

- Analisi Matematica II -

Federico Brutti

April 9, 2025

"Qui c'è da applicare un procedimento matematico molto importante; si chiama porconare" - Franco Z.

Contents

1	Equazioni Differenziali	5
1.1	Modelli differenziali	5
1.2	Equazioni differenziali del primo ordine	6
1.2.1	Equazioni a variabili separabili	7
1.2.2	Equazioni lineari del primo ordine	10
1.3	Equazioni differenziali lineari del secondo ordine	12
1.3.1	Equazioni lineari omogenee a coefficienti costanti	14
1.3.2	Equazioni lineari non omogenee a coefficienti costanti .	17
2	Calcolo Infinitesimale	23
2.1	Calcolo infinitesimale per le curve	23
2.1.1	Calcolo differenziale e integrale per funzioni a valori vettoriali	25
2.1.2	Curve regolari e lunghezza di un arco di curva	27
2.1.3	Cambiamenti di parametrizzazione, parametro arco, integrali di prima specie	31
2.2	Calcolo infinitesimale per funzioni reali di più variabili	32
2.2.1	Limiti e continuità	33
2.2.2	Analisi delle forme di indeterminazione	34
3	Calcolo Differenziale	37
3.1	Calcolo differenziale per funzioni reali di più variabili	37
3.1.1	Derivate parziali, derivabilità, piano tangente	38
3.1.2	Differenziabilità, derivate direzionali	39
3.1.3	Calcolo delle derivate e derivate di ordine superiore . .	39
3.1.4	Equazioni alle derivate parziali	39
3.1.5	Differenziale secondo, matrice hessiana, formula di Tay- lor del secondo ordine	39
3.2	Calcolo differenziale per funzioni di più variabili a valori vet- toriali	39

4	Ottimizzazione - Estremi Liberi	41
4.1	Generalità	41
5	Calcolo integrale	43
5.1	Pisellp4	43
6	Campi Vettoriali	45
6.1	Pisellp5	45
7	Serie di Fourier	47
7.1	PisellpFinale	47

Chapter 1

Equazioni Differenziali

1.1 Modelli differenziali

Passiamo da uno studio numerico ad uno particolarmente più astratto. Analisi matematica 2 è una materia molto importante non solo per consolidare le nozioni del predecessore che compongono il toolset necessario per lavorare qui, ma anche perché renderà il resto delle materie di stampo matematico più comprensibili e approcciabili.

Iniziamo riprendendo le funzioni; ne hai viste di ogni tipo, da sole, composte, inverse etc... e adesso lavorerai con famiglie di funzioni.

Definizione 1. Equazione differenziale ordinaria

Definiamo equazione differenziale di ordine n un'equazione del tipo:

$$F(t, y, y', y'', \dots, y^n)$$

*Dove $y(t)$ è la funzione incognita ed F è una funzione assegnata delle $n + 2$ variabili $(t, y, y', y'', \dots, y^n)$ a valori reali. Diremo inoltre il suo **ordine** l'ordine massimo di derivata che compare.*

Come potrai immaginare, l'esistenza di un'equazione implica l'esistenza di una soluzione. Non sarà bello, ma per ottenerla sarà necessario l'aiuto degli integrali.

Definizione 2. Curva integrale dell'equazione differenziale

Diciamo curva integrale o soluzione dell'equazione nell'intervallo $I \subset \mathbb{R}$ una funzione $\phi(t)$, definita almeno in I e a valori reali, per cui risulti:

$$F(t, \phi(t), \phi'(t), \phi''(t), \dots, \phi^n(t)) = 0, \forall t \in I$$

*In merito, ci servirà ottenere l'**integrale generale**, ovvero una formula che rappresenti la famiglia di tutte le soluzioni dell'equazione.*

Concetti di base ottenuti; benvenuto in analisi matematica 2.

1.2 Equazioni differenziali del primo ordine

Definizione 3. *Equazione differenziale del primo ordine*

Si dice tale qualunque equazione differenziale si presenti con un'incognita, una funzione e una singola derivata. Avrà infatti la forma:

$$F(t, y, y') = 0, \text{ con } F \text{ funzione assegnata di } t, y, y' \text{ a valori reali}$$

Tali equazioni si risolvono attraverso l'integrazione delle stesse. Queste prenderanno una forma generale del tipo:

$$y'(t) = f(t), \text{ con soluzioni } y(t) = \int f(t)dt + c, \text{ dove } c \in \mathbb{R}$$

Essendo che l'equazione ha infinite curve integrali distinte dalla costante arbitraria c , ne traiamo che l'insieme delle soluzioni di un'equazione differenziale del primo ordine è costituito da più funzioni, dipendenti dal parametro $c : t \rightarrow \phi(t; c)$. Questa scrittura è l'**integrale generale** menzionato prima.

Qua sorge una domanda importante: sarebbe possibile determinarne una curva integrale precisa? Il quesito ha soluzione nell'aggiunta della **condizione di Cauchy**, da qui in poi riferita come *restrizione*. Infatti, applicandola all'integrale generale di un'equazione differenziale, ci consente di determinare il valore della costante arbitraria in sua funzione. Questa aggiunta forma il sovramentionato costruito:

Definizione 4. *Problema di Cauchy*

Chiamiamo problema di Cauchy il processo risolutivo di un'equazione differenziale che detiene una condizione supplementare, con lo scopo ultimo di trovare una soluzione precisa. Assume la forma:

$$\begin{cases} F(t, y, y') = 0 \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Osserviamo le modalità di risoluzione dei suddetti problemi. Per quanto riguarda il lavoro sulle equazioni differenziali si tratta sempre di determinare prima la curva integrale, per poi applicare ad essa la restrizione del problema.

Esempio 1. *Risolvere il seguente problema di Cauchy*

$$\begin{cases} y' = -e^{-x} \\ y(0) = 3 \end{cases}$$

Per prima cosa è necessario trovare la curva integrale dell'equazione differenziale, quindi procediamo con l'integrazione.

$$\int -e^{-x} dx = e^{-x} + c$$

Abbiamo trovato la soluzione generale. Non basta: troviamo quel valore della costante c in funzione della condizione per far sì che torni. Per applicarla, sostituiamo alle x il valore 0 e poniamo l'equazione uguale a 3:

$$e^{-0} + c = 3 \implies 1 + c = 3 \implies c = 2$$

Abbiamo trovato il valore richiesto. Sostituiamolo alla costante nella soluzione generale dell'equazione differenziale per trovare la specifica.

$$\text{Soluzione : } y(x) = e^{-x} + 2$$

Lavorando con questo costrutto è cosa buona e giusta ordinare gli elementi dell'equazione. La forma standard più chiara, detta **forma normale**, vede la derivata uguale al resto dei dati, ovvero:

$$y'(t) = f(t, y(t))$$

Il procedimento osservato per i problemi di Cauchy è generale e varrà per tutti gli argomenti ad esso inerenti, seppur si possano trovare alcune differenze per i casi particolari trattati nelle successive sezioni.

1.2.1 Equazioni a variabili separabili

Definizione 5. Equazioni differenziali a variabili separabili

Questo è un caso particolare di equazioni differenziali ordinarie del primo ordine. La derivata è data dal prodotto di due funzioni a, b , la prima continua su un intervallo $I \subset \mathbb{R}$ e la seconda su un intervallo $J \subset \mathbb{R}$. Si presentano nella forma:

$$y' = a(t)b(y)$$

Da questa definizione, vedendo che si parla di prodotti, è necessario distinguere due istanze di lavoro:

- Se il numero \bar{y} è una soluzione dell'equazione $b(y) = 0$, la funzione costante $y(t) = \bar{y}$ è una soluzione valida, detta **integrale singolare**. Il secondo membro si annulla perché $b(\bar{y}) = 0$, come anche il primo, perché la derivata di una costante è 0.
- Supponendo $b(y) \neq 0$ abbiamo il seguente caso più comune ed elaborato, ovvero la forma:

$$a(t) = \frac{y'}{b(y)}$$

È necessario ampliare il discorso sul secondo caso. Prendiamo un'ipotetica soluzione $y(t)$, allora l'equazione soddisferà la seguente identità, la quale prendendo gli integrali definiti di ambo i membri fa ottenere:

$$\frac{y'(t)}{b(y(t))} = a(t) \implies \int \frac{y'(t)}{b(y(t))} dt = \int a(t) dt + c$$

Nell'integrale di sinistra è consentito effettuare un cambio di variabile $y = y(t)$; $dy = y'(t)dt$, ottenendo:

$$\int \frac{dy}{b(y)} = \int a(t) dt + c$$

Che risulta essere l'integrale generale dell'equazione differenziale.

Inoltre, se la funzione $B(y)$ è una primitiva di $\frac{1}{b(y)}$ e $A(t)$ una primitiva di $a(t)$, allora l'integrale generale è assegnato dalla seguente equazione in **forma implicita**:

$$B(y) = A(t) + c, \text{ con } c \text{ costante arbitraria.}$$

Adesso ragioniamo; in che modo il problema di Cauchy si adatta a questo tipo di equazioni? Abbiamo una forma apposita:

Teorema 1. *Problema di Cauchy per ED a variabili separabili*

$$\begin{cases} y' = a(t)b(y) \\ y(t_0) = y_0 \end{cases}$$

Dove a è continua in un intorno I di t_0 e b è continua in un intorno J di y_0 . Esisteranno quindi:

- Intorno $I' \subset I$ di t_0 .
- Funzione continua y definita su I' .
- Funzione derivata y' continua su I' , soluzione del problema.

Inoltre, se anche b' è una funzione continua su J oppure b ha un rapporto incrementale¹ limitato in J (anche se non è derivabile), allora la soluzione è **unica**.

Esempio 2. Risolvere il problema di Cauchy

$$\begin{cases} y' = ty^3 \\ y(0) = 1 \end{cases}$$

1. Calcola l'integrale generale dell'equazione differenziale

Anzitutto, poniamo $y \neq 0$, poiché a noi serve trovare l'integrale generale, non quello singolare. Procediamo con la separazione delle variabili:

$$y' = ty^3 \implies \frac{dy}{dt} = ty^3 \implies \frac{dy}{y^3} = t dt$$

Adesso possiamo procedere ad integrare le due parti distinte, quindi:

$$\int \frac{dy}{y^3} = \int t dt + c \implies -\frac{1}{2y^2} = \frac{t^2}{2} + c$$

Effettuiamo i passaggi algebrici per ricavare la funzione y :

$$\begin{aligned} \bullet -\frac{1}{2y^2} = \frac{t^2}{2} + c &\implies \left(-\frac{1}{2y^2}\right)^{-1} = \left(\frac{t^2}{2} + c\right)^{-1} \\ \bullet -2y^2 = \frac{2}{t^2 + 2c} &\implies -y^2 = \frac{1}{t^2 + 2c} \implies y^2 = -\frac{1}{t^2 - 2c} \end{aligned}$$

Che porta infine ad avere la soluzione generale:

$$y = \pm \frac{1}{\sqrt{-2c - t^2}}$$

2. Imponi la condizione di Cauchy

Notiamo che il valore posto della condizione è positivo, di conseguenza la soluzione di y è tale che appartiene all'intervallo $(0, +\infty)$ e considereremo solamente la radice positiva della soluzione generale.

Detto ciò, determiniamo il valore di $y(t)$ applicando la condizione; per renderci la vita ulteriormente facile, applichiamo una piccola sostituzione sulla costante. D'altronde è arbitraria. Dopodiché diamole il valore della condizione.

¹Concetto che misura la velocità con la quale una funzione cresce o decresce in base alla variabile indipendente.

$$\text{for } k = -2c \implies y(t) = \frac{1}{\sqrt{k - t^2}} \implies y(t) = \frac{1}{\sqrt{1 - t^2}}$$

Soluzione specifica dell'equazione.

1.2.2 Equazioni lineari del primo ordine

Tipo di equazioni differenziali ordinarie, dove F è lineare in y e y' , le cui soluzioni sono espresse mediante uno spazio vettoriale di dimensione 1. Si presentano nella forma:

$$a_1(t)y'(t) + a_2(t)y(t) = g(t)$$

Con a_1, a_2 funzioni continue su un intervallo. L'equazione può presentarsi in due forme diverse, date a ed f funzioni continue sull'intervallo $I \subset \mathbb{R}$:

- **Equazione completa o forma normale;** scrivibile se il coefficiente $a_1(t)$ non si annulla.

$$y'(t) + a(t)y(t) = f(t)$$

Otteniamo la sua soluzione aggiungendone una particolare alla sua curva integrale, definita da un valore conosciuto della costante arbitraria c .

- **Equazione omogenea;** ottenibile ponendo $f(t) = 0$, presenta la seguente forma:

$$z'(t) + a(t)z(t) = 0$$

Notiamo che le y sono sostituite dalle z per chiarire il tipo di equazione presa in esame.

Capiamo quindi che il procedimento da attuare si compone di due passi principali: prima la ricerca di un integrale generale dell'equazione omogenea, poi trovare la soluzione particolare da aggiungere a quella completa. Vediamo un esempio:

Esempio 3. Risoluzione equazione differenziale lineare del primo ordine

Consideriamo la seguente semplice equazione:

$$y'(t) + 3y(t) = 2t, \text{ dove } a(t) = 3, f(t) = 2t \text{ e la primitiva } A(t) = 3t$$

1. Ricerca della soluzione generale dell'equazione omogenea

L'equazione omogenea ha forma $y'(t) + a(t)y(t) = 0$, di conseguenza prenderemo quella iniziale ponendo $f(t) = 0$, per poi moltiplicare tutto per l'esponenziale alla primitiva $A(t)$ ed infine ricavare $z'(t)$

$$z'(t) + 3z(t) = 0 \implies z'(t)e^{3t} + 3z(t)e^{3t} = 0 \implies z'(t)e^{3t} = 0$$

Avendo ottenuto una funzione differenziale, necessitiamo di integrarla per ottenere quello che ci serve.

$$\int z'(t)e^{3t} dt = z(t)e^{3t} + c \implies z(t) = ce^{-3t}$$

Come dici? Hai sbagliato il segno? Forse devo ricordarti il significato di costante **arbitraria**. Può essere quello che voglio, quando lo voglio.

2. Metodo di variazione delle costanti per trovare il valore di c

Il metodo consiste nel trasformare la costante in una funzione. Abbiamo che la soluzione appena trovata è di forma $\bar{y} = ce^{-3t}$, la quale dovrà prendere il posto delle y nell'equazione iniziale, dando la forma:

$$e^{-3t}(c'(t) - 3c(t)) + 3c(t)e^{-3t} = 2t \implies e^{-3t}c'(t) = 2t$$

Ora dobbiamo trovare la funzione $c(t)$, quindi spostiamo gli elementi ed integriamo le due parti.

$$c'(t) = 2te^{3t} \implies c(t) = \int 2te^{3t} dt \implies c(t) = \frac{2}{3}te^{3t} - \frac{2}{9}e^{3t}$$

Ora, sperando che quello che sto per fare non sia un abusivismo notazionistico, rimuovo l'esponenziale dall'equazione, siccome la funzione della costante è arbitraria e può essere quello che voglio, ottenendo:

$$c(t) = \frac{2}{3}t - \frac{2}{9}$$

3. Composizione dell'integrale generale dell'equazione completa

Adesso abbiamo tutte le equazioni necessarie per scrivere la soluzione:

- $z(t) = ce^{-3t}$
- $c(t) = \frac{2}{3}t - \frac{2}{9}$

$$\text{Soluzione: } y(t) = ce^{-3t} + \frac{2}{3}t - \frac{2}{9}$$

1.3 Equazioni differenziali lineari del secondo ordine

Un'equazione differenziale è tale se si presenta nella forma:

$$a_2(t)y'' + a_1(t)y' + a_0(t)y = f(t)$$

Dove i coefficienti a_i ed il termine noto f sono funzioni definite in un intervallo I dove sono continue. Come in quelle del primo ordine, se il termine noto è 0, l'equazione si dice **omogenea**, altrimenti è **completa**. Inoltre, se le funzioni a_i sono costanti, la chiameremo **a coefficienti costanti**, in caso contrario sarà a **coefficienti variabili**. Infine, se $a_2(t) \equiv 1$ si dirà in **forma normale**.

La chiamiamo lineare perché introducendo tra gli spazi di funzioni² un operatore apposito L al primo membro, possiamo notare che ha una dinamica uguale alle applicazioni lineari viste in algebra. Quindi:

$$\begin{aligned} L : C^2(I) &\rightarrow C^0(I) \\ L : y &\rightarrow Ly \end{aligned}$$

Noterai sicuramente che $y \in C^2(I)$ e $Ly \in C^0(I)$. Si mantiene lo stesso ragionamento anche per i coefficienti reali λ_i :

$$L(\lambda_1 y_1 + \lambda_2 y_2) = \lambda_1 Ly_1 + \lambda_2 Ly_2$$

Capiamo che parlando di problemi di Cauchy, l'integrale generale di qualsiasi equazione del secondo ordine avrà necessariamente due parametri arbitrari e due restrizioni. La scrittura completa risulta essere:

$$\begin{cases} y'' + a(t)y' + b(t)y = f(t) \\ y(t_0) = y_0 \\ y'(t_0) = y_1 \end{cases}$$

Dove a, b, f sono funzioni continue nell'intervallo I tale che $t_0 \in I \forall y_0, y_1 \in \mathbb{R}$. Il problema avrà una sola soluzione $y \in C^2(I)$, individuata imponendo le restrizioni.

La nostra fortuna di poter lavorare con un operatore lineare rende semplice trovare la struttura dell'integrale generale; c'è pure il teorema:

Teorema 2. Struttura dell'integrale generale dell'equazione lineare completa

²Si tratta del concetto di **classi di funzioni**. La classe C di una funzione indica l'appartenenza della stessa all'insieme delle funzioni derivabili con continuità per n numero di volte.

1.3. EQUAZIONI DIFFERENZIALI LINEARI DEL SECONDO ORDINE 13

1. L'insieme delle soluzioni dell'equazione omogenea $Lz = 0$ in un intervallo I è uno spazio vettoriale e sottospazio di $C^2(I)$.
2. L'integrale generale dell'equazione completa si ottiene sommando l'integrale di quella omogenea con una soluzione particolare della prima.

In particolare, dal primo punto del teorema evinciamo che ci saranno due soluzioni dell'equazione omogenea $z_1(t), z_2(t)$ linearmente indipendenti ed ogni altra soluzione dell'omogenea è combinazione lineare delle $z_i(t)$. Quindi l'integrale generale sarà dato dalla formula:

$$c_1 z_1(t) + c_2 z_2(t), \text{ con } c_i \text{ costanti arbitrarie.}$$

Talvolta risulterà dubbio se le soluzioni sono linearmente dipendenti o meno, ed esattamente per questo ci viene in soccorso l'algebra lineare con la nozione di determinante:

Teorema 3. Matrice Wronskiana per controllo indipendenza lineare

Il controllo è molto semplice; creiamo una matrice 2×2 dove la prima riga è costituita dalle soluzioni, mentre la seconda dalle loro derivate prime. Se il calcolo del determinante $\det(\text{Mat}) = ad - cb \neq 0$, allora le soluzioni saranno linearmente indipendenti. In caso contrario se ne dovranno cercare delle altre.

$$\text{Mat} = \begin{pmatrix} z_1(t) & z_2(t) \\ z_1'(t) & z_2'(t) \end{pmatrix}$$

Esempio 4. Determinazione soluzioni dell'equazione omogenea di second'ordine

Consideriamo la seguente equazione differenziale omogenea di secondo ordine:

$$t^2 z'' - 3t z' + 3z = 0, \text{ per Ansatz: } z_1 = t \text{ e } z_2 = t^3$$

Grazie al nostro approccio avremo di conseguenza:

- $z_1 = t \implies z_1' = 1 \implies z_1'' = 0$
- $z_2 = t^3 \implies z_2' = 3t^2 \implies z_2'' = 6t$

Verifichiamo se sostituendo gli elementi trovati l'equazione si annulla:

- $t^2 z_1'' - 3t z_1' + 3z_1 = 0 \implies t^2 \times 0 - 3t \times 1 + 3 \times t = 0 \implies -3t + 3t = 0$
- $t^2 z_2'' - 3t z_2' + 3z_2 = 0 \implies t^2 \times 6t - 3t \times 3t^2 + 3 \times t^3 \implies 6t^3 - 9t^3 + 3t^3 = 0$

Abbiamo confermato che quelle trovate sono soluzioni valide per l'equazione omogenea. Sono tuttavia linearmente dipendenti? Effettuiamo il check con la matrice Wronskiana:

$$Mat = \begin{pmatrix} z_1(t) & z_2(t) \\ z_1'(t) & z_2'(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t & t^3 \\ 1 & 3t^2 \end{pmatrix}$$

$$\det(Mat) = ad - cb = (t \times 3t^2) - (1 \times t^3) = 2t^2 \neq 0$$

Soluzioni valide e linearmente indipendenti. Meglio di così? Resta solo scrivere la soluzione generale dell'omogenea:

$$z(t) = c_1 z_1 + c_2 z_2 = c_1 t + c_2 t^3$$

Premetto che non sarà sempre possibile risolvere un'equazione differenziale di secondo ordine, ma è normale che sia così; non ci vogliamo ancora così male. Per questa ragione ci soffermeremo solamente sui due casi particolari trattati nelle successive sezioni; tuttavia il seguente procedimento generale per gli esercizi trattati è universale. Facciamone il punto:

1. Determinare la curva integrale generale dell'equazione omogenea, trovando due sub-soluzioni z_1, z_2 linearmente indipendenti.
2. Determinare la soluzione particolare dell'equazione completa.
3. Scrivere la curva integrale generale dell'equazione completa in forma:
 $y(t) = \bar{y}(t) + c_1 z_1(t) + c_2 z_2(t)$

1.3.1 Equazioni lineari omogenee a coefficienti costanti

Nominata all'inizio della sezione, riprendiamo l'equazione differenziale lineare del secondo ordine **a coefficienti costanti**:

$$z''(t) + az'(t) + bz(t) = 0, \text{ dove } a, b \text{ sono valori costanti.}$$

Come in quelle di primo ordine, risulta comodo ricercare soluzioni di tipo esponenziale $t \rightarrow e^{rt}$, con $r \in \mathbb{C}$. La prima furbata sta qui; la derivata dell'esponenziale non varia, quindi se sostituiamo e^{rt} ad ogni z , potremo raccogliere il primo, per poi rimuoverlo completamente dall'equazione in quanto valore sicuramente positivo.

$$e^{rt}(r^2 + ar + b) = 0 \implies r^2 + ar + b = 0$$

Questa equazione ottenuta si dice **equazione caratteristica** ed è risolvibile come una normalissima equazione di secondo grado, con la formula quadratica. In tal merito, ci è possibile distinguere tre casi in base al valore del discriminante:

1.3. EQUAZIONI DIFFERENZIALI LINEARI DEL SECONDO ORDINE 15

- $\Delta > 0$; L'equazione caratteristica avrà due radici reali e distinte r_1, r_2 , quindi le funzioni $z_1(t) = e^{r_1 t}$ e $z_2(t) = e^{r_2 t}$ saranno due soluzioni distinte e indipendenti dell'equazione omogenea. Si tratta del caso più semplice e l'integrale si scrive come:

$$z(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t}$$

- $\Delta = 0$; L'equazione caratteristica avrà una sola radice con doppia molteplicità, quindi $r = -\frac{a}{2}$. Abbiamo quantomeno la sicurezza che una soluzione è data da:

$$z(t) = c e^{-\frac{a}{2}t}$$

Mentre per l'altra sarà necessario utilizzare il metodo di variazioni delle costanti, ponendo il valore $c(t)$. Otteniamo:

$$z(t) = c(t)e^{rt}, \text{ dove } r = -\frac{a}{2}$$

Da cui derivata prima e seconda sono:

$$\begin{aligned} - z'(t) &= e^{rt}(rc(t) + c'(t)) \\ - z''(t) &= e^{rt}(r^2c(t) + 2rc'(t) + c''(t)) \end{aligned}$$

E sostituendo tutto all'equazione iniziale otteniamo:

$$e^{rt}[(r^2 + ar + b)c(t) + (2r + a)c'(t) + c''(t)] = 0$$

Notiamo in primis che r è soluzione dell'equazione caratteristica, quindi il coefficiente $c(t)$ si annulla, come d'altronde lo fa anche $c'(t)$, perché risulta $a - a = 0$. Quindi la nostra equazione omogenea "variata" deve risultare necessariamente $c''(t) = 0$, da cui $c(t) = c_2 t + c_1$. Scriveremo quindi come segue la soluzione generale dell'omogenea:

$$z(t) = e^{-\frac{a}{2}t}(c_2 t + c_1)$$

- $\Delta < 0$; L'equazione caratteristica avrà due radici complesse e coniugate $r_1 = a + bi$ e $r_2 = a - bi$, date dalle relative funzioni:
 - $z_1(t) = e^{(a+bi)t} = e^{at}(\cos(bt) + i\sin(bt))$
 - $z_2(t) = e^{(a-bi)t} = e^{at}(\cos(bt) - i\sin(bt))$

Volendo noi preferibilmente soluzioni reali piuttosto che complesse e ricordando che ogni combinazione lineare è una soluzione, possiamo prendere rispettivamente, grazie ad un magheggio algebrico: $\frac{1}{2}(z_1 + z_2)$ e $\frac{1}{2i}(z_1 - z_2)$, ovvero la forma che userai al posto delle altre:

$$z_1(t) = e^{at}\cos(bt), \quad z_2(t) = e^{at}\sin(bt)$$

Le quali formano l'integrale generale $z(t)$:

$$z(t) = e^{at}(c_1\cos(bt) + c_2\sin(bt))$$

Esempio 5. *Risoluzione equazioni omogenee per ogni caso*

- $\Delta > 0$:

Consideriamo l'equazione $z'' - 2z' - 3z = 0$. Facendoci furbi potremmo usare l'algebra, ma mostrerò il procedimento generale con la formula quadratica. Anzitutto, passiamo all'equazione caratteristica:

$$z'' - 2z' - 3z = 0 \implies r^2 - 2r - 3 = 0$$

Definiamo ora le parti della formula quadratica come $a = 1$, $b = -2$, $c = -3$ e svolgiamo i calcoli:

$$z_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \implies \frac{2 \pm \sqrt{16}}{2}$$

Che ci darà rispettivamente:

- $r_1 = 3$
- $r_2 = -1$

Ora abbiamo tutti gli elementi per la formula dell'integrale generale:

$$z(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} \implies c_1 e^{3t} + c_2 e^{-t}$$

- $\Delta = 0$:

Consideriamo l'equazione $z'' + 6z' + 9z = 0 \implies r^2 + 6r + 9 = 0$. Facendoci furbi e notando che questo è un trinomio particolare, otteniamo che ha due soluzioni perfettamente uguali:

- $r_1 = -3$

1.3. EQUAZIONI DIFFERENZIALI LINEARI DEL SECONDO ORDINE 17

$$- r_2 = -3$$

Quindi che fare? Teniamo r_1 e facciamo dipendere r_2 dall'incognita t . Molto semplicemente otteniamo che:

$$z(t) = c_1 e^{r_1} + c_2 t e^{r_1} \implies c_1 e^{-3t} + c_2 t e^{-3t} \equiv e^{-3t}(c_1 + c_2 t)$$

- $\Delta < 0$:

Consideriamo l'equazione $z'' + 2z' + 5z = 0 \implies r^2 + 2r + 5 = 0$. Notiamo che usando la formula quadratica, risulta un discriminante che ha senso solo nel campo dei complessi. Ne abbiamo di conseguenza:

$$z_{1,2} = \frac{-2 \pm \sqrt{-16}}{2} = \frac{-2 \pm 4i}{2}$$

Avremo di conseguenza le due soluzioni:

$$- r_1 = a + bi \implies r_1 = -1 + 2i$$

$$- r_2 = a - bi \implies r_2 = -1 - 2i$$

Siccome a noi interessa avere soluzioni reali, considereremo solamente tali valori delle soluzioni, ottenendo $\alpha = -1$, $\beta = 2$. Ora possiamo scrivere la formula generale:

$$z(t) = c_1 e^{\alpha t} \cos(\beta t) + c_2 e^{\alpha t} \sin(\beta t) \implies e^{-t}(c_1 \cos(2t) + c_2 \sin(2t))$$

1.3.2 Equazioni lineari non omogenee a coefficienti costanti

Il nostro scopo qui è trovare l'integrale particolare dell'equazione completa. Non differisce molto dal metodo per le equazioni del primo ordine, questo è come il secondo passaggio. La forma da trovare è:

$$y''(t) + ay'(t) + by(t) = f(t), \text{ con } a, b \text{ valori costanti.}$$

Ci troviamo di fronte a due strade in base all'esercizio proposto; nel caso in cui f avesse una forma semplice, ovvero un polinomio oppure un polinomio moltiplicato per un esponenziale, è consigliato ricercare una soluzione che gli somigli, mediante il **metodo di somiglianza**. In alternativa, è sempre possibile usare il metodo di variazione delle costanti visto per il precedente ordine, anche se risulta più oseroso a livello di calcoli.

Definizione 6. Metodo di somiglianza - caso polinomiale

Sia $f(t) = p_r(t)$, dove quest'ultimo è un polinomio di grado r . Cercheremo una soluzione di tipo polinomiale come segue:

- Se $(b \neq 0) \implies y(t) = q_r(t)$.
- Se $(b = 0 \wedge a \neq 0) \implies y(t) = tq_r(t)$.
- Se $(b = 0 \wedge a = 0) \implies y(t) = t^2q_r(t)$.

Dove $q_r(t)$ è un polinomio di grado r di cui occorre determinare i coefficienti.

Esempio 6. Si consideri l'equazione differenziale $y'' - 3y' + 2y = 1 + t^2$. La forma della soluzione è:

$$y(t) = c_1 e^{r_1 t} + c_2 e^{r_2 t} + \phi(t)$$

Dove r_i sono le radici dell'equazione omogenea e $\phi(t)$ indica una forma simile al membro dell'equazione differenziale di destra. Affrontiamo i due passaggi:

1. Ricerca delle radici dell'equazione omogenea

Come visto prima, ricerchiamo l'equazione caratteristica:

$$z''(t) - 3z'(t) + 2z(t) = 0 \implies r^2 - 3r + 2 = 0$$

Risolviamola come una semplice equazione di secondo grado, con l'algebra:

$$r^2 - 3r + 2 = 0 \implies (r - 2)(r - 1) = 0 \implies r_1 = 2, r_2 = 1$$

La soluzione generale dell'equazione omogenea sarà quindi:

$$z(t) = c_1 e^{2t} + c_2 e^t$$

2. Ricerca della soluzione completa

Ora cerchiamo l'altra parte necessaria per la curva integrale particolare; il metodo della somiglianza dice di prendere un polinomio simile a quello dato, dello stesso grado. In tal caso prenderemo la forma generale del polinomio di secondo grado, ottenendo:

$$\bar{y}(t) = at^2 + bt + c, \bar{y}'(t) = 2at + b, \bar{y}''(t) = 2a$$

Queste tre funzioni vanno ora sostituite alle loro corrispondenti nell'equazione differenziale iniziale, quindi:

$$y'' - 3y' + 2y = 1 + t^2 \implies 2a - 3(2at + b) + 2(at^2 + bt + c) = 1 + t^2$$

La quale, effettuando qualche calcolo, diventa:

1.3. EQUAZIONI DIFFERENZIALI LINEARI DEL SECONDO ORDINE 19

$$(2a)t^2 - (6a - 2b)t + (2a - 3b + 2c) = 1 + t^2$$

Ora utilizzeremo l'algebra per renderci le cose più semplici. La ragione per cui ho voluto confinare i valori noti delle parti dell'equazione è per rendere quali coefficienti debbano essere presi e messi a sistema, eguagliati al loro corrispettivo valore con lo stesso grado.

Se non risulta chiaro è normale. Bisogna immaginare che al membro di destra siano presenti sempre tutti i coefficienti per ogni grado, quindi nel nostro caso: $1t^2, 0t^1, 1t^0 \implies 1, 0, 1$. Questi tre numeri vanno eguagliati ai polinomi con lo stesso grado; quindi:

$$\begin{cases} 2a = 1 \\ -6a + 2b = 0 \\ 2a - 3b + 2c = 1 \end{cases} = \begin{cases} a = \frac{1}{2} \\ b = \frac{3}{2} \\ c = \frac{9}{4} \end{cases}$$

Questi tre valori vengono ora sostituiti alle corrispondenti lettere nell'equazione \bar{y} , la quale ci darà la soluzione particolare che ci serve.

$$\bar{y} = at^2 + bt + c \implies \bar{y} = \frac{1}{2}t^2 + \frac{3}{2}t + \frac{9}{4}$$

La soluzione completa è infatti data da:

$$y(t) = c_1 e^{2t} + c_2 e^t + \left(\frac{1}{2}t^2 + \frac{3}{2}t + \frac{9}{4}\right)$$

Definizione 7. Metodo di somiglianza - caso polinomiale ed esponente

Sia $f(t) = Ae^{\lambda t}$, con $\lambda \in \mathbb{C}$. Cercheremo una soluzione in forma $y(t) = e^{\lambda t}\gamma(t)$. Troviamo che:

$$\gamma'' + \gamma'(2\lambda + a) + \gamma(\lambda^2 + a\lambda + b) = A$$

Ci basta trovare una qualsiasi $\gamma(t)$ che soddisfi la forma appena vista; ma anche qui abbiamo alcuni casi su cui ragionare.

- Se $\lambda^2 + a\lambda + b \neq 0$, quindi λ non è radice dell'equazione caratteristica avremo:

$$\text{Costante } \gamma(t) = \frac{A}{\lambda^2 + a\lambda + b} \implies y(t) = \frac{Ae^{\lambda t}}{\lambda^2 + a\lambda + b}.$$

- Se $(\lambda^2 + a\lambda + b = 0) \wedge (2\lambda + a \neq 0)$, prenderemo:

$$\text{Costante } \gamma'(t) = \frac{A}{2\lambda + a} \implies \left(\gamma(t) = \frac{At}{2\lambda + a} \right) \wedge \left(y(t) = \frac{Ate^{\lambda t}}{2\lambda + a} \right).$$

- Se $(\lambda^2 + a\lambda + b = 0) \wedge (2\lambda + a = 0)$ diremo che l'equazione iniziale è $\gamma'' = A$, da cui otteniamo:

$$\left(\gamma(t) = \frac{A}{2}t^2 \right) \wedge \left(y(t) = \frac{A}{2}t^2e^{\lambda t} \right)$$

Esempio 7. Consideriamo l'equazione differenziale $y'' + y' - 2y = 3e^{-t}$ ed effettuiamo i classici passaggi:

1. Ricerca della soluzione generale omogenea

Mi sbrigo un attimo con i passaggi, dai, ora hai capito come gira.

- Equazione caratteristica: $r^2 + r - 2 = 0$, con soluzioni $r_1 = -2$, $r_2 = 1$.
- Soluzione generale: $z(t) = c_1e^{-2t} + c_2e^t$

2. Applichiamo il metodo di somiglianza

Qui abbiamo un polinomio di grado zero moltiplicato per un esponenziale; la sua forma generale è data da:

- $\bar{y}(t) = ae^{-t}$, l'esponenziale preso è lo stesso della ED.
- $\bar{y}'(t) = -ae^{-t}$
- $\bar{y}''(t) = ae^{-t}$

Sostituendo opportunamente, otteniamo:

$$ae^{-t} - ae^{-t} - 2ae^{-t} = 3e^{-t} \implies e^{-t}(-2a - 3) = 0 \implies a = -\frac{3}{2}$$

Sostituendo a \bar{y} quanto trovato, otteniamo $-\frac{3}{2}e^{-t}$, ottenendo la soluzione completa che segue:

$$y(t) = c_1e^{-2t} + c_2e^t - \frac{3}{2}e^{-t}$$

Esempio 8. Consideriamo l'equazione differenziale $y'' + y' - 2y = 3e^t$. Questo risulta essere un caso particolare, perché almeno una delle radici dell'omogenea ha lo stesso identico valore dell'esponente nella ED. L'equazione è quasi uguale a quella del precedente esempio, se hai lamentele, guarda il procedimento su.

1.3. EQUAZIONI DIFFERENZIALI LINEARI DEL SECONDO ORDINE²¹

1. Per l'omogenea

- *Equazione caratteristica:* $r^2 + r - 2 = 0$
- *Radici del polinomio:* $r_1 = -2, r_2 = 1$
- *Soluzione generale:* $z(t) = c_1 e^{-2t} + c_2 e^t$

2. Per la curva completa

Noterai che almeno una delle radici è uguale all'esponente del membro di destra della ED; non apportare modifiche è un errore, quindi che fare?

Risulta necessario far dipendere l'esponenziale da una t di grado uguale alla molteplicità algebrica³ dell'esponenziale, quindi:

$$\bar{y}(t) = ate^t, \bar{y}'(t) = ae^t + ate^t, \bar{y}''(t) = ae^t + ae^t + ate^t$$

Sostituendo e svolgendo i calcoli otteniamo:

$$ae^t + ae^t + ate^t + ae^t + ate^t - 2(ate^t) = 3e^t \implies a = 1 \implies \bar{y}(t) = te^t$$

Otteniamo finalmente la curva integrale particolare data da:

$$y(t) = c_1 e^{-2t} + c_2 e^t + te^t$$

Notare che nella classe di termini noti $Ae^{\lambda t}$, con $\lambda \in \mathbb{C}$, appartengono anche le seguenti categorie:

$$\cos \omega t, \sin \omega t, e^{\lambda t} \cos \omega t, e^{\lambda t} \sin \omega t, \text{ con } \lambda \in \mathbb{R}$$

Definizione 8. Metodo di sovrapposizione

Nel caso in cui $f(t)$ sia una combinazione lineare di termini appartenenti a due tipi di funzione diversi⁴, per linearità allora:

1. Troviamo una soluzione dell'equazione che ha come termine noto il primo elemento di quello originario.
2. Troviamo una soluzione dell'equazione che ha come termine noto il secondo elemento di quello originario.
3. Troviamo una soluzione dell'equazione di partenza, che sarà la somma delle due soluzioni prima trovate.

Esempio 9. Inserisci esempio

³Si tratta del numero di volte in cui compare il valore nel polinomio

⁴Un esempio è la somma di un polinomio con un esponenziale, oppure un esponenziale sommato con una funzione trigonometrica.

Chapter 2

Calcolo Infinitesimale

2.1 Calcolo infinitesimale per le curve

Prima di iniziare l'argomento è necessario rimettere in chiaro alcuni importanti concetti visti in precedenza con algebra lineare, come il **calcolo vettoriale**. Quanto verrà espresso ora si trova nello spazio \mathbb{R}^n , i cui elementi si dicono **vettori** e si indicano con $v = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, mentre le x_i sono le **componenti del vettore**.

Diremo poi **modulo** o norma di un vettore la radice del prodotto scalare fra ogni sua componente alla seconda. Si scrive:

$$|v| = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \equiv \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}$$

Diciamo poi **versore** il vettore unitario indicato con:

$$vers(v) = \frac{v}{|v|} = 1$$

Lo spazio \mathbb{R}^n è poi dotato della **base canonica**, dove ogni vettore e_i presenta un solo valore 1 in una posizione i , con tutte le altre uguali a 0

$$e_1 = (1, 0, \dots, 0, 0), e_2 = (0, 1, \dots, 0, 0), e_n = (0, 0, \dots, 0, 1)$$

Ed ogni vettore può essere espresso come combinazione lineare degli elementi della base canonica:

$$v = \sum_{i=1}^n x_i e_i$$

Le operazioni classiche somma algebrica e prodotto per uno scalare portano al **prodotto scalare**, già menzionato prima e definito come:

$$\langle v_1, v_2 \rangle = (u_1, u_2, \dots, u_n)(w_1, w_2, \dots, w_n) = \sum_{i=1}^n u_i w_i$$

In particolare, se lo spazio \mathbb{R}^n ha dimensione 2 o 3, abbiamo che funziona il **teorema del coseno**:

$$\langle v_1, v_2 \rangle = |v_1||v_2| \cos(\theta) \implies \cos(\theta) = \frac{\langle v_1, v_2 \rangle}{|v_1||v_2|}$$

dove theta è un angolo compreso fra i due vettori. Diremo inoltre che due vettori si dicono **ortogonali** quando il loro prodotto scalare è uguale a zero.

Infine, richiamiamo il **prodotto vettoriale**, un procedimento simile a quello per il calcolo dell'inversa di una matrice. Sfortunatamente, solo la parte più tediosa:

$$u \times v = \begin{pmatrix} i & j & k \\ u_1 & u_2 & u_3 \\ v_1 & v_2 & v_3 \end{pmatrix} = i(u_2 v_3 - u_3 v_2) - j(u_1 v_3 - u_3 v_1) + k(u_1 v_2 - u_2 v_1)$$

In tal merito, se il prodotto vettoriale di due vettori è 0, questi si dicono **paralleli**. Per quanto riguarda i prerequisiti di algebra, queste nozioni sono sufficienti, quindi soffermiamoci sullo scopo che vogliamo darci.

Finora abbiamo lavorato con la nozione di funzione ad una singola variabile reale; dobbiamo estendere il concetto per far sì che comprenda anche i casi in cui si ricevano o ritornino più variabili. Lavoreremo infatti con funzioni del tipo $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ oppure $g: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Nello specifico:

- **Funzione di più variabili**; Funzione definita sullo spazio $A \subset \mathbb{R}^n$, con $n = 1$.
- **Funzione a valori reali**; Funzione che ha immagine $f(A) \subseteq \mathbb{R}$.
- **Funzione a valori vettoriali**; Funzione con immagine $f(A) \subset \mathbb{R}^n$, dove $n > 1$.

Generalmente ci interesseremo massimo allo spazio \mathbb{R}^3 , perché altrimenti la cosa diventerebbe estremamente dolorosa. Ricorda: se è a una dimensione, ha una sola variabile reale, se ne ha due, stai lavorando con vettori, mentre se ne ha tre con una matrice 3×3 e così via.

2.1.1 Calcolo differenziale e integrale per funzioni a valori vettoriali

Anzitutto osserveremo casi di calcolo infinitesimale per funzioni a più variabili, che risulta essere il caso più semplice su cui lavorare; più nello specifico, vedremo che in dimensione 2 e 3, le funzioni assumeranno il significato geometrico di curva nel piano o nello spazio rispettivamente.

Definizione 9. Limite per funzioni a più variabili

Sia $r : I \rightarrow \mathbb{R}^m$, con I intervallo dello spazio \mathbb{R} . Siano ora $t_0 \in I$ e $l \in \mathbb{R}^m$, con l il valore del limite. Allora:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} |r(t) - l| = 0 \implies \lim_{t \rightarrow t_0} r(t) = l$$

Questa definizione viene utilizzata per le funzioni ad una variabile, tuttavia è estendibile anche a funzioni vettoriali immaginando che $r(t)$ comprenda ogni singola componente del vettore, quindi come $r(t) = [r_1(t), r_2(t), \dots, r_n(t)]$, che produrrà altrettanti valori l_i . Infatti, se prendiamo una funzione vettoriale dello spazio \mathbb{R}^2 possiamo dire che:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} |r(t) - l| = 0 \implies \lim_{t \rightarrow t_0} \left| \begin{pmatrix} r_1(t) - l_1 \\ r_2(t) - l_2 \end{pmatrix} \right|$$

Che ci fa ottenere, finalmente, la forma generale del limite che ci serve per gli esercizi. Nonostante questa sia quella per lo spazio di dimensione 2, è facilmente estendibile a dimensioni superiori:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} \sqrt{(r_1(t) - l_1)^2 + (r_2(t) - l_2)^2} = 0 \implies \lim_{t \rightarrow t_0} (r_1(t) - l_1) + (r_2(t) - l_2) = 0$$

Esempio 10. Calcolo di limite di funzione $r : I \rightarrow \mathbb{R}^3$

Consideriamo la funzione: $r(t) = (\cos(t) + \pi, e^t - 1, \sin(t^2))$. Per calcolarne il limite per $t \rightarrow t_0$, bisogna applicarlo per ogni singola componente del vettore. Avremo quindi che:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} r(t) = \begin{cases} \lim_{t \rightarrow t_0} (\cos(t) + \pi) = 1 + \pi \\ \lim_{t \rightarrow t_0} (e^t - 1) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow t_0} (\sin(t^2)) = 0 \end{cases}$$

Se hai dubbi sui risultati ottenuti dai limiti, ripassati la teoria di analisi 1 perché sarà fondamentale. Il vettore di risultati ottenuti sarà:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} r(t) = (1 + \pi, 0, 0)$$

Fortunatamente, abbiamo che definizioni e proprietà dei limiti di funzioni vettoriali sono analoghe alle loro controparti unidimensionali; infatti:

- Vale il teorema di unicità del limite.
- Vale il teorema sul limite della somma o del prodotto per una costante.
- La definizione di funzione continua in un punto o insieme è la medesima. Diciamo infatti che $r : I \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^n$ è continua in t_0 se vale che:

$$\lim_{t \rightarrow t_0} r(t) = r(t_0)$$

Generalmente, una funzione a valori vettoriali è continua se e solo se lo sono tutte le sue componenti.

Se vale il limite, sarà possibile utilizzarlo per dare la definizione di **derivata per le funzioni a valori vettoriali**, non molto dissimile da quella vista in termini unidimensionali.

Definizione 10. Derivata di funzioni a valori vettoriali

Sia r una funzione tale che $r : I \rightarrow \mathbb{R}^m$, con $t_0 \in I$. Diciamo che r è derivabile se esiste finito il limite di quanto segue:

$$\begin{aligned} r'(t) &= \lim_{t \rightarrow t_0} \frac{r(t_0 + h) - r(t_0)}{h} \\ &= \left(\lim_{h \rightarrow 0} \frac{r_1(t_0 + h) - r_1(t_0)}{h}, \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r_2(t_0 + h) - r_2(t_0)}{h}, \dots, \lim_{h \rightarrow 0} \frac{r_m(t_0 + h) - r_m(t_0)}{h} \right) \\ &= r'_1(t_0), r'_2(t_0), \dots, r'_m(t_0) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Noterai che ogni scrittura è conseguenza diretta della precedente. Inoltre, se r è derivabile in tutto lo spazio I e la sua derivata è ivi continua, diremo che la funzione è di classe $C^1(I)$ e lo annotiamo come $r \in C^1(I)$. Tale concetto è estendibile a ordini successivi se la derivata continua ad essere continua.

Ne esce naturalmente che gli integrali seguano una stessa dinamica.

Definizione 11. Integrale di funzioni a valori vettoriali

Sia r una funzione tale che $r : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m$, come prima. L'integrazione segue la relazione:

$$\int_a^b r(t)dt = \left(\int_a^b r_1(t)dt, \int_a^b r_2(t)dt, \dots, \int_a^b r_m(t)dt \right)$$

E diciamo che r è integrabile nell'intervallo $[a, b]$ se e solo se tutte le sue componenti sono integrabili. Valgono inoltre il **teorema fondamentale del calcolo integrale**, con la funzione di classe $C^1([a, b])$:

$$\int_a^b r'(t)dt = r(b) - r(a)$$

E se r è integrabile abbiamo che vale:

$$\int_a^b r(t)dt \leq \int_a^b |r(t)|dt$$

2.1.2 Curve regolari e lunghezza di un arco di curva

Possiamo iniziare il discorso facendo appello alla fisica. Se immaginiamo un punto materiale che si muove su uno spazio tridimensionale, la sua dinamica sarà espressa da una funzione di forma: $r : [t_1, t_2] \rightarrow \mathbb{R}^3$ e le coordinate dal vettore $r = (x, y, z)$.

Dunque, dato il punto $t \in [t_1, t_2]$ dato in pasto alla funzione r , avremo che la funzione prenderà la forma generale di:

$$r(t) = x(t)i + y(t)j + z(t)k \equiv r(t) = (x(t) + y(t) + z(t))$$

Ovviamente il concetto vale anche per spazi bidimensionali, come n-dimensionali. Nel primo caso avremo una funzione $r : [t_1, t_2] \rightarrow \mathbb{R}^2$ con le coordinate date da $r = (x, y)$ e la funzione generale:

$$r(t) = x(t)i + y(t)j \equiv r(t) = (x(t) + y(t))$$

Possiamo ora introdurre il concetto di **arco di curva continua** γ . Rigorosamente, è la coppia costituita da due parti:

1. Una funzione continua del tipo $r : I \rightarrow \mathbb{R}^m$, detta **parametrizzazione della curva**.
2. Un insieme di punti di \mathbb{R}^m costituente l'immagine della funzione r , chiamato **sostegno della curva**.

Proprio grazie a questa divisione in componenti possiamo avere funzioni diverse con uno stesso sostegno. Inoltre, se esiste la derivata seconda, possiamo definire la **velocità scalare** con la formula:

$$v(t) = |r'(t)|$$

Un arco di curva continua può assumere le seguenti caratteristiche:

- L'arco è **chiuso** se nell'intervallo di definizione $I = [a, b]$ il punto iniziale della curva coincide con quello finale, quindi $r(a) = r(b)$.
- L'arco è **semplice** se la curva non ripassa mai dallo stesso punto, quindi $t_1 \neq t_2 \implies r(t_1) \neq r(t_2)$.
- L'arco è **piano** se ha un piano che contiene il suo sostegno.

Altri tipi di archi di curve sono:

- **Arco di curva regolare**

Sia la funzione $r : I \rightarrow \mathbb{R}^m$ tale che $\forall t \in I. (r \in C^1(I) \wedge r'(t) \neq 0)$. Abbiamo quindi che il vettore derivato esiste in ogni punto, varia con la continuità e non si annulla mai. Non a caso per queste curve è definito bene il **versore tangente** $T = \frac{r'(t)}{|r'(t)|}$, il quale dipende con continuità dalla variabile t .

- **Arco di curva regolare a tratti**

Sia $I \subset \mathbb{R}$; definiamo tale un arco di curva $r : I \rightarrow \mathbb{R}^m$ tale che sia continuo in \mathbb{R} e l'intervallo possa essere diviso in un numero finito di sub-intervalli, su tutti i quali la r sarà un arco di curva regolare.

L'espressione delle curve può infine avvenire nei seguenti tre modi:

- Forma parametrica.
- Forma di grafico: $y = g(x)$.
- Forma implicita: $f(x, y) = 0$.

Adesso buttiamo dentro un concetto che ha bisogno di qualche premessa; la **lunghezza di un arco di curva**. Consideriamo la parametrizzazione di un arco di curva continua γ ed una partizione $P = \{a = t_0, t_1, \dots, t_{n-1}, t_n = b\}$ dell'intervallo $I = [a, b]$, con $(t_0 < t_1 < \dots < t_n)$.

Alla partizione P è associata la poligonale¹ inscritta in γ creata dagli n -segmenti di estremi $r(t_{j-1})$ e $r(t_j)$, con $j = 1, \dots, n$.

Sia ora $l(P)$ la lunghezza della poligonale data dalla formula:

$$l(P) = \sum_{j=1}^n |r(t_j) - r(t_{j-1})|$$

L'idea di fondo è che questa lunghezza approssimi per difetto quella di γ , consentendoci di ottenerla variando in ogni istanza possibile P e prendendo l'estremo superiore di $l(P)$. In tal merito, abbiamo le definizioni:

Definizione 12. Arco di curva rettificabile

*Diciamo che un arco di curva γ è **rettificabile** se vale:*

$$\sup l(P) = l(\gamma) < +\infty$$

L'estremo superiore \sup è calcolato al variare di ogni partizione possibile dell'intervallo e $l(\gamma)$ è la lunghezza dell'arco di curva.

Grazie al concetto di velocità scalare introdotto prima, è possibile semplificarci ulteriormente la vita per quanto riguarda rettificazioni con il seguente teorema:

Teorema 4. Rettificazione di arco di curva regolare

Sia $r : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m$ parametrizzazione di un arco di curva γ regolare. Allora questo è rettificabile e si scrive generalmente:

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

Mentre per rispettivamente uno spazio bidimensionale e tridimensionale valgono le seguenti scritture:

$$l(\gamma) = \int_a^b \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2} dt \wedge l(\gamma) = \int_a^b \sqrt{x'(t)^2 + y'(t)^2 + z'(t)^2} dt$$

¹Una curva non tonda. Un angolo sotto questa visione potrebbe essere una poligonale.

È inoltre possibile unire le curve; infatti, dati due archi γ_1, γ_2 , con rispettive equazioni:

- $r_1 = r_1(t)$ per $t \in [a, b]$
- $r_2 = r_2(t)$ per $t \in [b, c]$

E con condizione di raccordo $r_1(b) = r_2(b)$, abbiamo che la relazione $\gamma = \gamma_1 \cup \gamma_2$ è data da:

$$r(t) = \begin{cases} r_1 = r_1(t), t \in [a, b] \\ r_2 = r_2(t), t \in [b, c] \end{cases}$$

In questi casi, abbiamo che se una proprietà vale per entrambi gli archi, si estenderà anche alla loro unione. Parlando di somma, una classe particolare di curve piane è data da altre curve che si ottengono come grafici di funzioni di una variabile, ovvero nella forma $y = f(x)$, per $x \in [a, b]$. Possiamo quindi scriverle nella seguente forma parametrica:

$$\begin{cases} x = t \\ y = f(t) \end{cases}, \text{ per } t \in [a, b]$$

E diremo che la curva è espressa come grafico della funzione f . Detiene le seguenti proprietà:

- La curva è continua se e solo se f è continua nell'intervallo $[a, b]$.
- La curva è regolare se e solo se f è derivabile e ha continuità nell'intervallo $[a, b]$.
- La curva è regolare a tratti se e solo se f è continua nell'intervallo $[a, b]$ e a tratti derivabile con continuità nello stesso intervallo.
- La curva non è mai chiusa ed è sempre semplice.

Otteniamo **lunghezza del grafico** con il seguente integrale:

$$l(\gamma) = \int_a^b \sqrt{1 + f'(t)^2} dt$$

Un altro magheggio molto utile che possiamo recuperare dall'algebra lineare è il **passaggio alla forma polare**. Abbiamo quindi:

$$\rho = f(\theta), \text{ per } \theta \in [\theta_1, \theta_2] \implies \begin{cases} x = f(\theta)\cos(\theta) \\ y = f(\theta)\sin(\theta) \end{cases}$$

Otteniamo la derivata da una semplice chain rule e da essa la norma:

$$\begin{aligned} r'(\theta) &= f'(\theta)\cos(\theta) - f(\theta)\sin(\theta), \\ f'(\theta)\sin(\theta) + f(\theta)\cos(\theta) &\implies |r'(\theta)| = \sqrt{f'(\theta)^2 + f(\theta)^2} \end{aligned}$$

Le curve cambiate in coordinate polari detengono le seguenti proprietà:

- La curva è continua se e solo se f è continua in $[\theta_1, \theta_2]$.
- La curva è regolare se e solo se f è derivabile con continuità in $[\theta_1, \theta_2]$ e le funzioni f, f' non si annullano contemporaneamente.
- La curva è chiusa se e solo se, come visto nella definizione, $f(\theta_1) = f(\theta_2)$ e $\theta_2 - \theta_1 = 2k\pi$.

Ed il calcolo della lunghezza avviene con il seguente integrale:

$$l(\gamma) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sqrt{f(\theta)^2 + f'(\theta)^2} d\theta$$

Infine, siccome è possibile trovare un estremo superiore infinito, esisteranno di conseguenza anche curve dalla lunghezza infinita, le quali risulterà impossibile rettificare.

2.1.3 Cambiamenti di parametrizzazione, parametro arco, integrali di prima specie

La lunghezza dell'arco di curva percorsa da un punto mobile dipende solamente dal sostegno della curva. In questa sezione ci occuperemo di formalizzare quanto appena detto.

Sia infatti un arco di curva regolare $r = r(t)$, con $t \in [a, b]$. **cambiare parametrizzazione** significa introdurre una funzione derivabile ed invertibile $\phi(u) = t$, con $\phi : [c, d] \rightarrow [a, b]$, tale che la nuova curva $r = r(\phi)$, con $u \in [c, d]$ abbia lo stesso sostegno. Ci possiamo trovare davanti due casi distinti:

- Se la curva è **crescente**, le due parametrizzazioni $r(t), r(\phi)$ si dicono **equivalenti**.
- Se la curva è **decrescente**, le due si diranno **cambio di orientazione**.

Il senso di questo procedimento è la semplificazione della funzione in una con termini più semplici, non dissimile dal cambio di base visto in algebra lineare. Un primo vantaggio che si può notare è come la lunghezza di un arco di curva regolare è **invariante** per le parametrizzazioni equivalenti e cambi di orientazione.

Calcolando e poi invertendo la funzione della lunghezza dell'arco di curva, è possibile riparametrizzare la curva in funzione del **parametro arco**, ottenendo due vantaggi:

- Il parametro arco s è esattamente lo spazio percorso dal punto quando si passa da 0 ad esso.
- Se $r = r(s)$ è curva parametrizzata con s , il vettore derivato $r'(s)$ coincide con il versore tangente.

Introduciamo un ultimo argomento la cui vera utilità si vedrà nel corso di fisica:

Definizione 13. Integrali di prima specie

Sia $r : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^m$ un arco di curva regolare di sostegno γ e sia f una funzione a valori reali definita nell'intervallo $A \subset \mathbb{R}^m$ contenente il sostegno. Chiamiamo **integrale di prima specie** di f lungo γ la seguente scrittura:

$$\int_{\gamma} f dx \equiv \int_a^b f(r(t)) |r'(t)| dt$$

Valgono anche qui i risultati di invarianza rispetto a parametrizzazioni equivalenti e cambi di orientazione.

2.2 Calcolo infinitesimale per funzioni reali di più variabili

La sezione ha come scopo lo studio delle **funzioni reali a più variabili**, che si presentano nella forma:

$$f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$$

In questo caso è di nostro interesse poter disegnare un grafico, con tutto ciò che ne consegue. Ciò è espresso nella forma dell'insieme:

$$\{(c, f(x)) : x \in A\} \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$$

2.2. CALCOLO INFINITESIMALE PER FUNZIONI REALI DI PIÙ VARIABILI 33

Anche se nella maggior parte dei casi, per la rappresentazione dei grafici useremo gli **insiemi di livello**, definiti al variare di $c \in \mathbb{R}$:

- **Forma generale:** $\{x \in \mathbb{R}^n : f(x) = c\}$
- **Forma bidimensionale** (linea di livello): $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : (x, y) \in A\}$
- **Forma tridimensionale** (superficie di livello): $\{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : (x, y, z) \in A\}$

Il primo argomento di nostro interesse è il **dominio** delle funzioni; si tratta del sottoinsieme più grande di \mathbb{R}^n nel quale ha senso scrivere la funzione. Per definirlo si possono seguire le regole viste in analisi 1.

Esempio 11. *Determinazione del dominio*

INSERISCI ESEMPIO, è scritto sul quaderno, es 3.1.5

2.2.1 Limiti e continuità

Lavorando con più variabili, è inevitabile trovare incongruenze con i limiti unidimensionali; ragion per cui è necessario porre una nuova definizione di limite e continuità.

Anzitutto, prendiamo una successione $\{x_k\}_k^\infty = 1$ di punti \mathbb{R}^n ed un punto $x_0 \in \mathbb{R}^n$. Vale la seguente relazione:

$$x_k \rightarrow x_0 \text{ per } k \rightarrow \infty \text{ se vale } \|x_k - x_0\| \rightarrow 0 \text{ per } k \rightarrow \infty$$

Per renderla più comprensibile, la norma per un grafico piano sarebbe data dalla formula:

$$\|x_k - x_0\| \equiv \sqrt{(x_k - x_0)^2 + (y_k - y_0)^2} = 0$$

In analisi 1 abbiamo utilizzato punti fermi per ottenere informazioni dai grafici; adesso useremo il concetto di **intorno sferico**:

Definizione 14. *Intorno sferico*

Chiamiamo intorno sferico di centro $x_0 \in \mathbb{R}^n$ e raggio $r > 0$ l'insieme dato da:

$$U_r(x_0) = \{x \in \mathbb{R}^n : \|x - x_0\| < r\}$$

Concetto che ci consente di introdurre la nozione di limite adattata per il nostro caso di studi:

Definizione 15. Definizione successionale di limite

Siano $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ definita almeno in un intorno sferico $x_0 \in \mathbb{R}^n$ e il valore $L \in \mathbb{R}^*$, dove $\mathbb{R}^* = \mathbb{R} \cup \{+\infty\}$. Allora esiste:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = L$$

Se e solo se per ogni successione x_k di punti tutti diversi tali che ognuno tenda a x_0 per k tendente a infinito. In tal caso avremo anche che:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} f(x_k) = L$$

In particolare, definiamo ora la continuità:

Definizione 16. Continuità di una funzione

Sia una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. La diciamo continua nell'intorno sferico x_0 se vale:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

Di conseguenza, quando una funzione è continua in un intorno sferico, è possibile calcolarne il limite per x che tende a x_0 semplicemente valutando $f(x_0)$, ed il ricorso alla definizione per lo svolgimento degli esercizi avviene solamente per le **forme di indeterminazione**.

2.2.2 Analisi delle forme di indeterminazione

Consideriamo la scrittura del limite di funzione f appena vista. Se la distanza fra x, x_0 tende al valore 0, indipendentemente dalla direzione, avremo che la funzione si avvicinerà al valore L **indefinitamente**. Da qui possiamo distinguere due casi di studio, ognuno dei quali parte da un approccio a sensazioni:

1. **Il limite esiste**; Per valutare l'esistenza di un limite si utilizza il metodo della **maggiorazione**. Lo scopo finale è "schiacciare" la funzione in tal modo che il valore a cui tenda sia 0.
2. **Il limite non esiste**; Esistono vari approcci per assicurarsi che un limite non esista ed è consigliato usarne vari per avere una conferma più rigorosa. Nei casi più semplici, tuttavia, è sufficiente determinare due curve passanti per x_0 lungo le quali la funzione tende a due termini diversi.

In parole povere, bisogna calcolare due limiti della funzione che tendono a $(x, 0), (0, y)$. Se i due limiti ritornano valori discordi, il limite di funzione non esiste.

Esempio 12. *Dimostrazione di esistenza del limite*

Esempio 13. *Dimostrazione di non esistenza del limite*

Chapter 3

Calcolo Differenziale

3.1 Calcolo differenziale per funzioni reali di più variabili

Nella precedente sezione è stato introdotto il concetto di intorno sferico di centro e raggio; ebbene, c'è un tipo per tutti i gusti.

Di base, sia l'intervallo $E \subseteq \mathbb{R}^n$. Un punto $x_0 \in \mathbb{R}^n$ si può dire:

- **Interno ad E** , se $\exists U_r(x_0) \subseteq E$
- **Esterno ad E** , se $\exists U_r(x_0) \subseteq \mathbb{R}^n/E$
- **Di frontiera per E** , se $\forall U_r(x_0) \implies (U_r(x_0) \cap E \neq \emptyset) \wedge (U_r(x_0) \cap \mathbb{R}^n/E \neq \emptyset)$

Diremo poi che l'insieme dei punti interni all'intervallo è la **parte interna di E** , per quelli esterni è il **bordo di E** , mentre l'unione dell'intervallo con il suo bordo è la **chiusura di E** .

Inoltre un insieme si dice **aperto** quando ogni suo punto è ad esso interno, mentre chiamiamo **chiuso** un insieme il cui complementare è aperto. Le operazioni fra insiemi effettuate con insiemi dello stesso tipo, non lo modificheranno. Infine, data una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ continua nel suo insieme di definizione (in questo caso \mathbb{R}^n) abbiamo che questi sono gli insiemi aperti:

$$\{x \in \mathbb{R}^n : f(x) > 0\}, \{x \in \mathbb{R}^n : f(x) < 0\}, \{x \in \mathbb{R}^n : f(x) \neq 0\}$$

E questi i chiusi:

$$\{x \in \mathbb{R}^n : f(x) \geq 0\}, \{x \in \mathbb{R}^n : f(x) \leq 0\}, \{x \in \mathbb{R}^n : f(x) = 0\}$$

Infine, se la funzione presa in esame è continua, avremo che gli insiemi di livello di una funzione a più variabili $f(x, y)$ saranno del tipo $f(x, y) = c$ e saranno, secondo le forme appena viste, chiusi.

3.1.1 Derivate parziali, derivabilità, piano tangente

In analisi 1 è stato definito il concetto di derivata come il limite del rapporto incrementale, il quale risulta essere allo stesso tempo anche il coefficiente angolare della retta tangente alla funzione che si sta esaminando.

Lavorare in più dimensioni comporta la necessità di espandere questo concetto; anzitutto è necessario introdurre alcuni concetti:

Definizione 17. Derivate parziali

Sia una funzione $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, è possibile calcolare le derivate in funzione delle rispettive variabili in un punto (x_0, y_0) . Chiamiamo infatti:

- **Derivata parziale rispetto ad x :**

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0)}{h}$$

- **Derivata parziale rispetto ad y :**

$$\frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0) = \lim_{k \rightarrow 0} \frac{f(x_0, y_0 + k) - f(x_0, y_0)}{k}$$

Definizione 18. Gradiente

Chiamiamo gradiente di f nel punto (x_0, y_0) il vettore che ha come elementi le derivate parziali della funzione presa in esame e si denota come:

$$\nabla f(x_0, y_0)$$

Tengo a portare all'attenzione il fatto che per calcolare le derivate parziali, le variabili $x_0 + h$ e $y_0 + k$ devono necessariamente essere all'interno del dominio di funzione; ciò risulta vero se il dominio è aperto.

Possiamo quindi dire che una funzione è derivabile in un punto del suo dominio e là esistono tutte le derivate parziali.

Esempio 14. Calcolo delle derivate parziali di una funzione

Lo scopo di calcolare la derivata di funzione è l'approssimazione della stessa localmente; abbiamo visto che in una dimensione, lavorando con curve piane, la derivata sarà il coefficiente angolare della retta ad esse tangente. Per pattern recognition, è chiaro che se si lavora in più variabili avremo una superficie la cui derivata sarà un **piano tangente**.

Nello specifico, immaginiamoci di avere una funzione che dia una **superficie** $z = f(x, y)$ e di sezionarla con un **piano verticale** $y = y_0$. Otterremo una curva data da $z = f(x, y_0)$, dalla quale troveremo la retta tangente r_1 . Ripetiamo lo stesso processo con un **piano orizzontale** $x = x_0$ per ottenere la tangente r_2 . Avremo quindi che le due equazioni delle tangenti sono date da:

3.2. CALCOLO DIFFERENZIALE PER FUNZIONI DI PIÙ VARIABILI A VALORI VETTORIALI

$$\begin{aligned} r_1 &= \begin{cases} z = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)(x - x_0) \\ y = y_0 \end{cases} \\ r_2 &= \begin{cases} z = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)(y - y_0) \\ x = x_0 \end{cases} \end{aligned}$$

E quindi, in definitiva, il **piano tangente** sarà della seguente forma:

$$z = f(x_0, y_0) + \frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0)(x - x_0) + \frac{\partial f}{\partial y}(x_0, y_0)(y - y_0)$$

Tutto molto bello, tuttavia la derivabilità non ha lo stesso rigore che aveva in analisi 1; infatti non implica né continuità, né l'esistenza del piano tangente. Non è quindi in grado di approssimare sempre la funzione in esame localmente; quindi necessitiamo di un concetto molto più forte: la **differenziabilità**.

3.1.2 Differenziabilità, derivate direzionali

3.1.3 Calcolo delle derivate e derivate di ordine superiore

3.1.4 Equazioni alle derivate parziali

3.1.5 Differenziale secondo, matrice hessiana, formula di Taylor del secondo ordine

3.2 Calcolo differenziale per funzioni di più variabili a valori vettoriali

Chapter 4

Ottimizzazione - Estremi Liberi

4.1 Generalità

Chapter 5

Calcolo integrale

5.1 Pisellp4

Chapter 6

Campi Vettoriali

6.1 Pisellp5

Chapter 7

Serie di Fourier

7.1 PisellpFinale