neq 0$ sempre. Allora vale il seguente.

Teorema 2.4

Sia $f(x, y)$ integrabile in $E \subset \mathbb{R}^2$ e sia $x = x(u, v)$, $y = y(u, v)$ un'applicazione biunivoca di classe C^1 , con inversa che va da un rettangolo $R \subset \mathbb{R}^2$ a un insieme contenente E e tale che $x_u y_v - x_v y_u \neq 0$ in R . Allora, indicando con F l'immagine inversa di E , l'equazione 2.6.2 è valida.

2.6.2 Matrice Jacobiana

Il ragionamento fatto per il caso di due variabili si generalizza a più variabili: se in $\int_E f(\mathbf{x}) \, dx_1 \dots dx_n$ si esegue la sostituzione $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{u})$, $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_n)$, la formula di cambio variabili diventa:

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, dx_1 \dots dx_n = \int_F f(\mathbf{x}(\mathbf{u})) |\det J(\mathbf{u})| \, du_1 \dots du_n \quad (2.6.4)$$

dove $\det J(\mathbf{u})$ è il determinante della *matrice Jacobiana* della trasformazione, definita come:

$$J(\mathbf{u}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x_1(\mathbf{u})}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial x_1(\mathbf{u})}{\partial u_n} \\ \frac{\partial x_2(\mathbf{u})}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial x_2(\mathbf{u})}{\partial u_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x_n(\mathbf{u})}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial x_n(\mathbf{u})}{\partial u_n} \end{pmatrix} \quad (2.6.5)$$

2.7 Integrali impropri

Si distinguono i casi in cui il dominio di integrazione non è limitato e quelli in cui la funzione non è limitata nelle vicinanze di uno o più punti.

¹Cioè negli stessi punti.

2.7.1 Integrali in domini non limitati

Si analizza prima il caso particolare di f positiva. L'idea è di tagliare il dominio di integrazione con una sfera di raggio r , integrare sull'insieme risultante e far tendere, poi, $r \rightarrow +\infty$. Si ha la seguente definizione.

Definizione 2.5

Sia $f(\mathbf{x})$ una funzione definita in $E \subset \mathbb{R}^n$, con $f(\mathbf{x}) \geq 0, \forall \mathbf{x} \in E$. Si assume che per ogni intorno dell'origine (al variare di r) $I_r = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \|\mathbf{x}\| < r\}$, f sia integrabile in $E \cap I_r$. Si dice che f è integrabile in senso improprio su E se

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \int_{E \cap I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} < +\infty$$

In tal caso, varrà:

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \lim_{r \rightarrow +\infty} \int_{E \cap I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \quad (2.7.1)$$

Avendo assunto $f(\mathbf{x}) \geq 0$, la funzione $F(r) = \int_{E \cap I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}$ è crescente, quindi il limite esiste sempre ed è uguale all'estremo superiore:

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \int_{E \cap I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \sup_{r > 0} \int_{E \cap I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}$$

Osservazione 2.3. Se si avesse E limitato, da un certo r_0 in poi, si avrà $E \subset I_r \Rightarrow E \cap I_r = E$, quindi l'integrale per $r \rightarrow +\infty$ coinciderebbe con l'usuale integrale su E .

Eliminando la condizione $f(\mathbf{x}) \geq 0$, l'esistenza del limite non sarebbe più garantita, ma si potrebbe aggiungere alla condizione di integrabilità, oltre alla richiesta di limite finito, l'esistenza stessa del limite.

Il problema risiede, però, nel fatto che se invece di tagliare il dominio di integrazione con delle sfere, si usassero dei cubi (per esempio), il limite potrebbe divergere con le sfere e convergere con i cubi, o convergere con entrambe, ma dare un risultato diverso. Questo non accade se f è positiva.

Dimostrazione. Si considerano per esempio le sfere I_r e i cubi $Q_t = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n : \max\{|x_1|, \dots, |x_n|\} < t\}$. Ogni sfera è contenuta in un cubo (infatti si ha proprio $I_r \subset Q_r$) e, viceversa, ogni cubo Q_h è contenuto in una sfera I_s , con $s = \sqrt{n}h$.

Visto che l'integrando è positivo:

$$\int_{I_r} f \, d\mathbf{x} \leq \int_{Q_t} f \, d\mathbf{x} \leq \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_{Q_t} f \, d\mathbf{x} \quad \text{e} \quad \int_{Q_h} f \, d\mathbf{x} \leq \int_{I_s} f \, d\mathbf{x} \leq \lim_{s \rightarrow +\infty} \int_{I_s} f \, d\mathbf{x}$$

Mandando $r \rightarrow +\infty$ nella prima e $h \rightarrow +\infty$ nella seconda:

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \int_{I_r} f \, d\mathbf{x} \leq \lim_{t \rightarrow +\infty} \int_{Q_t} f \, d\mathbf{x} \quad \text{e} \quad \lim_{h \rightarrow +\infty} \int_{Q_h} f \, d\mathbf{x} \leq \lim_{s \rightarrow +\infty} \int_{I_s} f \, d\mathbf{x}$$

quindi i due limiti coincidono. □

2.7.2 Integrali di funzioni non limitate

Similmente al caso precedente, per f non limitata attorno all'origine (per esempio), si taglia il dominio di integrazione E con una sfera I_r e si calcola l'integrale su $E \setminus I_r$, per poi far tendere $r \rightarrow 0^+$.

Definizione 2.6

Sia $f(\mathbf{x})$ definita su $E \subset \mathbb{R}^n$, con $f(\mathbf{x}) \geq 0$, $\forall \mathbf{x} \in E$. Sia \mathbf{x}_0 un punto di accumulazione per E e che per ogni intorno I_r di \mathbf{x}_0 , la funzione f sia integrabile in $E \setminus I_r$. Allora si dice che f è integrabile in senso improprio su E se il limite

$$\lim_{r \rightarrow 0^+} \int_{E \setminus I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \sup_{r > 0} \int_{E \setminus I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}$$

è finito. In questo caso:

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \lim_{r \rightarrow 0^+} \int_{E \setminus I_r} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \quad (2.7.2)$$

Se $f(\mathbf{x})$ fosse di segno variabile, si possono considerare le due funzioni non negative

$$\begin{aligned} f^+(\mathbf{x}) &= \max \{f(\mathbf{x}), 0\} \\ f^-(\mathbf{x}) &= \max \{-f(\mathbf{x}), 0\} \end{aligned} \implies f^+ - f^- = f$$

Allora si dirà che f è integrabile in senso improprio su E se ambedue le funzioni f^+ , f^- lo sono e

$$\int_E f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} = \int_E f^+(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} - \int_E f^-(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x} \quad (2.7.3)$$

Esempio 2.4. Dato E l'insieme esterno al cerchio di raggio 1, calcolare

$$\int_E \frac{dx dy}{(x^2 + y^2)^\alpha}$$

Svolgimento. Se $r > 1$, l'insieme $E \cap I_r$ è la corona circolare C_r di raggi 1 e r . In coordinate polari, per $\alpha \neq 1$:

$$\int_{C_r} \frac{dx dy}{(x^2 + y^2)^\alpha} = \int_1^r \frac{\rho \, d\rho}{\rho^{2\alpha}} \int_0^{2\pi} d\varphi = 2\pi \int_1^r \rho^{1-2\alpha} \, d\rho = 2\pi \left. \frac{\rho^{2-2\alpha}}{2-2\alpha} \right|_1^r = \frac{\pi}{1-\alpha} (r^{2-2\alpha} - 1)$$

Se $\alpha = 1$, ripetendo un calcolo analogo, si ottiene $2\pi \log r$. Mandando $r \rightarrow +\infty$, quest'ultimo diverge a $+\infty$, come anche quello precedente per $\alpha < 1$. Se, invece, $\alpha > 1$:

$$\lim_{r \rightarrow +\infty} \int_{C_r} \frac{dx dy}{(x^2 + y^2)^\alpha} = \frac{\pi}{\alpha - 1}$$

■

3 CURVE E SUPERFICI

3.1 Curve in \mathbb{R}^n

Definizione 3.1 (Curva e parametrizzazione)

Una curva è un'applicazione $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$. L'equazione parametrica della curva è un'equazione della forma $\mathbf{x} = \gamma(t)$.

Esempio 3.1. L'equazione $x = \cos t$, $y = \sin t$, $0 \leq t \leq 2\pi$ è l'equazione parametrica in \mathbb{R}^2 della circonferenza di raggio 1 e centro l'origine.

Si vede t come variabile temporale, per cui $\gamma(t)$ è la posizione al tempo t di un punto mobile nello spazio \mathbb{R}^n . Si fissano due istanti t_0, t ; nel tempo $t - t_0$ che intercorre fra i due istanti, la velocità media (vettoriale) del punto è data da $\frac{\gamma(t) - \gamma(t_0)}{t - t_0}$. Facendo tendere $t \rightarrow t_0$, se le componenti della curva $\gamma_1(t), \dots, \gamma_n(t)$ sono derivabili in t_0 , si ottiene la velocità istantanea del punto in t_0 :

$$\mathbf{v}(t_0) \equiv \gamma'(t_0) = \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\gamma(t) - \gamma(t_0)}{t - t_0}$$

Se $\gamma'(t_0) \neq 0$, la retta tangente alla curva nel punto $\gamma(t_0)$ è $\mathbf{x} = \gamma(t_0) + \gamma'(t_0)(t - t_0)$, infatti la relazione

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \frac{\gamma(t) - \gamma(t_0) - \mathbf{v}(t - t_0)}{t - t_0} = 0 \iff \mathbf{v} = \gamma'(t_0) \neq 0$$

Quindi, perché esista la retta tangente a γ , è necessario che la derivata esista e sia anche diversa da 0, altrimenti la curva non avrebbe una direzione ben definita in tale punto. Da qui la seguente definizione.

Definizione 3.2 (Regolarità di una curva)

Una curva $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ si dice *regolare* se ha derivata continua, che non si annulla in nessun punto di (a, b) .

La curva γ si dice *regolare a tratti* se è continua e si può dividere l'intervallo $[a, b]$ in un numero finito di intervalli, in ognuno dei quali γ è regolare.

Esempio 3.2. Sia $f(x) \in C^1([a, b])$; la curva piana di equazioni $x(t) = t$, $y(t) = f(t)$ è regolare perché il vettore velocità $(1, f'(t))$ ha prima componente sempre pari a 1.

Il suo sostegno coincide con il grafico della funzione f .

Supponendo che la curva sia di classe C^1 senza assumere che $\gamma'(t)$ sia diversa da zero, il suo sostegno può avere dei punti angolosi. Ad esempio, nel caso di

$$\begin{cases} x = t^3 \\ y = t^2 \end{cases}$$

si ha $\gamma'(t) = (3t^2, 2t)$, che si annulla per $t = 0$. Eliminando t dalle precedenti equazioni, si verifica che il sostegno della curva ha, effettivamente, una cuspidine nell'origine; infatti da $t = \sqrt[3]{x}$, si ottiene $y = x^{2/3}$, che ha una cuspidine nell'origine.

Osservazione 3.1. Un altro modo per convincersi della necessità di richiedere $\gamma' \neq 0$ è dovuto al fatto che se un punto si muove con velocità non-nulla, non può cambiare direzione

della velocità senza avere una discontinuità nella velocità stessa; se, invece, ad un certo istante avesse velocità nulla, potrebbe riprendere il moto in direzione generica senza discontinuità.

Si considera una curva piana $(x(t), y(t))$; l'equazione della retta ad essa tangente nel punto $(x(t_0), y(t_0))$ è, quindi:

$$\begin{aligned}x &= x(t_0) + x'(t_0)(t - t_0) \\y &= y(t_0) + y'(t_0)(t - t_0)\end{aligned}$$

Se $y'(t_0) \neq 0$ ¹, si ricava

$$t - t_0 = \frac{y - y(t_0)}{y'(t_0)}$$

che sostituito nella prima, permette di concludere che

$$y'(t_0)(x - x(t_0)) = x'(t_0)(y - y(t_0)) \quad (3.1.1)$$

Esempio 3.3. Calcolare la retta tangente alla curva γ di equazioni^a

$$\begin{cases} x = t - \sin t \\ y = 1 - \cos t \end{cases}$$

in $P = (\pi/2 - 1, 1)$.

Svolgimento. Intanto si deve verificare che il punto P si trovi sulla curva, cioè che corrisponda a qualche t_0 . Sia $y(t_0) = 1 - \cos t_0 \stackrel{!}{=} 1 \iff t_0 = \pi/2 + k\pi$. Da questa condizione, si ottiene

$$x(t_0) = t_0 - \sin t_0 = \frac{\pi}{2} + k\pi - 1 \stackrel{!}{=} \frac{\pi}{2} - 1 \iff k = 0$$

Allora il punto si trova sulla curva in corrispondenza di $t_0 = \pi/2$. Per finire, si ha $x'(t) = 1 - \cos t$ e $y'(t) = \sin t$, quindi $x'(t_0) = 1$ e $y'(t_0) = 1$. La retta tangente, allora, è:

$$y = x - \frac{\pi}{2} + 2$$

■

^aQuesta curva è detta cicloide ed è quella descritta da un punto su una circonferenza di raggio 1 che rotola su una retta.

Definizione 3.3 (Curve equivalenti)

Due curve regolari $\varphi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $\gamma : [c, d] \rightarrow \mathbb{R}^n$ si dicono equivalenti se esiste una funzione $p : [a, b] \rightarrow [c, d]$, di classe C^1 , suriettiva e sempre diversa da 0, tale che $\varphi(t) = \gamma(p(t))$.

Due curve equivalenti hanno, evidentemente, stesso sostegno. Inoltre, se $p' > 0$, allora $p(t)$ è crescente e, quindi, $p(c) = a$, $p(d) = b$; in questo caso, le curve hanno stesso verso, mentre se fosse $p' < 0$, avrebbero verso opposto con estremi scambiati, cioè $p(c) = b$, $p(d) = a$.

¹Altrimenti, si ricava $t - t_0$ dalla prima perché deve essere $x'(t_0) \neq 0$ altrimenti la curva non sarebbe regolare.

Definizione 3.4 (Versore tangente)

Il versore tangente ad una curva regolare φ è definito come

$$\tau_\varphi(t) = \frac{\varphi'(t)}{\|\varphi'(t)\|}$$

Questo ha stesso verso e direzione della velocità della curva e ha lunghezza unitaria.

Teorema 3.1

Se due curve φ, γ sono equivalenti e hanno lo stesso verso, allora i loro versori tangenti coincidono.

Dimostrazione. Si abbia, allora, $\varphi'(t) = \gamma'(p(t))p'(t)$ e $\|\varphi'(t)\| = \|\gamma'(p(t))\|p'(t)$, visto che, per assunzione, le curve hanno stesso verso (ossia $p' > 0$).

La tesi è dimostrata per calcolo diretto:

$$\tau_\varphi(t) = \frac{\varphi'(t)}{\|\varphi'(t)\|} = \frac{\gamma'(p(t))p'(t)}{\|\gamma'(p(t))\|p'(t)} = \frac{\gamma'(p(t))}{\|\gamma'(p(t))\|} \equiv \tau_\gamma(p(t))$$

□

3.2 Lunghezza di una curva**Definizione 3.5 (Lunghezza di una curva)**

Sia $\gamma(t)$, $a \leq t \leq b$ una curva di classe C^1 . La sua lunghezza è data da:

$$L(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt$$

Si nota che

$$\Delta x \stackrel{\text{def}}{=} \int_a^b \gamma'(t) dt \equiv \gamma(b) - \gamma(a)$$

non coincide sempre con la lunghezza della curva perché questo rappresenta lo spostamento: se la curva avesse estremi coincidenti, questo integrale restituirebbe 0. Quindi si ha il seguente.

Teorema 3.2

La lunghezza di una curva è sempre maggiore o uguale della norma dello spostamento, cioè:

$$L(\gamma) = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt \geq \left\| \int_a^b \gamma'(t) dt \right\| \equiv \|\gamma(b) - \gamma(a)\|$$

Dimostrazione. Se lo spostamento è nullo, questo è automaticamente verificato. Nel caso di $\Delta x \neq 0$, allora, si ha, per generico vettore \mathbf{u} :

$$\int_a^b \gamma'(t) dt \cdot \mathbf{u} = \int_a^b \gamma'(t) \cdot \mathbf{u} dt \leq \int_a^b \|\gamma'(t)\| \|\mathbf{u}\| dt = \|\mathbf{u}\| L$$

con \cdot prodotto scalare. Nel caso particolare di $\mathbf{u} = \int_a^b \gamma'(t) dt$, si ha:

$$\left\| \int_a^b \gamma'(t) dt \right\|^2 \leq \left\| \int_a^b \gamma'(t) dt \right\| L$$

da cui segue la tesi. □

Sia γ il segmento che unisce due punti $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2$; questo ha equazione parametrica $\mathbf{x} = \mathbf{x}_1 + t(\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)$, $0 \leq t \leq 1$. Allora $\gamma'(t) = \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1$, pertanto:

$$L(\gamma) = \int_0^1 \|\gamma'(t)\| dt = \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\|$$

Allora la lunghezza di un segmento che unisce due punti è uguale alla distanza tra i punti stessi.

Esempio 3.4. Si considera nuovamente la curva di equazioni

$$\begin{cases} x = t^3 \\ y = t^2 \end{cases}$$

Calcolare la lunghezza di tale curva per $0 \leq t \leq a$, con $a > 0$.

Svolgimento. Per calcolo diretto, si ha:

$$L = \int_0^a \sqrt{9t^4 + 4t^2} dt = \int_0^a t \sqrt{9t^2 + 4} dt$$

Per $u = t^2$, si ottiene:

$$L = \frac{1}{2} \int_0^{a^2} \sqrt{9u + 4} du = \frac{1}{27} (9u + 4)^{3/2} \Big|_0^{a^2} = \frac{1}{27} \left[(9a^2 + 4)^{3/2} - 8 \right]$$

■

Sia data la curva in coordinate polari

$$\begin{cases} \rho = \rho(t) \\ \varphi = \varphi(t) \end{cases}, \quad a \leq t \leq b$$

corrispondente alle equazioni parametriche

$$\begin{cases} x = \rho(t) \cos \varphi(t) \\ y = \rho(t) \sin \varphi(t) \end{cases}, \quad a \leq t \leq b$$

Allora

$$\begin{cases} x'(t) = \rho'(t) \cos \varphi(t) - \rho(t) \varphi'(t) \sin \varphi(t) \\ y'(t) = \rho'(t) \sin \varphi(t) + \rho(t) \varphi'(t) \cos \varphi(t) \end{cases} \Rightarrow x'^2(t) + y'^2(t) = \rho'^2(t) + \rho^2(t) \varphi'^2(t)$$

La lunghezza della curva sarà, allora, data da:

$$L = \int_a^b \sqrt{\rho'^2(t) + \rho^2(t)\varphi'^2(t)} dt \quad (3.2.1)$$

Talvolta, si prende come t lo stesso angolo φ ; in questo caso si ha $\rho = \rho(\varphi)$, $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1$, quindi l'equazione diventa

$$L = \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} \sqrt{\rho'^2(\varphi) + \rho^2(\varphi)} d\varphi \quad (3.2.2)$$

essendo $\varphi' = 1$.

Esempio 3.5. Si considera un *cardioide*, di equazione $\rho = (1 + \cos \varphi)$, $0 \leq \varphi \leq 2\pi$. Calcolarne la lunghezza.

Svolgimento. Si ha

$$L = \int_0^{2\pi} \sqrt{\sin^2 \varphi + (1 + \cos \varphi)^2} d\varphi = \int_0^{2\pi} \sqrt{2 + 2 \cos \varphi} d\varphi = 2 \int_0^{2\pi} \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right| d\varphi$$

Prendendo $2u = \varphi$:

$$L = 4 \int_0^{\pi} |\cos u| du = 8 \int_0^{\pi/2} \cos u du = 8$$

■

Teorema 3.3 (Lunghezza di curve equivalenti)

Due curve equivalenti σ, γ hanno stessa lunghezza.

Dimostrazione. Sia $\sigma(t) = \gamma(p(t))$, con $p'(t) \neq 0$. Si assume, senza perdita di generalità, $p' > 0$, quindi $\|\sigma'(t)\| = \|\gamma'(p(t))\| p'(t)$, pertanto:

$$L(\sigma) = \int_c^d \|\sigma'(t)\| dt = \int_c^d \|\gamma'(p(t))\| p'(t) dt$$

Cambiando variabili con $u = p(t)$ e usando che $p' > 0$, per cui si ha $p(c) = a$, $p(d) = b$, si ha:

$$L(\sigma) = \int_c^d \|\gamma'(p(t))\| p'(t) dt = \int_a^b \|\gamma'(u)\| du \equiv L(\gamma)$$

Se, invece, fosse $p' < 0$, si avrebbe un segno $-$ dovuto a p' , ma gli estremi di integrazione verrebbero invertiti, quindi il risultato è consistente:

$$L(\sigma) = - \int_c^d \|\gamma'(p(t))\| p'(t) dt = \int_b^a \|\gamma'(u)\| du \equiv L(\gamma)$$

□

Inscrivendo in una circonferenza un poligono regolare, il perimetro dell'ultimo è sempre minore della lunghezza della circonferenza e la approssima tanto meglio, quanto più aumenta il numero di lati. Di fatto, la lunghezza della circonferenza si definisce come il limite dei perimetri dei poligono regolari inscritti.

Usando questo ragionamento, si ottiene la lunghezza di una curva approssimandola con delle spezzate con vertici sul suo sostegno.

Sia $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ una curva di classe C^1 . Si divide $[a, b]$ in N sottintervalli con estremi

$a = t_0 < t_1 < \dots < t_N = b$; unendo i corrispondenti $\gamma(t_0), \gamma(t_1), \dots, \gamma(t_N)$, si ottiene una spezzata Σ , i cui vertici sono sul sostegno della curva γ .

La lunghezza di Σ sarà, evidentemente, minore della lunghezza della curva perché, per quanto visto:

$$\begin{aligned} \|\gamma(t_i) - \gamma(t_{i-1})\| &= \left\| \int_{t_{i-1}}^{t_i} \gamma'(t) dt \right\| \leq \int_{t_{i-1}}^{t_i} \|\gamma'(t)\| dt \\ \Rightarrow L(\Sigma) = \sum_{i=1}^N \|\gamma(t_i) - \gamma(t_{i-1})\| &\leq \sum_{i=1}^N \int_{t_{i-1}}^{t_i} \|\gamma'(t)\| dt = \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt \end{aligned}$$

Tuttavia, prendendo t_i molto vicini fra loro, si può far avvicinare $L(\Sigma)$ a $L(\gamma)$ a piacimento. Per dimostrare questo, occorre il seguente lemma.

Lemma 3.1

Sia $\mathbf{v}(t) : [\alpha, \beta] \rightarrow \mathbb{R}^n$ e sia $\tau \in [\alpha, \beta]$; allora si ha:

$$\left\| \int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{v}(t) dt \right\| \geq \int_{\alpha}^{\beta} \|\mathbf{v}(t)\| dt - 2 \int_{\alpha}^{\beta} \|\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(\tau)\| dt$$

Dimostrazione. Si ha:

$$\mathbf{v}(\tau)(\beta - \alpha) = \int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{v}(\tau) dt = \int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{v}(t) dt - \int_{\alpha}^{\beta} [\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(\tau)] dt$$

Usando la disuguaglianza triangolare:

$$\|\mathbf{v}(\tau)\|(\beta - \alpha) \leq \left\| \int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{v}(t) dt \right\| + \left\| \int_{\alpha}^{\beta} [\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(\tau)] dt \right\| \leq \left\| \int_{\alpha}^{\beta} \mathbf{v}(t) dt \right\| + \int_{\alpha}^{\beta} \|\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(\tau)\| dt$$

Sempre per la disuguaglianza triangolare, risulta $\|\mathbf{v}(\tau)\| \geq \|\mathbf{v}(t)\| - \|\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(\tau)\|$, quindi, integrando:

$$\|\mathbf{v}(\tau)\|(\beta - \alpha) \geq \int_{\alpha}^{\beta} \|\mathbf{v}(t)\| dt - \int_{\alpha}^{\beta} \|\mathbf{v}(t) - \mathbf{v}(\tau)\| dt$$

Confrontando le due disuguaglianze ottenute, si ottiene direttamente la tesi. \square

Teorema 3.4

La lunghezza di una curva regolare γ è l'estremo superiore delle lunghezze delle spezzate con i vertici sul suo sostegno.

Dimostrazione. La funzione γ' è continua in $[a, b]$, quindi è uniformemente continua nello stesso. Fissato, dunque, $\varepsilon > 0$, $\exists \delta > 0$ tale che se $t, \tau \in [a, b]$, allora $|t - \tau| < \delta \Rightarrow \|\gamma'(t) - \gamma'(\tau)\| < \varepsilon$.

Si divide $[a, b]$ in intervalli più piccoli, con estremi $a = t_0 < t_1 < \dots < t_N = b$ in modo tale che ogni $[t_{i-1}, t_i]$ abbia lunghezza $|t_i - t_{i-1}| < \delta$.

Per il lemma 3.1, si ha:

$$\|\gamma(t_i) - \gamma(t_{i-1})\| = \left\| \int_{t_{i-1}}^{t_i} \gamma'(t) dt \right\| \geq \int_{t_{i-1}}^{t_i} \|\gamma'(t)\| dt - 2 \int_{t_{i-1}}^{t_i} \|\gamma'(t) - \gamma'(\tau)\| dt$$

con τ punto generico in $[a, b]$. Per costruzione, risulta $\|\gamma'(t) - \gamma'(\tau)\| < \varepsilon$, pertanto

$$\|\gamma(t_i) - \gamma(t_{i-1})\| \geq \int_{t_{i-1}}^{t_i} \|\gamma'(t)\| dt - 2\varepsilon(t_i - t_{i-1})$$

Sommando su $i = 1, \dots, N$ al primo membro, si ottiene la lunghezza della spezzata. Al secondo membro, la somma degli integrali restituisce la lunghezza della curva, mentre quella dell'altro termine restituisce $2\varepsilon(b - a)$. In conclusione, si è trovato

$$L(\Sigma) \geq \int_a^b \|\gamma'(t)\| dt - 2\varepsilon(b - a)$$

Conseguentemente, anche l'estremo superiore delle lunghezze delle spezzate è maggiore della stessa quantità; per l'arbitrarietà di ε , tale sup è maggiore o uguale alla lunghezza della curva.

Avendo già mostrato la disuguaglianza opposta, segue l'uguaglianza e, al contempo, anche la tesi. \square

Si definisce la lunghezza di una porzione di curva γ nell'estremo $[a, t]$ come

$$s(t) = \int_a^t \|\gamma'(r)\| dr$$

Al variare di $t \in [a, b]$, $s(t)$ varia in $[0, L]$; se γ è regolare, allora $s(t)$ è strettamente crescente, visto che $s'(t) = \|\gamma'(t)\| > 0$.

Sia, allora, $t(s)$ la sua inversa, che mappa $[0, L] \rightarrow [a, b]$ e

$$t'(s) = \frac{1}{s'(t)} \Big|_{t=t(s)} = \frac{1}{\|\gamma'(t(s))\|}$$

Ponendo $\psi(s) = \gamma(t(s))$, la curva ψ è equivalente a γ e ha stesso verso; inoltre

$$\psi'(s) = \gamma'(t(s))t'(s) = \frac{\gamma'(t(s))}{\|\gamma'(t(s))\|}$$

cioè $\|\psi'(s)\| = 1$ e la velocità coincide col versore tangente.

Nel caso in cui γ è il grafico di una funzione $y(x)$, si ha $s'(x) = \sqrt{1 + y'^2(x)}$; la quantità s è detta **ascissa curvilinea**. In casi del genere, la lunghezza della curva coincide con l'integrale $\int_\psi ds$.

In generale, la notazione $\int_\gamma ds$ si può usare per indicare la lunghezza di una generica curva γ , essendo $ds = \|\gamma'(t)\| dt$. Tale notazione è dovuta al fatto che la lunghezza del segmento infinitesimo tra i punti $\gamma(t)$ e $\gamma(t + dt)$ è

$$ds = \|\gamma(t + dt) - \gamma(t)\| = \|d\gamma(t)\| = \|\gamma'(t)\| dt$$

In questo modo, si può dare la definizione di **integrale curvilineo** di una funzione f .

Definizione 3.6 (Integrale curvilineo)

Sia f una funzione; il suo integrale curvilineo è definito come:

$$\int_{\gamma} f \, ds = \int_a^b f(\gamma(t)) \|\gamma'(t)\| \, dt$$

Se, poi, γ e σ sono due curve equivalenti, l'integrale curvilineo di f su σ coincide con quello su γ :

$$\int_{\gamma} f \, ds = \int_{\sigma} f \, ds \quad (3.2.3)$$

Dimostrazione. Sia $\sigma(t) = \gamma(p(t))$. Per conto diretto, assumendo senza perdita di generalità che $p' > 0$:

$$\begin{aligned} \int_{\sigma} f \, ds &= \int_c^d f(\sigma(t)) \|\sigma'(t)\| \, dt = \int_c^d f(\gamma(p(t))) \|\gamma'(p(t))\| p'(t) \, dt \\ &= \int_a^b f(\gamma(r)) \|\gamma'(r)\| \, dr \equiv \int_{\gamma} f \, ds \end{aligned}$$

dove si è preso $r = p(t) \Rightarrow dr = p'(t) \, dt$. Se fosse $p' < 0$, si otterrebbe lo stesso risultato. \square

Esempio 3.6. Calcolare, per γ arco di parabola di equazioni $x = t$, $y = t^2$, $0 \leq t \leq 1$, l'integrale

$$\int_{\gamma} \sqrt{1 + 3x^2 + y} \, ds$$

Svolgimento. Si ha $ds = \sqrt{1 + 4t^2} dt$, quindi:

$$\int_{\gamma} \sqrt{1 + 3x^2 + y} \, ds = \int_0^1 (1 + 4t^2) \, dt = \frac{7}{3}$$

■

3.3 Superfici

Similmente alle curve, le superfici sono applicazioni di un insieme $K \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^n$. Per semplicità, si considererà sempre $n = 3$ e si assumerà di avere a che fare con **superfici semplici**, cioè che non si intersecano, e **connesse**, che significa, a grandi linee, che sono composte da un unico corpo.

Definizione 3.7 (Superfici regolari)

Una superficie regolare è un'applicazione $\varphi(u, v) : K \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^3$, con K ottenuto dalla chiusura di un aperto limitato e connesso, con le seguenti proprietà:

- (a). $\varphi \in C^1(K)$;
- (b). la restrizione di φ all'interno di K è un'applicazione iniettiva;
- (c). $\varphi_u(\mathbf{w}_0) \wedge \varphi_v(\mathbf{w}_0) \neq 0$, $\forall \mathbf{w}_0 \in K^i$.

L'immagine $\varphi(K)$ è un insieme di \mathbb{R}^3 detto **sostegno** della superficie.

Osservazione 3.2 (Condizioni su K). Volendo evitare che la superficie sia costituita da due parti staccate, o congiunte da una curva, l'ipotesi $K := \overline{K^i}$ (cioè ottenuto come chiusura della sua parte interna), con l'aggiunta che sia connesso, risulta necessaria. Così facendo, la condizione $K = \overline{K^i}$ esclude che il sostegno della superficie sia composto da due parti congiunte da una curva, mentre la connessione esclude che tale sostegno sia composto da due pezzi staccati.

Nelle curve regolari, si aveva la possibilità di definire una *retta tangente*; analogamente, nelle superfici regolari si può definire un *piano tangente*. Per farlo, si considera un punto $\mathbf{w}_0 = (u_0, v_0) \in K^i$ e una curva regolare $\mathbf{w}(t)$, $a \leq t \leq b$ passante per \mathbf{w}_0 stesso (cioè $\exists t_0 \in (a, b) : \mathbf{w}(t_0) = \mathbf{w}_0$).

L'applicazione composta $\gamma(t) = \varphi(\mathbf{w}(t)) = \varphi(u(t), v(t))$ è una curva in \mathbb{R}^3 passante per il punto $\mathbf{x}_0 = \gamma(t_0) = \varphi(\mathbf{w}_0)$ ¹. La retta $\gamma(t_0) + \gamma'(t_0)(t - t_0)$ è tangente al sostegno di γ in \mathbf{x}_0 , con

$$\gamma'(t_0) = \varphi_u(\mathbf{w}_0)u'(t_0) + \varphi_v(\mathbf{w}_0)v'(t_0)$$

Da questo, si vede che $\gamma'(t_0)$, che è il vettore che dà la direzione della retta tangente, è combinazione lineare dei vettori $\mathbf{r} = \varphi_u(\mathbf{w}_0)$ e $\mathbf{s} = \varphi_v(\mathbf{w}_0)$, che dipendono dalla superficie φ e dal punto \mathbf{w}_0 , ma non dalla curva $\mathbf{w}(t)$. Facendo variare la curva, il vettore $\gamma'(t_0)$ descrive un piano fintanto che \mathbf{r}, \mathbf{s} sono linearmente indipendenti, da cui la condizione

$$\mathbf{r} \wedge \mathbf{s} = \varphi_u(\mathbf{w}_0) \wedge \varphi_v(\mathbf{w}_0) \neq 0 \quad (3.3.1)$$

Quando questa è soddisfatta $\forall \mathbf{w}_0 \in K^i$, la superficie si dice regolare.

Esempio 3.7. La superficie di equazioni

$$\begin{cases} x = \sin u \cos v \\ y = \sin u \sin v \\ z = \cos u \end{cases}, \quad 0 \leq u \leq \pi, \quad 0 \leq v \leq 2\pi$$

è la sfera di raggio 1 e centro 0. Si ha

$$\begin{aligned} \varphi_u &= (\cos u \cos v, \cos u \sin v, -\sin u); \quad \varphi_v = (-\sin u \sin v, \sin u \cos v, 0) \\ \Rightarrow \varphi_u \wedge \varphi_v &= \sin u (\sin u \cos v, \sin u \sin v, \cos u) \end{aligned}$$

Quindi, nei punti interni a $K = [0, \pi] \times [0, 2\pi]$, si ha $\|\varphi_u \wedge \varphi_v\| = |\sin u| = \sin u > 0$. Allora la superficie è regolare.

Esempio 3.8. Sia $f(x, y) \in C^1$ e sia il suo grafico una superficie regolare in \mathbb{R}^3 ; in questo caso, l'applicazione φ di componenti

$$\begin{cases} x = x \\ y = y \\ z = f(x, y) \end{cases}$$

con $\varphi_x = (1, 0, f_x)$, $\varphi_y = (0, 1, f_y) \Rightarrow \varphi_x \wedge \varphi_y = (-f_x, -f_y, 1)$ è una superficie regolare perché

¹Questo perché sia u che v , cioè i gradi di libertà della superficie, dipendono direttamente da t e variano insieme, quindi complessivamente si ha una curva, avendo praticamente eliminato un grado di libertà.

$$\|\varphi_x \wedge \varphi_y\| = \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2} > 0.$$

Esempio 3.9. Trovare il versore normale alla superficie di equazioni parametriche

$$\begin{cases} x = u + v \\ y = u - v \\ z = u^2 + v^2 \end{cases}$$

Svolgimento. Si ha $\varphi_u = (1, 1, 2u)$, $\varphi_v = (1, -1, 2v)$, per cui $\varphi_u \wedge \varphi_v = (2v + 2u, 2u - 2v, -2)$. Il versore è dato da:

$$\hat{n} = \frac{2(u + v, u - v, -1)}{\sqrt{4[(u + v)^2 + (u - v)^2 + 1]}} = \frac{(u + v, u - v, -1)}{\sqrt{1 + 2u^2 + 2v^2}}$$

■

Se la superficie è il grafico di una funzione $f(x, y)$, usando come parametri le coordinate x, y stesse, per quanto visto, si ha

$$\begin{aligned} \varphi_x \wedge \varphi_y &= (-f_x, -f_y, 1) \implies \|\varphi_x \wedge \varphi_y\| = \sqrt{1 + f_x^2 + f_y^2} = \sqrt{1 + \|\nabla f\|^2} \\ \Rightarrow \hat{n} &= \frac{(-f_x, -f_y, 1)}{\sqrt{1 + \|\nabla f\|^2}} \end{aligned}$$

Allora si può osservare che la terza componente di \hat{n} è sempre positiva, quindi \hat{n} punterà sempre verso l'alto.

3.4 Area di una superficie

Definizione 3.8 (Area di una superficie)

Se $\varphi : L \rightarrow \mathbb{R}^3$ è una superficie regolare, la sua area è data da:

$$A(\varphi) = \int_K \|\varphi_u \wedge \varphi_v\| \, dudv$$

Esempio 3.10. Calcolare l'area della sfera di raggio 1, ossia della superficie parametrizzata da

$$\begin{cases} x = \sin u \cos v \\ y = \sin u \sin v \\ z = \cos u \end{cases}, \quad 0 \leq u \leq \pi, \quad 0 \leq v \leq 2\pi$$

Svolgimento. Come visto in esempio 3.7, $\|\varphi_u \wedge \varphi_v\| = \sin u$, quindi l'area è:

$$\int_0^\pi \sin u \, du \int_0^{2\pi} dv = 2\pi \int_0^\pi \sin u \, du = 4\pi$$

■

Si considera superficie data dal grafico di una $f(x, y)$, per cui $\|\varphi_x \wedge \varphi_y\| = \sqrt{1 + \|\nabla f\|^2}$. Se

(x, y) variano in un insieme $E \subset \mathbb{R}^2$, l'area della superficie è data da:

$$\int_E \sqrt{1 + \|\nabla f\|^2} \, dxdy \quad (3.4.1)$$

Esempio 3.11. Calcolare l'area del paraboloide $z = x^2 + y^2$ con dominio il cerchio unitario $C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x^2 + y^2 \leq 1\}$.

Svolgimento. Usando le coordinate polari:

$$\begin{aligned} \int_C \sqrt{1 + 4x^2 + 4y^2} \, dxdy &= \int_0^1 \rho \sqrt{1 + 4\rho^2} \, d\rho \int_0^{2\pi} d\vartheta = 2\pi \int_0^1 \rho \sqrt{1 + 4\rho^2} \, d\rho \\ &= \pi \int_0^1 \sqrt{1 + 4s} \, ds = \frac{\pi}{6} (5^{3/2} - 1) \end{aligned}$$

■

3.5 Il teorema delle funzioni implicite

Un ulteriore modo di definire una curva è dando il luogo degli zeri di una funzione di due variabili. Sia $F(x, y)$ una funzione; si definisce il sostegno di una curva γ come l'insieme

$$Z = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : F(x, y) = 0\}$$

Si mostra che, anche definendo così una curva regolare, questa risulti localmente come grafico di una funzione.

Teorema 3.5 (Teorema delle funzioni implicite)

Sia $F(x, y) : A \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$, con A aperto, e tale che $F \in C^1(A)$. Sia $(x_0, y_0) \in A$ e tale che

$$F(x_0, y_0) = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial y}(x_0, y_0) \neq 0$$

Allora esistono un intorno U di x_0 e V di y_0 tali che $\forall x \in U, \exists! y = f(x) \in V : F(x, y) = 0$. La funzione $f : U \rightarrow V$ così definita è di classe $C^1(U)$ e

$$f'(x) = -\frac{F_x(x, f(x))}{F_y(x, f(x))}$$

Dimostrazione. Sia, per esempio, $F_y(x_0, y_0) > 0$. F_y è continua per assunzione, quindi esiste un rettangolo chiuso $W \times V$, centrato in (x_0, y_0) , in cui F_y continua ad essere positiva. Sia $V = (y_0 - h, y_0 + h)$; allora $\forall x \in W, F(x, y)$, considerata funzione solo di y , ha derivata positiva, quindi è strettamente crescente.

In particolare, sarà crescente la funzione $F(x_0, y)$ e, visto che $F(x_0, y_0) = 0$, si ha

$$F(x_0, y_0 + h) > 0 \quad F(x_0, y_0 - h) < 0$$

Ora si considerano, come funzioni della sola x , $F(x, y_0 + h)$ e $F(x, y_0 - h)$; queste sono continue in W , quindi, per la permanenza del segno, deve esistere un intorno U di x_0 tale per cui $\forall x \in U, F(x, y_0 + h) > 0$ e $F(x, y_0 - h) < 0$. Essendo che $\forall x \in U, F$ è strettamente crescente in y e che $F(x, y_0 - h) < 0, F(x, y_0 + h) > 0$, si conclude che $\exists! y \in (y_0 - h, y_0 + h)$

tale che $F(x, y) = 0$. Questo dimostra la prima parte.

Rimane da mostrare l'espressione per f' . Siano $x, x_1 \in U$ due punti e sia

$$G(t) = F(x_1 + t(x - x_1), f(x_1) + t(f(x) - f(x_1)))$$

per cui $G(0) = F(x_1, f(x_1)) = 0$ e $G(1) = F(x, f(x)) = 0$. Usando il teorema di Rolle, si trova un $\tau \in (0, 1) : G'(\tau) = 0$; posti $\xi = x_1 + \tau(x - x_1)$ e $\eta = f(x_1) + \tau(f(x) - f(x_1))$, si trova

$$\begin{aligned} F_x(\xi, \eta)(x - x_1) + F_y(\xi, \eta)(f(x) - f(x_1)) &= 0 \\ \Rightarrow \frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} &= -\frac{F_x(\xi, \eta)}{F_y(\xi, \eta)} \end{aligned}$$

Indicando $R = U \times V$ e ricordando che $F_y > 0$ in $W \times V$, per cui si ha $F_y > 0$ anche in \bar{R} (chiusura di $U \times V$), si conclude che il suo minimo in R è positivo e quindi, dalla relazione precedente:

$$|f(x) - f(x_1)| \leq \frac{\max_R |F_x|}{\min_R F_y} |x - x_1|$$

Questo implica che f è continua, perciò $x \rightarrow x_1, f(x) \rightarrow f(x_1)$, quindi $\xi \rightarrow x_1$ e $\eta \rightarrow f(x_1)$. Per la continuità delle derivate di F , si ha:

$$f'(x_1) = \lim_{x \rightarrow x_1} \frac{f(x) - f(x_1)}{x - x_1} = -\frac{F_x(x_1, f(x_1))}{F_y(x_1, f(x_1))}$$

□

Osservazione 3.3. Indicando con Z l'insieme degli zeri di F , il teorema afferma che se $(x_0, y_0) \in Z$ e tale che $F_y \neq 0$, allora si trova un rettangolo $R = U \times V$ con centro (x_0, y_0) tale che $Z \cap R$ è il grafico di una funzione $y = f(x)$, di classe C^1 , la cui derivata è data da $-\frac{F_x(x, f(x))}{F_y(x, f(x))}$.

Osservazione 3.4. Il vettore velocità, che è tangente alla curva, sarà dato da:

$$\mathbf{v} = (1, f'(x)) = \left(1, -\frac{F_x(x, f(x))}{F_y(x, f(x))}\right) \quad (3.5.1)$$

e si vede che è anche ortogonale al gradiente di F :

$$\nabla F \cdot \mathbf{v} = F_x - F_y \frac{F_x}{F_y} = 0$$

Ovviamente se in un intorno di (x_0, y_0) fosse $\partial_x F \neq 0$, l'insieme Z sarebbe il grafico di una funzione del tipo $x = g(y)$, che soddisferebbe:

$$g'(y) = -\frac{F_y(g(y), y)}{F_x(g(y), y)} \quad (3.5.2)$$

Questo permette di concludere che se $F(x_0, y_0) = 0$ e $\nabla F(x_0, y_0) \neq 0$, allora esiste un rettangolo R centrato in (x_0, y_0) tale per cui $Z \cap R$ è il grafico di una funzione di classe C^1 . Gli eventuali punti singolari di Z si cercano fra gli $(x, y) : F(x, y) = 0$ e $\nabla F(x, y) = 0$.

Un analogo di questo teorema si ottiene per le superfici a partire da funzioni di tre variabili.

Se $F(x, y, z)$ è una funzione di classe C^1 e, in (x_0, y_0, z_0) , risulta

$$F(x_0, y_0, z_0) = 0 \text{ e } F_z(x_0, y_0, z_0) = 0$$

allora, in un intorno di (x_0, y_0, z_0) , l'insieme degli zeri di F è il grafico di una funzione $z = f(x, y)$ tale che:

$$\partial_x f(x, y) = -\frac{F_x(x, y, f(x, y))}{F_z(x, y, f(x, y))} \quad \partial_y f(x, y) = -\frac{F_y(x, y, f(x, y))}{F_z(x, y, f(x, y))} \quad (3.5.3)$$

In questo caso, $\nabla F(x, y, f(x, y))$ è ortogonale alla superficie.

Il teorema delle funzioni implicite è esprimibile equivalentemente affermando che, prendendo per esempio \mathbb{R}^3 , se le variabili (x, y, z) sono legate dall'equazione $F(x, y, z) = 0$, allora una di esse si scrive, localmente, tramite le altre due, sotto le opportune ipotesi.

Assumendo, ora, che x, y, z siano legate da due relazioni $F(x, y, z) = 0$ e $G(x, y, z) = 0$, ci si aspetta di poter esprimere due variabili in termini della terza, per esempio $y = \varphi(x)$ e $z = \psi(x)$. Si vuole capire sotto quali condizioni questo è possibile. Sia \mathbf{x}_0 tale che $F(\mathbf{x}_0) = G(\mathbf{x}_0) = 0$ e $F_z(\mathbf{x}_0) \neq 0$; allora si trova un intorno W di \mathbf{x}_0 in cui l'insieme degli zeri di F, Z_F , è il grafico di una funzione $z = f(x, y)$ e sono verificate le relazioni in eq. 3.5.3.

Un punto di $Z_F \cap W$ appartiene a Z_G se e solo se $\Phi(x, y) := G(x, y, f(x, y)) = 0$, con $\Phi(x, y)$ definita in un intorno di (x_0, y_0) e $\Phi(x_0, y_0) = 0$. L'idea, ora, è di applicazione il teorema delle funzioni implicite a Φ , per cui se

$$\Phi_y = G_y + G_z f_y = G_y - G_z \frac{F_y}{F_z} \neq 0 \text{ in } (x_0, y_0)$$

la y si può scrivere localmente come funzione di x : $y = \varphi(x)$. In questo caso, si potrà anche scrivere $z = f(x, y) = f(x, \varphi(x)) = \psi(x)$.

Ricapitolando, y e z si possono scrivere localmente in funzione di x se:

$$F_z(\mathbf{x}_0)G_y(\mathbf{x}_0) - F_y(\mathbf{x}_0)G_z(\mathbf{x}_0) \neq 0 \quad (3.5.4)$$

Questa condizione impone che non valga contemporaneamente $F_z(\mathbf{x}_0) = G_z(\mathbf{x}_0) = 0$ e, pertanto, permette di evitare di specificare la richiesta $F_z(\mathbf{x}_0) \neq 0$. Se fosse, infatti, $F_z(\mathbf{x}_0) = 0$, deve essere $G_z(\mathbf{x}_0) \neq 0$ e si può procedere equivalentemente usando G .

Questa condizione è la componente x del vettore $\nabla F(\mathbf{x}_0) \wedge \nabla G(\mathbf{x}_0)$ e, quando questa è non-nulla, si possono esprimere y, z in funzione di x . Se risulta

$$\nabla F(\mathbf{x}_0) \wedge \nabla G(\mathbf{x}_0) \neq 0 \quad (3.5.5)$$

allora due qualunque delle variabili si possono esprimere in termini della terza.

Questa relazione impone che i due vettori, oltre ad essere non-nulli, non hanno la stessa direzione. Pertanto, le equazioni $F(x, y, z) = 0$ e $G(x, y, z) = 0$ individuano, in un intorno di \mathbf{x}_0 , due superfici regolari passanti per tale punto. Inoltre, essendo $\nabla F, \nabla G$ ortogonali a tali superfici, significa che le due superfici non sono tangenti; viceversa, due superfici regolari non tangenti identificano una curva regolare come loro intersezione.

3.6 Massimi e minimi vincolati

Si è visto che se \mathbf{x}_0 è un punto di massimo o di minimo relativo interno per f e se quest'ultima è derivabile in \mathbf{x}_0 , allora questo deve essere un punto stazionario, cioè tale che $\nabla f(\mathbf{x}_0) = 0$. I punti di massimo o di minimo di f in un insieme A possono cadere:

- nei punti interni in cui f non è derivabile;
- nei punti stazionari;
- sulla frontiera di A , ∂A .

Rimane da vedere l'ultimo caso, per cui il termine **vincolo** farà riferimento proprio a ∂A e si dirà che un punto di massimo o di minimo è vincolato se è interno a ∂A .

Esempio 3.12. Si vogliono calcolare il punto di massimo e minimo di

$$f(x, y) = x^2 + 2y^2 - 4xy + 2x$$

nel rettangolo

$$R = \{(x, y) : 0 \leq x \leq 2, 0 \leq y \leq 3\}$$

Svolgimento. Si cercano i punti stazionari: si ha

$$f_x = 2x - 4y + 2 = 0 \quad f_y = 4y - 4x = 0$$

Dalla seconda, deve risultare $x = y$; inserendola nella prima, si ottiene $-2x + 2 = 0$. L'unico punto stazionario, allora, è $(1, 1)$, che è interno ad R e tale che $f(1, 1) = 1$. Essendo f sempre derivabile, rimane solo da studiarne la frontiera.

- Per $x = 0$, $0 \leq y \leq 3$, si ha $f(0, y) = 2y^2$, la cui derivata è $4y$ e si annulla solo in $y = 0$, che è l'estremo dell'intervallo.
- Per $x = 2$, $0 \leq y \leq 3$, si ha $f(2, y) = 2y^2 - 8y + 8$, con derivata $4y - 8$; questa si annulla in $y = 2$, che è un punto interno all'intervallo, e si ha $f(2, 2) = 0$.
- Per $y = 0$, $0 \leq x \leq 2$, si ha $f(x, 0) = x^2 + 2x$, la cui derivata $2x + 2$ si annulla in $x = -1$, che è esterno all'intervallo di definizione di f .
- Per $y = 3$, $0 \leq x \leq 2$, si ha $f(x, 3) = x^2 - 10x + 18$, con derivata $2x - 10$ che si annulla per $x = 5$, che è esterno.

Per finire, rimangono i valori della funzione sui vertici:

$$f(0, 0) = 0 \quad f(0, 3) = 18 \quad f(2, 3) = 2 \quad f(2, 0) = 8$$

Si conclude che il massimo è 18, raggiunto nel punto $(0, 3)$ al vertice del rettangolo, mentre il minimo è raggiunto nei punti $(2, 2)$ e $(0, 0)$. ■

Osservazione 3.5. Lo svolgimento dell'esempio precedente è semplificato dal fatto che l'insieme da cui f prendeva valori era un rettangolo, mentre in generale la situazione è più complicata.

Ora si individua ∂A come una generica curva *regolare a tratti*, ossia composta da un numero finito di curve regolari; in questo caso, ci si può restringere a trattare il caso di una curva regolare, analizzando successivamente il comportamento della funzione su eventuali punti singolari. Sia $\mathbf{x} : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ una curva regolare e sia G il suo sostegno. Si considera la restrizione di $f(x, y)$ a $\mathbf{x}(t) = (x(t), y(t))$, $a \leq t \leq b$ e se ne vogliono calcolare i massimi e i minimi; questo equivale a calcolare massimi e minimi di $F(t) = f(x(t), y(t))$, i quali saranno tra i punti in cui $F' = 0$, cioè:

$$\nabla f(\mathbf{x}(t)) \cdot \mathbf{x}'(t) = 0$$

Si conclude il seguente.

Teorema 3.6

La restrizione di $f(\mathbf{x})$ al sostegno G di una curva regolare $\mathbf{x}(t)$ ha un massimo o un minimo relativo in un certo $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0 \in G$ se $\nabla f(\mathbf{x}_0) \cdot \mathbf{x}'(t_0) = 0$.

Esempio 3.13. Si considera la restrizione di $f(x, y) = x + y$ alla circonferenza di centro l'origine e raggio 1, che è il sostegno di

$$\begin{cases} x = \cos t \\ y = \sin t \end{cases}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi$$

e se ne calcolano massimi e minimi.

Svolgimento. Si ha $F(t) = f(\cos t, \sin t) = \cos t + \sin t$, quindi $F'(t) = -\sin t + \cos t$, che si annulla per $t = \pi/4$ e $t = 5\pi/4$. Per verifica, si ha $\nabla f = (1, 1)$ e $\mathbf{x}'(t) = (-\sin t, \cos t)$, per cui $\nabla f \cdot \mathbf{x}' = -\sin t + \cos t$, che coincide con F' e si annulla negli stessi punti. ■

Il risultato si estende al caso n -dimensionale in cui f è una funzione di n variabili e viene ristretta al sostegno di una curva in \mathbb{R}^n . Per esempio, dato G il sostegno di una superficie φ di equazioni

$$x = x(u, v) \quad y = y(u, v) \quad z = z(u, v)$$

si cercano i massimi e minimi della funzione

$$F(u, v) = f(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$$

La condizione necessaria perché questa abbia un massimo o minimo relativo interno è che il suo gradiente si deve annullare, cioè devono essere verificate le condizioni

$$\frac{\partial F}{\partial u} = \nabla f \cdot \varphi_u = 0 \quad \frac{\partial F}{\partial v} = \nabla f \cdot \varphi_v = 0 \quad (3.6.1)$$

Visto che i vettori φ_u e φ_v determinano il piano tangente alla superficie, si conclude che ∇f deve essere ortogonale alla superficie stessa.

Teorema 3.7

Sia G un vincolo e sia $f \in C^1(A) : A \supset G$ aperto. Se f ha un massimo o minimo relativo vincolato in un punto \mathbf{x}_0 interno a G , allora \mathbf{x}_0 è un punto stazionario vincolato, cioè $\nabla f(\mathbf{x}_0)$ è ortogonale a G .

Nella pratica, il teorema precedente non aiuta. Il metodo usato è sempre quello di procedere

studiando la funzione composta $F(t) = f(\mathbf{x}(t))$. Il teorema appena enunciato può essere riscritto in modo da essere usato quando il vincolo non è dato in termini di equazioni parametriche, ma in forma cartesiana.

Per capire meglio, si considera la funzione $f(x, y)$ e si calcolano i suoi punti di massimo o minimo sulla curva di equazione cartesiana $g(x, y) = 0$.

Osservazione 3.6. Si ricorda che ∇g è ortogonale alla curva definita da $g(x, y) = 0$; infatti, se la curva è parametrizzata da $\gamma = (x(t), y(t))$, allora:

$$\frac{d}{dt}g(x(t), y(t)) = \frac{\partial g}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial t} = \nabla g \cdot \gamma' = 0$$

Quindi, essendo ∇g ortogonale alla curva ed essendo ∇f ortogonale alla stessa curva nei punti in cui ha un massimo o un minimo vincolato, significa che i due devono essere proporzionali nei punti in cui f ha massimo o minimo relativo:

$$\nabla f(x, y) + \lambda \nabla g(x, y) = 0$$

Essendo (x, y) sulla curva, $g(x, y)$ è contemporaneamente soggetta a $g(x, y) = 0$, quindi i punti di massimo o minimo relativo vincolato di f sono tali da risolvere:

$$\begin{cases} f_x(x, y) + \lambda g_x(x, y) = 0 \\ f_y(x, y) + \lambda g_y(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases} \quad (3.6.2)$$

Questo è un sistema di tre equazioni nelle tre incognite x, y, λ e se ne deriva il seguente.

Teorema 3.8 (Teorema dei moltiplicatori di Lagrange)

Sia G il vincolo dato da $g(x, y) = 0$, con $g(x, y) \in C^1$, e sia $f(x, y) \in C^1(A)$, con $A \supset G$ aperto. Allora i punti di massimo e minimo relativo vincolati di f interni a G sono soluzioni di

$$\begin{cases} f_x(x, y) + \lambda g_x(x, y) = 0 \\ f_y(x, y) + \lambda g_y(x, y) = 0 \\ g(x, y) = 0 \end{cases}$$

Esempio 3.14. Una scatola a forma di parallelepipedo rettangolo senza coperchio ha una superficie di area 12. Trovare le lunghezze degli spigoli in modo che il volume sia massimo.

Svolgimento. Siano x, y i alti della base e z l'altezza. Si cerca di massimizzare la funzione $f(x, y, z) = xyz$ sulla superficie di equazione $xy + 2xz + 2yz = 12$ con le condizioni $x, y, z > 0$. Il corrispondente sistema di quattro equazioni in quattro incognite è:

$$\begin{cases} yz + \lambda(y + 2z) = 0 \\ xz + \lambda(x + 2z) = 0 \\ xy + 2\lambda(x + y) = 0 \\ xy + 2xz + 2yz = 12 \end{cases}$$

Sottraendo le prime due, si ha $(x - y)(z + \lambda) = 0$, cioè o $x = y$, o $\lambda = -z$. L'ultima

condizione non è possibile perché, sostituendola nella prima, si trova $-2z^2 = 0 \Rightarrow z = 0$, che non è possibile avendo assunto $z > 0$.

Allora è $x = y$, quindi le equazioni rimanenti sono:

$$\begin{cases} xz + \lambda x + 2\lambda z = 0 \\ x^2 + 4\lambda x = 0 \\ x^2 + 4xz = 12 \end{cases}$$

Dalla seconda, si ha $x = -4\lambda$ (si scarta $x = 0$ perché deve essere $x > 0$), quindi si rimane con

$$\begin{cases} 4\lambda(z + \lambda) = 2\lambda z \\ 4\lambda(z - \lambda) = -3 \end{cases}$$

Sommandole, si ha $8\lambda z = 2\lambda z - 3 \Rightarrow \lambda z = -1/2$. Inserendo questo nella prima, si ha $4\lambda^2 = 1$, quindi $\lambda = \pm 1/2$, ma $\lambda = 1/2$ non è possibile perché darebbe $x = -2$.

In definitiva, si ha $\lambda = -1/2$, per cui $x = y = 2$ e $z = 1$. ■

4 FORME DIFFERENZIALI

4.1 Lavoro di una forza

Per un corpo in moto da un punto \mathbf{x}_1 a \mathbf{x}_2 sotto l'azione di una forza \mathbf{F} costante, questa compie un lavoro dato da $\Lambda = \mathbf{F} \cdot (\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1)$.

Nel caso in cui \mathbf{F} non è più costante, ma dipende da \mathbf{x} , si prende $\gamma = \mathbf{x}(t)$, con $a \leq t \leq b$, che definisce il percorso seguito dal corpo e si spezza in l'intervallo $[a, b]$ in $a = t_1 < t_2 < \dots < t_N < t_{N+1} = b$. A questo punto, si uniscono i punti corrispondenti sulla curva $\mathbf{x}_1 = \gamma(t_1), \dots, \mathbf{x}_{N+1} = \gamma(t_{N+1})$, formando una serie di spezzate che approssima sempre meglio, al crescere di N , la curva γ .

Se \mathbf{F} è costante in ogni segmento $[\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i+1})$, il lavoro compiuto è, complessivamente, dato da:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \mathbf{F}(\mathbf{x}_i) \cdot (\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i) \quad (4.1.1)$$

Nel caso in cui $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ non fosse costante in questi intervalli, cosa che è ragionevole pensare, l'eq. 4.1.1 costituisce una buona approssimazione e, nel caso in cui \mathbf{F} sia continua¹, tende al valore giusto per $N \rightarrow \infty$.

Per studiare questo limite, si riscrive l'eq. 4.1.1 usando la rappresentazione parametrica della curva:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(\mathbf{x}_i) \cdot (\mathbf{x}_{i+1} - \mathbf{x}_i) &= \mathbf{F}(\gamma(t_i)) \cdot (\gamma(t_{i+1}) - \gamma(t_i)) = \mathbf{F}(\gamma(t_i)) \cdot \int_{t_i}^{t_{i+1}} \gamma'(t) dt \\ &= \int_{t_i}^{t_{i+1}} \mathbf{F}(\gamma(t_i)) \cdot \gamma'(t) dt \\ &= \int_{t_i}^{t_{i+1}} \mathbf{F}(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt + \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))] \cdot \gamma'(t) dt \end{aligned}$$

Sommando su i :

$$\begin{aligned} \Lambda &= \sum_{i=1}^N \int_{t_i}^{t_{i+1}} \mathbf{F}(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt + \sum_{i=1}^N \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))] \cdot \gamma'(t) dt \\ &= \int_a^b \mathbf{F}(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt + \sum_{i=1}^N \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))] \cdot \gamma'(t) dt \end{aligned} \quad (4.1.2)$$

Si assumono sia $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ che $\gamma(t)$ continue, quindi anche $\mathbf{F}(\gamma(t))$ è continua. Avendola definita nell'intervallo chiuso $[a, b]$, essa è uniformemente continua. Questo implica che

$$\forall \varepsilon > 0, \exists \delta > 0 : |t - s| < \delta \Rightarrow \|\mathbf{F}(\gamma(t)) - \mathbf{F}(\gamma(s))\| < \varepsilon$$

Allora è chiaro che, prendendo N sufficientemente grande, ogni intervallo t_i, t_{i+1} ha ampiezza minore di δ ; così facendo, risulta $\|\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))\| < \varepsilon$, quindi

$$\left| \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))] \cdot \gamma'(t) dt \right| \leq \int_{t_i}^{t_{i+1}} \|\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))\| \|\gamma'(t)\| dt < \varepsilon \int_{t_i}^{t_{i+1}} \|\gamma'(t)\| dt$$

¹Cioè ciascuna componente di \mathbf{F} , $F_i(\mathbf{x})$, deve essere continua.

Reintroducendo la somma su i , si ottiene

$$\left| \sum_{i=1}^N \int_{t_i}^{t_{i+1}} [\mathbf{F}(\gamma(t_i)) - \mathbf{F}(\gamma(t))] \cdot \gamma'(t) dt \right| < \varepsilon \sum_{i=1}^N \int_{t_i}^{t_{i+1}} \|\gamma'(t)\| dt \equiv \varepsilon L(\gamma)$$

con $L(\gamma)$ lunghezza della curva. Questo (di)mostra che quando i lati della spezzata tendono a $+\infty$, quindi la lunghezza dei lati tende a 0, Λ converge al seguente integrale:

$$\mathcal{L} = \int_a^b \mathbf{F}(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt = \int_{\gamma} \mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot d\mathbf{x} \quad (4.1.3)$$

4.2 Introduzione alle forme differenziali

Definizione 4.1 (Forma differenziale)

Dato $A \subset \mathbb{R}^n$ un aperto e date $a_1(\mathbf{x}), \dots, a_n(\mathbf{x})$ delle funzioni continue in A , si definisce *forma differenziale* l'espressione

$$\omega = \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{x}) dx_i$$

dove le funzioni $a_i(\mathbf{x})$ sono dette componenti della forma.

Definizione 4.2 (Integrale di una forma)

Data $\omega = \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{x}) dx_i$ come sopra, il suo integrale su una curva regolare $\gamma : [a, b] \rightarrow A$ è definito come

$$\int_{\gamma} \omega = \int_a^b \sum_{i=1}^n a_i(\gamma(t)) \gamma'_i(t) dt$$

Osservazione 4.1. In realtà, l'integrale di una forma si può definire anche su una curva γ regolare a tratti usando la definizione per ogni intervallo in cui questa è regolare e sommando tutti i contributi.

Esempio 4.1. Il differenziale di una funzione

$$df(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i$$

è una forma differenziale. Data γ curva regolare, l'integrale di questa forma è:

$$\int_{\gamma} df = \int_a^b \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\gamma(t))}{\partial x_i} \gamma'_i(t) dt$$

Definendo $G(t) = f(\gamma(t))$, si ha

$$G'(t) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial f(\gamma(t))}{\partial x_i} \gamma'_i(t)$$

per cui

$$\int_{\gamma} df = \int_a^b G'(t) dt = G(b) - G(a) = f(\gamma(b)) - f(\gamma(a))$$

Questo è valido anche per γ regolare a tratti, infatti, sommando i vari integrali, i termini intermedi si elidono.

Se le funzioni $a_1(\mathbf{x}), \dots, a_n(\mathbf{x})$ sono le componenti di un campo vettoriale $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ e indicando con $d\mathbf{x} = (dx_1, \dots, dx_n)$, la forma ω si può riscrivere come

$$\omega = \mathbf{V}(\mathbf{x}) \cdot d\mathbf{x}$$

per cui, data $\varphi : [a, b] \rightarrow A$ una curva regolare:

$$\int_{\varphi} \omega = \int_a^b \mathbf{V}(\varphi(t)) \cdot \varphi'(t) dt$$

Usando che il versore tangente a φ è

$$\tau = \frac{\varphi'(t)}{\|\varphi'(t)\|}$$

si trova che

$$\int_{\varphi} \omega = \int_a^b \mathbf{V}(\varphi(t)) \cdot \tau(t) \|\varphi'(t)\| dt = \int_{\varphi} \mathbf{V} \cdot \tau ds \quad (4.2.1)$$

Il teorema di seguito è l'analogo di quanto visto per l'equivalenza di due integrali curvilinei della stessa funzione su due curve equivalenti.

Teorema 4.1

Siano φ, γ due curve equivalenti; allora, se φ e γ hanno stesso verso

$$\int_{\varphi} \omega = \int_{\gamma} \omega$$

altrimenti

$$\int_{\varphi} \omega = - \int_{\gamma} \omega$$

Dimostrazione. Date, quindi, $\varphi : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$, $\gamma : [c, d] \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $p : [a, b] \rightarrow [c, d]$ tale che $\varphi(t) = \gamma(p(t))$, si ha:

$$\int_{\varphi} \omega = \int_a^b \mathbf{V}(\varphi(t)) \cdot \varphi'(t) dt = \int_a^b \mathbf{V}(\gamma(p(t))) \cdot \gamma'(p(t)) p'(t) dt$$

dove si è assunto $p' > 0^a$, per cui $p(a) = c$ e $p(b) = d$. Prendendo $u = p(t)$:

$$\int_a^b \mathbf{V}(\gamma(p(t))) \cdot \gamma'(p(t)) p'(t) dt = \int_c^d \mathbf{V}(\gamma(u)) \cdot \gamma'(u) du = \int_{\gamma} \omega$$

Se, invece, fosse stato $p' < 0$, gli estremi di integrazione sarebbero risultati invertiti (cioè $p(a) = d$ e $p(b) = c$), quindi si sarebbe trovato

$$\int_{\varphi} \omega = - \int_{\gamma} \omega$$

proprio come atteso. □

^aAltrimenti ci sarebbe dovuto essere $|p'(t)|$.

4.3 Forme esatte

Si è visto che

$$\int_{\gamma} df = f(\gamma(b)) - f(\gamma(a))$$

Pertanto, se la curva è chiusa, cioè $\gamma(b) = \gamma(a)$, allora l'integrale è nullo. Inoltre, questo integrale è lo stesso per tutte le curve i cui estremi coincidono ordinatamente, cioè se il primo estremo di una curva è il primo dell'altra e il secondo della prima è il secondo dell'altra.

Da questo si ricava la definizione di forma esatta.

Definizione 4.3 (Forma differenziale esatta)

Una forma differenziale $\omega = \sum_i a_i(\mathbf{x}) dx_i$, definita su $A \subset \mathbb{R}^n$ aperto, è detta *esatta* se è il differenziale di qualche funzione.

In altre parole, se esiste $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, $f \in C^1(A)$ tale che $\omega = df$, o meglio se

$$a_k(\mathbf{x}) = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_k}, \quad k = 1, \dots, n$$

allora ω è esatta.

Se ω è esatta, il campo vettoriale $\mathbf{V}(\mathbf{x}) = (a_1(\mathbf{x}), \dots, a_n(\mathbf{x}))$ è detto **conservativo**; in questo caso, la funzione $f(\mathbf{x})$ si dice **primitiva** della forma ω , o anche **funzione potenziale** del campo \mathbf{V} .

Come già accennato, se ω è esatta, il suo integrale $\int_{\gamma} \omega$ è lo stesso per ogni altra curva con gli stessi estremi. Dati $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in \mathbb{R}^n$, sia $\Gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ la classe di tutte le curve regolari a tratti, con sostegno in A , che hanno \mathbf{x}_1 come primo estremo e \mathbf{x}_2 come secondo; se ω è esatta in A , $\forall \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in A$, $\forall \gamma_1, \gamma_2 \in \Gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$, si ha

$$\int_{\gamma_1} \omega = \int_{\gamma_2} \omega$$

Da questo, si ha il seguente.

Teorema 4.2

Sia $\omega = \sum_{i=1}^n a_i dx_i$ una forma differenziale continua in A^a aperto e connesso. Se comunque presi $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in A$ e due curve γ_1, γ_2 con questi estremi, si ha

$$\int_{\gamma_1} \omega = \int_{\gamma_2} \omega$$

allora ω è esatta.

Dimostrazione. Si fissa $\mathbf{x}_0 \in A$ e si definisce

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\gamma} \omega$$

con $\gamma \in \Gamma(\mathbf{x}_0, \mathbf{x})$. Si vuole dimostrare che

$$a_k(\mathbf{x}) = \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_k}, \quad \forall k = 1, \dots, n$$

Sia \mathbf{e}_k il versore dell'asse x_k e sia $\mathbf{x} \in A$; visto che A è aperto, si trova un intorno tutto contenuto in A : $I(\mathbf{x}, r) \subset A$.

Per $|h| < r$, il segmento che congiunge \mathbf{x} e $\mathbf{x} + h\mathbf{e}_k$ è tutto contenuto in A . Per definizione

$$f(\mathbf{x} + h\mathbf{e}_k) = \int_{\sigma} \omega$$

con σ generica curva regolare a tratti che congiunge \mathbf{x}_0 con $\mathbf{x} + h\mathbf{e}_k$. Scegliendo

$$\sigma(t) = \begin{cases} \gamma(t) & , a \leq t \leq b \\ \mathbf{x} + (t - b)h\mathbf{e}_k & , b \leq t \leq b + 1 \end{cases}$$

nell'intervallo $b < t < b + 1$, vale

$$\sigma'_i = h\delta_{ik} = \begin{cases} h & , i = k \\ 0 & , i \neq k \end{cases}$$

Conseguentemente, si trova che

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x} + h\mathbf{e}_k) &= \int_{\sigma} \omega = \int_{\gamma} \omega + \int_b^{b+1} a_k(\mathbf{x} + (t - b)h\mathbf{e}_k) h \, dt \\ \Rightarrow \frac{f(\mathbf{x} + h\mathbf{e}_k) - f(\mathbf{x})}{h} &= \int_b^{b+1} a_k(\mathbf{x} + (t - b)h\mathbf{e}_k) \, dt \end{aligned}$$

Per il lemma della media integrale, si trova $\xi \in [b, b + 1]$ tale che

$$\frac{f(\mathbf{x} + h\mathbf{e}_k) - f(\mathbf{x})}{h} = a_k(\mathbf{x} + (\xi - b)h\mathbf{e}_k)$$

Mandando $h \rightarrow 0$, $\mathbf{x} + (\xi - b)h\mathbf{e}_k \rightarrow \mathbf{x}$ e, per continuità delle a_k , si ha

$$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_k} = a_k(\mathbf{x})$$

□

^aCioè tutte le $a_i(\mathbf{x})$ sono continue in A .

Questo teorema si può enunciare in maniera diversa come segue.

Teorema 4.3

Sia ω una forma differenziale continua in A aperto connesso. La forma ω è esatta se e soltanto se per ogni curva chiusa γ , regolare a tratti e con sostegno in A , vale

$$\int_{\gamma} \omega = 0$$

Dimostrazione. Si è già visto che se ω è esatta, il suo integrale su una curva chiusa è nullo, quindi si dimostra il viceversa.

Si assume, quindi, che $\forall \gamma$ chiusa, regolare a tratti e a sostegno in A risulti

$$\int_{\gamma} \omega = 0$$

Siano $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2 \in A$ e $\gamma_1 : [a, b] \rightarrow A$, $\gamma_2 : [c, d] \rightarrow A$ due curve in $\Gamma(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ tali che $\gamma_1(a) = \gamma_2(c) = \mathbf{x}_1$ e $\gamma_1(b) = \gamma_2(d) = \mathbf{x}_2$. Sia, poi, $\gamma_3 : [b, b+1] \rightarrow A$ una curva equivalente a γ_2 , ma con verso opposto, definita come

$$\gamma_3(t) = \gamma_2(d + (t - b)(c - d))$$

Allora, la curva $\gamma : [a, b+1] \rightarrow A$ data da

$$\gamma = \begin{cases} \gamma_1(t) & , a \leq t \leq b \\ \gamma_3(t) & , b \leq t \leq b+1 \end{cases}$$

è chiusa e regolare a tratti, quindi deve essere $\int_{\gamma} \omega = 0$. D'altra parte

$$0 = \int_{\gamma} \omega = \int_{\gamma_1} \omega + \int_{\gamma_3} \omega = \int_{\gamma_1} \omega - \int_{\gamma_2} \omega$$

visto che γ_3 e γ_2 hanno verso opposto. Ne segue che gli integrali di ω su γ_1 e γ_2 sono uguali e, dunque, ω soddisfa le ipotesi del teorema precedente (th. 4.2), risultando, pertanto, esatta. \square

Osservazione 4.2. Questo risulta valido anche per curve semplici, o anche poligonali.

Questi teoremi non permettono agevolmente di capire se una forma è esatta o meno perché richiedono il calcolo degli integrali su tutte le possibili curve della forma stessa. Allora si introduce il seguente.

Teorema 4.4

Sia $\omega = \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{x})dx_i$ una forma di classe $C^1(A)$. Se ω è esatta, allora

$$\frac{\partial a_i(\mathbf{x})}{\partial x_k} = \frac{\partial a_k(\mathbf{x})}{\partial x_i}, \quad \forall \mathbf{x} \in A, \quad \forall i, k = 1, \dots, n$$

Dimostrazione. Per assunzione, $\omega = df$, per cui $a_i = \partial_{x_i} f$; applicando il teorema di Schwarz:

$$\frac{\partial a_i}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_k} = \frac{\partial a_k}{\partial x_i}$$

\square

Definizione 4.4 (Forma differenziale chiusa)

Una forma differenziale $\omega = \sum_{i=1}^n a_i(\mathbf{x})dx_i$ su A è detta *chiusa* se

$$\frac{\partial a_i(\mathbf{x})}{\partial x_k} = \frac{\partial a_k(\mathbf{x})}{\partial x_i}, \quad \forall \mathbf{x} \in A, \quad \forall i, k = 1, \dots, n \quad (4.3.1)$$

Il teorema 4.4 afferma che ogni forma esatta è anche chiusa. Il viceversa non è vero; ad esempio

$$\omega = -\frac{ydx}{x^2 + y^2} + \frac{xdy}{x^2 + y^2}$$

è chiusa, ma non esatta. Infatti, per γ di equazioni $x = \cos t$ e $y = \sin t$:

$$\int_{\gamma} \omega = \int_0^{2\pi} (\sin^2 t + \cos^2 t) dt = 2\pi$$

Il motivo per cui non vale il viceversa è che ω considerata non è definita in tutto il piano, ma solo in $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ e γ circonda l'origine.

Ora si cerca una condizione sufficiente; per farlo, si parte dalla seguente definizione.

Definizione 4.5 (Insieme stellato)

Un insieme A si dice stellato rispetto ad un suo punto \mathbf{x}_0 se $\forall \mathbf{x} \in A$, il segmento di estremi \mathbf{x}_0, \mathbf{x} è interamente contenuto in A .

Teorema 4.5

Se $A \subset \mathbb{R}^n$ è un aperto stellato, ogni forma chiusa definita in A è anche esatta.

Dimostrazione. Senza perdita di generalità, si assume che A sia stellato rispetto all'origine. Dato $\mathbf{x} \in A$, significa che il segmento di equazione $\gamma(t) = t\mathbf{x}$, $0 \leq t \leq 1$ è interamente contenuto in A perché unisce $\mathbf{x} \in A$ con l'origine.

Sia, poi

$$f(\mathbf{x}) = \int_{\gamma} \omega = \int_0^1 \sum_{i=1}^n a_i(t\mathbf{x}) x_i dt$$

L'idea è di mostrare che $f(\mathbf{x})$ è una primitiva di ω , che, quindi, risulta esatta.

Per il teorema di derivazione sotto il segno di integrale:

$$\frac{\partial f}{\partial x_k} = \int_0^1 \sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_k} (a_i(t\mathbf{x}) x_i) dt$$

dove

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (a_i(t\mathbf{x}) x_i) = \begin{cases} \frac{\partial a_i(t\mathbf{x})}{\partial x_k} t x_i & , i \neq k \\ \frac{\partial a_k(t\mathbf{x})}{\partial x_k} t x_k + a_k(t\mathbf{x}) & , i = k \end{cases}$$

Sommando su i , allora, si ottiene

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial}{\partial x_k} (a_i(t\mathbf{x}) x_i) = \sum_{i=1}^n \frac{\partial a_i(t\mathbf{x})}{\partial x_k} t x_i + a_k(t\mathbf{x})$$

Usando, ora, la definizione di forma chiusa, si ottiene

$$\frac{\partial f}{\partial x_k} = \int_0^1 \left(\sum_{i=1}^n \frac{\partial a_i(t\mathbf{x})}{\partial x_k} t x_i + a_k(t\mathbf{x}) \right) dt$$

Si prende $g(t) = t a_k(t\mathbf{x})$, per cui

$$g'(t) = a_k(t\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^n t \frac{\partial a_k(t\mathbf{x})}{\partial x_i} x_i$$

In conclusione, si trova che

$$\frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_k} = \int_0^1 g'(t) dt = g(1) - g(0) = a_k(\mathbf{x})$$

per cui $df = \omega$. □

4.3.1 La formula di Gauss-Green

Sia $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ una curva semplice¹ e chiusa, il cui sostegno è la frontiera di un certo insieme $E \subset \mathbb{R}^2$. Si dice che γ è **orientata positivamente** se, percorrendola nel senso di t crescente, il dominio E rimane alla sinistra.

Date due curve γ, φ che contornano lo stesso insieme E , ma hanno versi opposti, per sottolineare questo fatto si scriverà $\partial^+ E$ al posto di γ e $\partial^- E$ al posto di φ .

Teorema 4.6 (Formula di Gauss-Green)

Se $\omega = M(x, y)dx + N(x, y)dy$ è una forma differenziale di classe C^1 , allora vale la formula di Gauss-Green:

$$\int_{\partial^+ E} \omega = \int_E \left(\frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y} \right) dx dy \quad (4.3.2)$$

Dimostrazione. L'idea è di dimostrare separatamente le due seguenti relazioni, che poi portano alla formula di Gauss-Green:

$$\int_{\partial^+ E} M(x, y)dx = - \int_E \frac{\partial M}{\partial y} dx dy \quad \int_{\partial^+ E} N(x, y)dy = \int_E \frac{\partial N}{\partial x} dx dy$$

Per semplicità di calcolo, si assume che E sia un dominio normale rispetto all'asse delle y , cioè che sia della forma:

$$E = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, \alpha(x) \leq y \leq \beta(x)\}$$

Così facendo, l'insieme E è composto da due funzioni i cui lati sinistro e destro sono uniti da due segmenti verticali, mentre la forma dei lati superiore e inferiore è determinata da $\alpha(x)$ e $\beta(x)$.

In questo modo, si ha che $dx = 0$ sui segmenti verticali di ∂E , cioè:

$$\int_{\partial^+ E} M(x, y)dx = \int_a^b M(x, \alpha(x))dx - \int_a^b M(x, \beta(x))dx$$

D'altra parte, si ha

$$M(x, \alpha(x)) - M(x, \beta(x)) = \int_{\beta(x)}^{\alpha(x)} \frac{\partial M(x, y)}{\partial y} dy = - \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial M(x, y)}{\partial y} dy$$

Quindi

$$\int_{\partial^+ E} M(x, y)dx = - \int_a^b dx \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial M}{\partial y} dy = - \int_E \frac{\partial M}{\partial y} dx dy$$

che dimostra la prima relazione.

Per la seconda, si ha:

$$\begin{aligned} \int_{\partial^+ E} N(x, y)dy &= \int_a^b N(x, \alpha(x))\alpha'(x)dx + \int_{\alpha(b)}^{\beta(b)} N(b, y)dy - \int_a^b N(x, \beta(x))\beta'(x)dx \\ &\quad - \int_{\alpha(a)}^{\beta(a)} N(a, y)dy \end{aligned}$$

¹Una curva $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^n$ è detta semplice se non si interseca mai, quindi se è iniettiva in (a, b) .

Si prende $F(x, y) = \int_{\alpha(x)}^y N(x, t) dt$, per cui $\partial_y F(x, y) = N(x, y)$, quindi

$$N(x, \alpha(x))\alpha'(x) = \frac{d}{dx}F(x, \alpha(x)) - \frac{\partial F}{\partial x}(x, \alpha(x))$$

Da questo, segue che

$$\int_a^b N(x, \alpha(x))\alpha'(x) dx = F(b, \alpha(b)) - F(a, \alpha(a)) - \int_a^b \frac{\partial F(x, \alpha(x))}{\partial x} dx$$

Analogamente, si trova che $N(x, \beta(x))\beta'(x) = d_x F(x, \beta(x)) - \partial_x F(x, \beta(x))$, per cui

$$\int_a^b N(x, \beta(x))\beta'(x) dx = F(b, \beta(b)) - F(a, \beta(a)) - \int_a^b \frac{\partial F(x, \beta(x))}{\partial x} dx$$

Allo stesso tempo, valgono

$$\begin{aligned} \int_{\alpha(b)}^{\beta(b)} N(b, y) dy &= \int_{\alpha(b)}^{\beta(b)} \frac{\partial F(b, y)}{\partial y} dy = F(b, \beta(b)) - F(b, \alpha(b)) \\ \int_{\alpha(a)}^{\beta(a)} N(a, y) dy &= \int_{\alpha(a)}^{\beta(a)} \frac{\partial F(a, y)}{\partial y} dy = F(a, \beta(a)) - F(a, \alpha(a)) \end{aligned}$$

Mettendo tutto insieme, molti termini si semplificano e si rimane con:

$$\int_{\partial^+ E} N(x, y) dy = \int_a^b \left(\frac{\partial F(x, \beta(x))}{\partial x} - \frac{\partial F(x, \alpha(x))}{\partial x} \right) dx$$

Per finire, essendo che

$$\frac{\partial F(x, \beta(x))}{\partial x} - \frac{\partial F(x, \alpha(x))}{\partial x} = \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial^2 F(x, y)}{\partial x \partial y} dy = \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial N}{\partial x} dy$$

si ottiene

$$\int_{\partial^+ E} N(x, y) dy = \int_a^b dx \int_{\alpha(x)}^{\beta(x)} \frac{\partial N}{\partial x} dy = \int_E \frac{\partial N}{\partial x} dx dy$$

□

Si ricorda che, data una curva piana regolare $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ di componenti $(x(t), y(t))$, il versore tangente a γ è

$$\tau = \frac{\gamma'}{\|\gamma'\|} = \left(\frac{x'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}}, \frac{y'}{\sqrt{x'^2 + y'^2}} \right) \equiv (\tau_1, \tau_2)$$

Prendendo $\nu = (\tau_2, -\tau_1)$, si ottiene un versore tale che $\nu \cdot \tau = 0$, cioè il *versore normale* alla curva γ . Se $\gamma = \partial^+ E$, il versore normale ν come definito sopra risulta puntare verso l'esterno di E . In questo modo:

$$\int_{\partial^+ E} M dx = \int_a^b M(\gamma(t)) \gamma'_1(t) dt = \int_a^b M(\gamma(t)) \frac{\gamma'_1(t)}{\|\gamma'_1(t)\|} \|\gamma'_1(t)\| dt = \int_{\gamma} M \tau_1 ds = - \int_{\partial E} M \nu_2 ds$$

Osservazione 4.3. Nell'ultimo integrale, si è scritto solo ∂E perché l'integrale curvilineo non dipende dall'orientazione.

Allo stesso modo si trova che

$$\int_{\partial^+ E} N dy = \int_{\partial E} N \nu_1 ds$$

Le relazioni che costituiscono la formula di Gauss-Green, usando queste relazioni, diventano:

$$\int_E \frac{\partial M}{\partial y} dx dy = \int_{\partial E} M \nu_2 ds \quad \int_E \frac{\partial N}{\partial x} dx dy = \int_{\partial E} N \nu_1 ds$$

Definendo, ora, il campo vettoriale $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ in \mathbb{R}^2 tale che $\mathbf{V} = (V_1, V_2) = (N, M)$, allora la formula di Gauss-Green diventa:

$$\int_E \nabla \cdot \mathbf{V} dx dy = \int_{\partial E} (V_1 \nu_1 + V_2 \nu_2) ds = \int_{\partial E} \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\nu} ds \quad (4.3.3)$$

Questo è noto come **teorema della divergenza** e l'integrale al secondo membro è il *flusso* di \mathbf{V} attraverso ∂E .