

Sistemi Dinamici
Corso dei proff. Claudio Bonanno & Roberto Castorrini

Francesco Sorce

Università di Pisa
Dipartimento di Matematica
A.A. 2023/24

Indice

I Sistemi continui	6
1 Insiemi invarianti, Orbite e Omega-limiti	7
1.1 Orbite, punti fissi e periodici	7
1.2 Insiemi invarianti	8
1.3 Alpha e Omega limiti	9
2 Stabilità e funzioni di Lyapunov	11
2.1 Stabilità per Lyapunov	11
2.2 Funzioni di Lyapunov	12
2.2.1 Primo approccio per cercare funzioni di Lyapunov	14
3 Linearizzazione	15
3.1 Idea della linearizzazione	15
3.2 Pozzi e Sorgenti	18
3.3 Classificazione dei punti stabili lineari sul piano	19
4 Integrali Primi e Sistemi Hamiltoniani	25
4.1 Sistemi Hamiltoniani	25
4.1.1 Sistemi meccanici con un grado di libertà	27
5 Primi metodi di studio globale	29
5.1 Metodo delle isocline nel piano	29
5.2 Ricerca di simmetrie	30
6 Varietà stabili/instabili	31
6.1 Varietà stabili e instabili locali	31
6.2 Varietà stabili e instabili	35
7 Orbite periodiche	37
7.1 Criteri di non esistenza differenziali	37
7.2 Teoria dell'indice di Poincaré nel piano	38
7.3 Criteri di esistenza di orbite periodiche	40
7.3.1 Teorema di Poincaré-Bendixon	40
8 Esempi di sistemi dinamici continui	44
8.1 Alcuni sistemi meccanici	44
8.1.1 L'oscillatore armonico	44
8.1.2 Pendolo semplice	44
8.2 Dinamica di Lotka-Volterra	45
8.3 Sistema di Lorenz	49

II Sistemi discreti	52
9 Basi di Dinamica Topologica	53
9.1 Punti periodici e coniugio topologico	53
10 Stabilità locale dei punti fissi	55
10.1 Punti iperbolicci	55
10.2 Criteri per punti non iperbolicci	56
11 Orbite periodiche	59
11.1 Partizioni e T -grafi	59
11.2 Teorema di Sharkovsky	61
11.2.1 Ordinamento e teorema	61
12 Dinamica topologica Caotica	65
12.1 Caos di Devaney	65
12.2 Entropia topologica	65
12.3 Ferro di cavallo	66
13 Sistemi discreti principali	68
13.1 Dinamica simbolica	68
13.2 Mappe di Poincaré	69
13.2.1 Sistemi continui caotici	71
13.3 Endomorfismi del cerchio e mappa di Bernoulli	71
13.4 Mappa Logistica e Tenda	73
13.4.1 Mappa logistica	73
13.4.2 Mappa Tenda	75
13.5 Miscellanea	78
A Riconoscimenti e risorse	79

Introduzione

Definizione 0.1 (Sistema dinamico).

Un **sistema dinamico** è una terna (X, G, S) , dove X è un insieme, G un (semi)gruppo e $S = G \curvearrowright X$ una azione.

L'insieme X è detto **spazio delle fasi**.

Osservazione 0.2.

In realtà vorremmo che l'azione abbia una regolarità compatibile con la struttura dell'insieme in esame.

Sistemi continui

Definizione 0.3 (Equazione differenziale).

Un **sistema di equazioni differenziali** (in forma esplicita) è un'equazione della forma

$$\dot{x} = F(x), \quad x \in \mathbb{R}^d, \quad F \in C^1(\mathbb{R}^d).$$

Un **problema di Cauchy** associato all'equazione differenziale sopra è dato da un sistema del tipo

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}x(t) = F(x(t)) \\ x(0) = x_0 \end{cases}$$

Per il teorema di Cauchy-Lipschitz è ben definito il **flusso** $\phi : \mathbb{R}^d \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^d$ associato all'equazione differenziale definito come la funzione che rispetta

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\phi_t(x_0) = F(\phi_t(x_0)) \\ \phi_0(x_0) = x_0 \end{cases}.$$

Osservazione 0.4.

Osserviamo che $\phi_0 : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$ è la mappa identità e che $\phi_\cdot(x)$ è un omomorfismo per ogni x , cioè

$$\phi_t(\phi_s(x)) = \phi_{s+t}(x).$$

Definizione 0.5 (Sistema dinamico a tempo continuo).

Una terna $(\mathbb{R}^d, \mathbb{R}, \phi_t(\cdot))$ è un **sistema dinamico (a tempo) continuo** se $\phi_t(\cdot)$ è il flusso di un sistema di ODE della forma $\dot{x} = F(x)$ con $F(x)$ campo di vettori, $F \in C^k$ con $k \geq 1$.

Esempio 0.6 (Equazioni differenziali su \mathbb{R}).

Consideriamo l'equazione

$$\dot{x} = ax.$$

Il nostro approccio standard è imporre una condizione di Cauchy $x(0) = x_0$ e troviamo la soluzione

$$x(t) = x_0 e^{at}.$$

Ponendo $G = \mathbb{R}$, $X = \mathbb{R}$ e $S = G \curvearrowright X$ dove $S(t, x_0) = \phi_t(x_0)$ possiamo interpretare l'equazione sopra come un sistema dinamico.

Se consideriamo ora un'equazione del tipo

$$\dot{x} = a(x + x^9)$$

diventa difficile risolvere l'equazione. Possiamo fare studi qualitativi. Negli studi qualitativi per $X = \mathbb{R}$ sono utili le seguenti considerazioni

- Rintracciare punti fissi
- Studiare il segno della derivata
- Soluzioni diverse non si incrociano per unicità locale
- Teorema di approssimazione lineare.

Di solito ci interesseranno equazioni in \mathbb{R}^2 o \mathbb{R}^3 . Seguono alcuni modi per trasformare alcuni tipi di equazioni differenziali nella forma $\dot{x} = F(x)$ ¹.

Esempio 0.7 (Ordine superiore).

Consideriamo l'equazione

$$\ddot{x} = -kx, \quad k > 0.$$

Ponendo $y = \dot{x}$ troviamo

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -kx \end{cases} \iff \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y \\ -kx \end{pmatrix}.$$

Esempio 0.8 (Sistema non autonomo).

Consideriamo l'equazione

$$\dot{x} = f(x) + g(t)$$

Possiamo allargare lo spazio delle fasi come segue

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(t) \\ \dot{t} = 1 \end{cases}.$$

Sistemi discreti

Definiamo ora sistemi dinamici discreti

Definizione 0.9 (Sistema dinamico a tempo discreto).

Un **sistema dinamico (a tempo) discreto** è una terna (X, \mathbb{N}, T) dove $X \in \{\mathbb{R}, [a, b], S^1\}$ e $T : X \rightarrow X$ continua. Il sistema dinamico è dato da (X, \mathbb{N}, S) dove $S(n, x) = T^n(x)$.

Osservazione 0.10.

Se T è invertibile possiamo estendere un sistema dinamico discreto sostituendo \mathbb{N} con \mathbb{Z} e ponendo (per $n \in \mathbb{N}^+$) $S(-n, x) = (T^{-1})^n(x)$.

¹Non metterò mai più le barre se posso.

Esempio 0.11 (Successione per ricorrenza).

Una successione per ricorrenza è un sistema dinamico discreto

$$\begin{cases} x_n = T(x_{n-1}) \\ x_0 = a \end{cases}$$

Esempio 0.12 (Mappa di Bernoulli).

Consideriamo

$$S^1 = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}, \quad T : \begin{array}{ccc} S^1 & \longrightarrow & S^1 \\ z & \mapsto & z^2 \end{array}$$

Osserviamo che l'unico punto fisso è 0, ma reiterando da un punto qualsiasi non c'è modo che la successione vi tendi. Inoltre la distanza tra punti si raddoppia ad ogni iterata (a meno del modulo). Questo è uno dei primi esempi di sistemi caotici.

Parte I

Sistemi continui

Capitolo 1

Insiemi invarianti, Orbite e Omega-limiti

1.1 Orbite, punti fissi e periodici

Definizione 1.1 (Orbita).

Definiamo l'**orbita positiva** del punto x determinata da un'equazione di flusso ϕ come

$$\mathcal{O}^+(x) = \bigcup_{t \geq 0} \phi_t(x).$$

In modo simile definiamo l'**orbita negativa** e l'**orbita**.

La **traiettoria** di x è il grafico $t \mapsto \phi_t(x)$ contenuto in $\mathbb{R} \times \mathbb{R}^d$ ¹.

Definizione 1.2 (Punti fissi).

Un **punto fisso** $x \in \mathbb{R}^d$ è un punto tale che $F(x) = 0$.

Osservazione 1.3.

L'orbita di un punto fisso è composta da un singoletto.

Definizione 1.4 (Punti periodici).

Un punto $x \in \mathbb{R}^d$ è **periodico** se esiste $T > 0$ tale che

$$\phi_{T+s}(x) = \phi_s(x) \quad \forall s \in \mathbb{R}$$

e $\phi_s(x) \neq x$ per ogni $s \in (0, T)$.

T è detto **periodo minimo** di x .

Osservazione 1.5.

L'orbita di un punto periodico è data da $\mathcal{O}(x) = \{\phi_s(x) \mid s \in [0, T)\}$.

Osservazione 1.6 (Simulazione).

Di solito per tracciare orbite usiamo il computer ma per natura di tali simulazioni, i dati iniziali (e l'integrazione stessa) non può essere assolutamente precisa. È quindi quasi impossibile disegnare algoritmamente alcune orbite essenziali per comprendere il funzionamento del sistema (per esempio orbite periodiche, omo- ed eterocline e orbite limite tra due comportamenti).

¹questa è la terminologia italiana. In inglese "trajectory" corrisponde alla nostra orbita, non alla traiettoria.

1.2 Insiemi invarianti

Definizione 1.7 (Insiemi invarianti).

Un insieme $A \subseteq \mathbb{R}^d$ si dice **positivamente invarianti** se per ogni $x \in A$, $\phi_t(x) \in A$ per ogni $t \geq 0$. In modo simile definiamo insiemi **negativamente invarianti** e **invarianti**.

Osservazione 1.8 (Le orbite sono invarianti).

Le orbite positive sono positivamente invarianti, le orbite negative sono negativamente invarianti e le orbite sono invarianti.

Dimostrazione.

Segue dal fatto che $\phi_{s+t}(x) = \phi_s(\phi_t(x))$. □

Definizione 1.9 (Integrale primo).

Una funzione $I : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$, $I \in C^1(\mathbb{R}^d)$ è un integrale primo per $\dot{x} = F(x)$ se per ogni $x \in \mathbb{R}^d$

$$\dot{I}(x) \doteq \langle \nabla I(x), F(x) \rangle = \frac{d}{dt} I(\phi_t(x)) \Big|_{t=0} = 0.$$

Proposizione 1.10 (Costruzione di insiemi invarianti da curve di livello).

Sia $c \in \mathbb{R}$ e $I : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$, $I \in C^1$ tale che $\nabla I|_{\{I=c\}} \not\equiv 0$ e $\dot{I}|_{\{I=c\}} = 0$, allora $\{I = c\}$ è invarianti.

Dimostrazione.

Sia $x_0 \in I_c$. In particolare $\nabla I(x_0) \neq 0$. Senza perdita di generalità supponiamo che l'ultima entrata sia non nulla, cioè $\frac{\partial I}{\partial x_d}(x_0) \neq 0$. Per il teorema della funzione implicita esistono un intorno U di x_0 in \mathbb{R}^d e una funzione $h : \mathbb{R}^{d-1} \rightarrow \mathbb{R}$ della stessa regolarità di I tali che²

$$I_c \cap U = \{(\underline{x}, y) \in U \mid I(\underline{x}, y) = c\} = \{(\underline{x}, h(\underline{x})) \mid \underline{x} \in \pi_{\neq x_d}(U)\}.$$

A meno di restringere U , per il teorema sulla permanenza del segno supponiamo che $\frac{\partial I}{\partial x_d}|_U$ non si annulli mai.

Scriviamo $F = (\underline{f}, g)$ con $\underline{f} : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^{d-1}$ e $g : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$. Se $x_0 = (\underline{x}_0, y_0)$, consideriamo il problema di Cauchy

$$\begin{cases} \dot{\underline{x}} = \underline{f}(\underline{x}, h(\underline{x})) \\ \underline{x}(0) = \underline{x}_0 \end{cases}$$

e sia $\tilde{\psi}_t(\underline{x}_0)$ la sua soluzione in un intorno di \underline{x}_0 . Poniamo $\psi_t(x_0) = (\tilde{\psi}_t(\underline{x}_0), h(\tilde{\psi}_t(\underline{x}_0)))$ e verifichiamo che $\psi = \phi$. Chiaramente le condizioni iniziali coincidono, così come la derivata lungo le prime $d - 1$ entrate. Per concludere basta dunque verificare che

$$\frac{d}{dt} \left(h(\tilde{\psi}_t(\underline{x})) \right) = Dh(\tilde{\psi}_t(\underline{x})) \tilde{\psi}_t(\underline{x})' = g(\underline{x}, h(\underline{x})),$$

in quanto in tal caso avremo verificato che soluzioni che partono in $I_c \cap U$ restano in $I_c \cap U$ per tempi brevi.

Derivando $I(\psi_t(x_0)) = c$ troviamo

$$\nabla I(\psi_t(x_0)) \cdot \begin{pmatrix} \underline{f}(\underline{x}, h(\underline{x})) \\ Dh(\tilde{\psi}_t(\underline{x})) \tilde{\psi}_t(\underline{x})' \end{pmatrix} = 0$$

²La mappa $\pi_{\neq x_d}$ è la proiezione ovvia da \mathbb{R}^d a \mathbb{R}^{d-1} che elimina l'ultima coordinata.

e dalla condizione $\dot{I}(\psi_t(x_0)) = 0$ ricaviamo

$$\nabla I(\psi_t(x_0)) \cdot \left(\frac{f(\underline{x}, h(\underline{x}))}{g(\underline{x}, h(\underline{x}))} \right) = 0.$$

Confrontando queste due equazioni ricaviamo

$$\frac{\partial I}{\partial x_d}(\psi_t(x_0)) \left(\mathcal{D}h(\tilde{\psi}_t(\underline{x}))\tilde{\psi}_t(\underline{x})' - g(\underline{x}, h(\underline{x})) \right) = 0.$$

Poiché abbiamo supposto che $\frac{\partial I}{\partial x_d}|_U \neq 0$, da questa equazione ricaviamo l'uguaglianza cercata per un opportuno intorno di x_0 . \square

Corollario 1.11 (Invarianza degli insiemi di livello di integrali primi).

Se I è un integrale primo allora per ogni $c \in \mathbb{R}$ tale che $\nabla I|_{\{I=c\}} \neq 0$ l'insieme

$$I_c = \{I = c\}$$

è invariante.

Osservazione 1.12 (Intuizione geometrica).

Se $\nabla I(x) \neq 0$, la condizione $\dot{I}(x) = 0$ afferma che $\nabla I(x)$ e $F(x)$ sono perpendicolari. Per il teorema delle funzioni implicite, se $x \in I_c$ abbiamo che un vettore normale a I_c in x è ∇I , dunque se $F(x)$ vi è perpendicolare si ha che $F(x) \in T_x I_c$, in particolare l'orbita tende a procedere rimanendo nello spazio tangente, cioè resta contenuta in I_c .

1.3 Alpha e Omega limiti

Definizione 1.13 (Alpha e Omega limiti).

Dato $x \in \mathbb{R}^d$ chiamiamo **ω -limite** di x l'insieme

$$\omega(x) = \left\{ y \in \mathbb{R}^d \mid \exists \{t_n\} \nearrow +\infty \text{ t.c. } \lim_{k \rightarrow +\infty} \phi_{t_k}(x) = y \right\}.$$

Similmente definiamo l' **α -limite** considerando i limiti di successioni di tempi che vanno a $-\infty$.

Osservazione 1.14.

In realtà non è necessario chiedere successioni monotone. Per successioni generali che tendono a $\pm\infty$ basta passare a sottosuccessioni.

Esempio 1.15.

Seguono esempi di α e ω limiti semplici:

- Se x è un punto fisso $\alpha(x) = \omega(x) = \{x\}$
- Se x è periodico $\alpha(x) = \omega(x) = \mathcal{O}(x)$

Definizione 1.16 (Omo-/etero-clino).

Siano x_1 e x_2 punti fissi e supponiamo $\{x_1\} = \alpha(y)$, $\{x_2\} = \omega(y)$.

Se $x_1 = x_2 = x$ allora y è detto **omoclino** di x .

Se $x_1 \neq x_2$ allora y è detto **eteroclino**.

Proposizione 1.17 (Orbita limitata implica invarianza di ω -limite).

Se $x \in \mathbb{R}^d$ e $\mathcal{O}^+(x)$ è limitata allora $\omega(x)$ è non vuoto, compatto e invariante.

Dimostrazione.

Sia $\{\tau_j\} \rightarrow +\infty$ tale che $\tau_1 > 0$ e $\tau_{j+1} > \tau_j$. Verifichiamo in linea preliminare la seguente uguaglianza:

$$\omega(x) = \bigcap_{j \geq 1} \overline{\mathcal{O}^+(\phi_{\tau_j}(x))}.$$

\subseteq Segue dal fatto che chiuso implica chiuso per successioni: per ogni $t \geq 0$ fissato vale definitivamente in k

$$\begin{cases} y = \lim_k \phi_{t_k}(x) \\ \phi_{t_k}(x) \in \mathcal{O}^+(\phi_t(x)) \end{cases} \implies y \in \overline{\mathcal{O}^+(\phi_t(x))}$$

\supseteq Sia $y \in \bigcap_{j \geq 1} \overline{\mathcal{O}^+(\phi_{\tau_j}(x))}$. Per definizione di intersezione si ha che per ogni $j \geq 1$ abbiamo $y \in \overline{\mathcal{O}^+(\phi_{\tau_j}(x))}$. In particolare, per una caratterizzazione di chiusura in spazi metrici, esiste $t_j > 0$ tale che

$$d(\phi_{t_j+\tau_j}(x), y) = d(\phi_{t_j}(\phi_{\tau_j}(x)), y) \leq \frac{1}{j}.$$

Segue che $\lim_{j \rightarrow +\infty} d(\phi_{t_j+\tau_j}(x), y) = 0$, cioè $y \in \omega(x)$.

Verificata l'uguaglianza sopra, segue immediatamente che $\omega(x)$ è non vuoto e compatto (intersezione di compatti inscatolati non vuoti). Per mostrare l'invarianza mostriamo che $y \in \omega(x) \implies \phi_t(y) \in \omega(x)$ per ogni $t \in \mathbb{R}$.

Per definizione di ω -limite esiste una successione $t_k \rightarrow +\infty$ tale che $\phi_{t_k}(x) \rightarrow y$. La tesi segue dalla seguente catena di identità:

$$\phi_t(y) = \phi_t \left(\lim_{k \rightarrow +\infty} \phi_{t_k}(x) \right) \stackrel{\text{continuità in } t}{=} \lim_{k \rightarrow +\infty} \phi_{t+t_k}(x) \in \omega(x).$$

□

Capitolo 2

Stabilità e funzioni di Lyapunov

In questo capitolo e nel prossimo andiamo a studiare come si comportano i punti fissi¹. Raccolte queste informazioni sui punti stabili speriamo di poterle poi “incollare” per raggiungere un’idea sufficientemente accurata del comportamento dell’intero sistema.

2.1 Stabilità per Lyapunov

Definizione 2.1 (Punti stabili per Lyapunov).

Un punto $x \in \mathbb{R}^d$ si dice

- **stabile** (nel senso di Lyapunov) se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $\delta > 0$ tale che per ogni $y \in B_\delta(x)$ si ha che per ogni $t \geq 0$ abbiamo $\phi_t(y) \in B_\varepsilon(\phi_t(x))$.
- **asintoticamente stabile** (nel senso di Lyapunov) se è stabile (nel senso di Lyapunov) ed esiste un intorno U di x tale che per ogni $y \in U$

$$\lim_{t \rightarrow +\infty} d(\phi_t(x), \phi_t(y)) = 0.$$

- **instabile** (nel senso di Lyapunov) se non è stabile.

Osservazione 2.2 (Stabilità per punti fissi).

Se x è un punto fisso è stabile nel senso di Lyapunov se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste un $\delta > 0$ tale che $d(y, x) < \delta \implies d(\phi_t(y), x) < \varepsilon$ per ogni $t \geq 0$. Similmente è asintoticamente stabile nel senso di Lyapunov se è stabile ed esiste un intorno U tale che $\forall y \in U$ abbiamo $\lim_{t \rightarrow +\infty} \phi_t(y) = x$.

Definizione 2.3 (Stabilità orbitale).

Un insieme² $\Gamma \subseteq \mathbb{R}^d$ è **orbitalmente stabile** se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $\delta > 0$ tale che $d(y, \Gamma) < \delta \implies d(\phi_t(y), \Gamma) < \varepsilon$ per ogni $t \geq 0$.

Definizione 2.4 (Dominio di asintotica stabilità).

Se x_0 è un punto asintoticamente stabile definiamo il **dominio di asintotica stabilità** come

$$\{y \in \mathbb{R}^d \mid \omega(y) = \{x_0\}\}.$$

¹in questo studiamo la stabilità, nel prossimo cercheremo quando possibile di descrivere un comportamento più preciso

²preferibilmente positivamente invariante

Osservazione 2.5 (Convergenza non è sufficiente per asintotica stabilità).

Esistono punti che rispettano la condizione di convergenza nella definizione di asintotica stabilità che NON sono stabili (e quindi non vengono classificati come asintoticamente stabili).

Un punto di questo tipo è $(1, 0)$ nel sistema (espresso in coordinate polari)

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \rho(1 - \rho^2) \\ \dot{\theta} = 2 \sin^2(\frac{1}{2}\theta) \end{cases}$$



Figura 2.1: In un intorno di $(1, 0)$ ci sono sempre punti con $y > 0$ e questi “fanno un giro” prima di convergere.

2.2 Funzioni di Lyapunov

Definizione 2.6 (Funzione di Lyapunov).

Sia $x_0 \in \mathbb{R}^d$ punto fisso per $F \in C^1$ e $U(x_0)$ un suo intorno. Una funzione $V : U(x_0) \rightarrow \mathbb{R}$ si dice **funzione di Lyapunov per x_0** se $V \in C^1(U(x_0))$ e

- $V(x) > V(x_0)$ per ogni $x \in U(x_0) \setminus \{x_0\}$
- $\dot{V}(x) = \nabla V(x) \cdot F(x) \leq 0$ per ogni $x \in U(x_0)$.

Una funzione di Lyapunov è **stretta** se $\dot{V}(x) < 0$ per ogni $x \in U(x_0) \setminus \{x_0\}$.

Teorema 2.7 (Primo teorema di Lyapunov).

Sia $x_0 \in \mathbb{R}^d$ un punto fisso per $F \in C^1$ e $V : U(x_0) \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione di Lyapunov per x_0 . Allora x_0 è un punto stabile nel senso di Lyapunov.

Dimostrazione.

Fissiamo $\varepsilon > 0$ tale che $\overline{B_\varepsilon(x_0)} \subseteq U(x_0)$. Definiamo

$$m = \min_{\partial B_\varepsilon(x_0)} V, \quad S_m = \left\{ y \in \overline{B_\varepsilon(x_0)} \mid V(y) < m \right\}.$$

Osserviamo che $x_0 \in S_m$ e, poiché $S_m = V^{-1}((-\infty, m)) \cap B_\varepsilon(x_0)$, S_m è aperto, dunque esiste $\delta > 0$ tale che $B_\delta(x_0) \subseteq S_m$.

Sia ora $y \in B_\delta(x_0)$. Per definizione $V(y) < m$. Osserviamo che

$$\frac{d}{dt} V(\phi_t(y)) = \dot{V}(\phi_t(y)) \leq 0 \quad \forall t \geq 0 \text{ t.c. } \forall 0 \leq s \leq t \phi_s(y) \in U(x_0),$$

in particolare, per gli stessi valori di t , $\phi_t(y) < m$.

Per assurdo supponiamo che esista $\bar{t} > 0$ tale che $\phi_{\bar{t}}(y) \notin B_\varepsilon(x_0)$. Per continuità di $\phi_t(y)$ possiamo supporre $\phi_{\bar{t}}(y) \in \partial B_\varepsilon(x_0)$ e tale che per ogni $0 \leq s \leq t$ si ha $\phi_s(y) \in U(x_0)$. Si ha dunque $V(\phi_{\bar{t}}(y)) \geq m > V(\phi_t(y))$ per ogni $t \geq 0$ tale che $0 \leq s \leq t$ abbiamo $\phi_s(y) \in U(x_0)$, ma $\partial B_\varepsilon(x_0) \subset \overline{B}_\varepsilon(x_0) \subseteq U(x_0)$, da cui un assurdo. \square

Introduciamo ora un criterio che è spesso utile per mostrare l'asintotica stabilità:

Proposizione 2.8 (Criterio di La Salle).

Sia x_0 un punto fisso per $F \in C^1$ e V una funzione di Lyapunov per x_0 su $U(x_0)$. Se $y \in U(x_0)$ è tale che $\mathcal{O}^+(y)$ è limitata e contenuta in $U(x_0)$ allora $\omega(y)$ è un insieme non vuoto, compatto e invariante tale che $\omega(y) \subseteq \{\dot{V} = 0\}$.

Dimostrazione.

Se per y valgono le ipotesi, per il criterio di invarianza per ω -limiti (1.17) abbiamo che $\omega(y)$ è non vuoto, compatto e invariante.

Osserviamo ora che $t \mapsto V(\phi_t(y))$ è non crescente e monotona, dunque esiste $c = \lim_{t \rightarrow +\infty} V(\phi_t(y))$. Osserviamo ora che

$$\begin{aligned} z \in \omega(y) &\iff \exists t_k \nearrow +\infty \text{ t.c. } \phi_{t_k}(y) \rightarrow z \implies \\ &\implies V(z) = V\left(\lim_k \phi_{t_k}(y)\right) \stackrel{V \text{ cont.}}{=} \lim_k V(\phi_{t_k}(y)) = c. \end{aligned}$$

Si ha dunque che $\omega(y) \subseteq \{V = c\}$. Per l'invarianza di $\omega(y)$ si ha che $V \circ \phi(\cdot)|_{\omega(y)}$ è costante per ogni $z \in \omega(y)$. Questo significa che $\dot{V}|_{\omega(y)} = 0$, da cui $\omega(y) \subseteq \{\dot{V} = 0\}$. \square

Osservazione 2.9.

Nelle ipotesi della proposizione, x_0 è stabile e quindi esiste un y che rispetta le ipotesi.

Teorema 2.10 (Secondo teorema di Lyapunov).

Sia $x_0 \in \mathbb{R}^d$ un punto fisso per $F \in C^1$ e $V : U(x_0) \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione di Lyapunov stretta per x_0 , allora x_0 è asintoticamente stabile.

Dimostrazione.

Per il primo teorema (2.7) abbiamo che x_0 è stabile, quindi dobbiamo solo verificare la convergenza.

Scelto $\varepsilon > 0$ sia $\delta > 0$ tale che $y \in B_\delta(x_0)$ e $\phi_t(y) \in B_\varepsilon(x_0) \subseteq U(x_0)$. Allora per La Salle (2.8) $\omega(y) \subseteq \{\dot{V} = 0\} \cap U(x_0) = \{x_0\}$. \square

Osservazione 2.11.

Se $V : U(x_0) \rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione di Lyapunov stretta per x_0 allora

$$V_m = \{y \in U(x_0) \mid V(y) \leq m\}$$

è contenuto nel dominio di asintotica stabilità per ogni m tale che $V_m \subseteq U(x_0)$. In particolare vale per \tilde{V}_m dove

$$\tilde{V}_m = \max \{m \mid V_m \subseteq U(x_0)\}.$$

Osservazione 2.12.

Se x_0 è un punto fisso

- Funzione di Lyapunov $\implies x_0$ stabile
- Funzione di Lyapunov stretta $\implies x_0$ asintoticamente stabile
- Funzione di Lyapunov + unico insieme invariante di $\{\dot{V} = 0\}$ è il punto garantisco comunque asintotica stabilità (per il criterio di La Salle (2.8))
- Se $V : U(x_0) \rightarrow \mathbb{R}$, $V \in C^1(U(x_0))$ tale che $V(x) > V(x_0)$ per ogni $x \in U(x_0) \setminus \{x_0\}$ e $\dot{V}(x) > 0$ per ogni $x \in U(x_0) \setminus \{x_0\}$ allora x_0 è *instabile*.

2.2.1 Primo approccio per cercare funzioni di Lyapunov

Nella risoluzione di esercizi spesso si vuole trovare una funzione di Lyapunov. Se non ci sono migliori metodi a disposizione per lo studio del punto, una scelta che di solito funziona quando può almeno localmente (per $y_0 = (y_1, \dots, y_d)$ punto fisso in esame) è

$$V(x_1, \dots, x_d) = \sum_{i=1}^d a_i (x_i - y_i)^{2n_i},$$

cioè costruiamo un paraboloide sopra il punto fisso in esame. Gli insiemi di livello di questa funzione sono paraboloidi contenenti y_0 .

Capitolo 3

Linearizzazione

3.1 Idea della linearizzazione

Per capire cosa aspettarci in un intorno di un punto fisso x_0 proviamo a linearizzare:

$$\dot{x} = F(x) = \underbrace{F(x_0)}_{=0} + \mathcal{D}F(x_0)(x - x_0) + o(\|x - x_0\|).$$

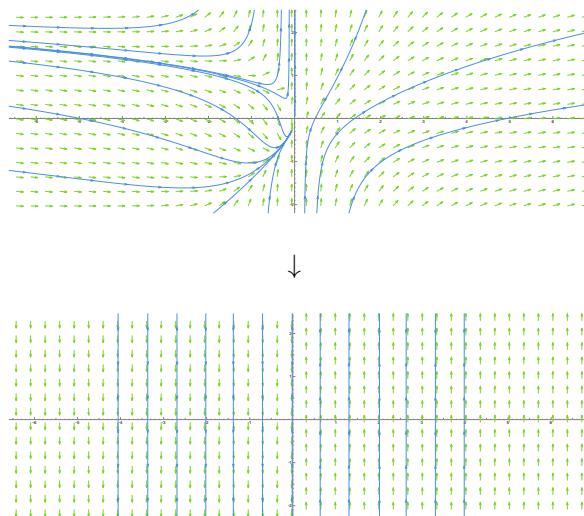
Se $\|x - x_0\|$ è abbastanza piccolo speriamo di trovare informazioni decentemente affidabili su $F(x)$ vicino a x_0 studiando $\mathcal{D}F(x_0)$.

Esempio 3.1 (Esempio dove linearizzazione fallisce).

Linearizziamo il sistema dato da $F(x, y) = (x^2, x + y^2)$.

$$\mathcal{D}F(0, 0) = \begin{pmatrix} 2x & 0 \\ 1 & 2y \end{pmatrix} \Big|_{x=y=0} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix},$$

quindi il sistema linearizzato ha equazione $G(x, y) = (0, x)$. Problema: il sistema originale si comporta in modo un po' diverso nell'origine (acquisto una famiglia di punti fissi, orbite si deformano ecc...).



Possiamo caratterizzare i punti stabili “adatti allo studio tramite linearizzazione” dando la seguente definizione

Definizione 3.2 (Punti fissi iperbolici).

Un punto fisso $x_0 \in \mathbb{R}^d$ per $F \in C^1$ si dice **iperbolico** se $\mathcal{D}F(x_0)$ non ha autovalori con parte reale nulla.

Questi sono i punti “buoni” perché vale il seguente teorema.

Teorema 3.3 (Hartman-Grobman).

Sia $x_0 \in \mathbb{R}^d$ un punto fisso iperbolico per $\dot{x} = F(x)$, $F \in C^1$ e sia ϕ_t il flusso di questo sistema.

Consideriamo ora il **sistema linearizzato in x_0** , ovvero il sistema dato da

$$\dot{y} = \mathcal{D}F(x_0)y, \quad y \in \mathbb{R}^d$$

e sia ψ_t il flusso di questo sistema.

Esistono allora U intorno di x_0 , V intorno di 0 e un omeomorfismo $h : U \rightarrow V$ tale che per ogni $x \in U$ si ha che per ogni t tale che $\phi_t(x) \in U$

$$h(\phi_t(x)) = \psi_t(h(x)).$$

Dimostrazione.

NON DATA DURANTE IL CORSO. □

Osservazione 3.4.

La condizione $\Re(\lambda) = 0$ è equivalente a $|e^\lambda| = 1$, cioè $e^\lambda = e^{i\theta}$. Intuitivamente questo ci dice che l'autospazio generalizzato corrispondente a λ e $\bar{\lambda}$ non è attratto verso il punto fisso ma non vi è neanche respinto nel caso lineare, dunque nel sistema originale la sorte dei punti è determinata da espressioni non lineari.

Osservazione 3.5.

Anche se F ha maggiore regolarità, in generale h non acquista regolarità.

Ricordiamo il seguente

Teorema 3.6 (Decomposizione in forma di Jordan reale).

Sia $A \in \mathcal{M}(d, \mathbb{R})$, allora esiste $P \in \mathcal{M}(d, \mathbb{R})$ tale che $\det P \neq 0$ e $\Lambda = P^{-1}AP$ è diagonale a blocchi.

Supponiamo che gli autovalori di A siano in una delle seguenti forme

- $\{\lambda_j\}_{j \in \{1, \dots, k\}}$ con $\lambda_j \in \mathbb{R}$ e $m_{alg}(\lambda_j) \leq 3$
- $\{a_j + ib_j\}_{j \in \{1, \dots, \ell\}}$ con $a_j, b_j \in \mathbb{R}$, $b_j \neq 0$ e $m_{alg}(a_j + ib_j) = 1$.

Allora $\Lambda = diag(\Lambda_1, \dots, \Lambda_k, B_1, \dots, B_\ell)$ con

$$\begin{aligned} \Lambda_j &\in \left\{ \begin{pmatrix} \lambda_j & 1 & 0 \\ 0 & \lambda_j & 1 \\ 0 & 0 & \lambda_j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \lambda_j & 1 & 0 \\ 0 & \lambda_j & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \lambda_j & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_j & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_j \end{pmatrix} \right\} \cup \\ &\cup \left\{ \begin{pmatrix} \lambda_j & 1 \\ 0 & \lambda_j \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \lambda_j & 0 \\ 0 & \lambda_j \end{pmatrix}, (\lambda_j) \right\} \end{aligned}$$

$$B_j = \begin{pmatrix} a_j & -b_j \\ b_j & a_j \end{pmatrix}.$$

Osserviamo che se $\dot{y} = \mathcal{D}F(x_0)y$ ed esiste P invertibile tale che $P^{-1}\mathcal{D}F(x_0)P = \Lambda$ con Λ in forma di Jordan reale allora, ponendo $z = P^{-1}y$ troviamo un omeomorfismo tale che

$$\dot{z} = P^{-1}\dot{y} = P^{-1}\mathcal{D}F(x_0)y = (P^{-1}\mathcal{D}F(x_0)P)z = \Lambda z.$$

Notazione 3.7.

Sia V_{λ_j} l'autospazio generalizzato di λ_j , similmente per $a_j + ib_j$.

Proposizione 3.8 (Gli autospazi generalizzati sono invarianti).

Per $\dot{y} = Ay$, $A \in \mathcal{M}(d, \mathbb{R})$ si ha che V_{λ_j} e $V_{a_j+ib_j}$ sono insiemi invarianti.

Dimostrazione.

Senza perdita di generalità supponiamo che $A = \Lambda$ sia in forma di Jordan reale e a meno di permutare le coordinate mostriamo la tesi solo per V_{λ_1} ¹. Osserviamo che un generico vettore di V_{λ_1} è della forma $y_0 = ((y_0)_1, \dots, (y_0)_s, 0, \dots, 0)$, dove $s = m_{alg}(\lambda_1)$ (dove poniamo $s = 2$ nel caso di autovalore complesso). La tesi segue calcolando:

$$\phi_t(y_0) = e^{t\Lambda}y_0 = \text{diag}(e^{\lambda_1 t}, \dots, e^{\lambda_s t})y_0 = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1 t} & & & \\ & \ddots & & \\ & & e^{\lambda_s t} & \\ & & & 0 \\ & & & & \ddots \\ & & & & & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (y_0)_1 \\ \vdots \\ (y_0)_s \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \in V_{\lambda_1}.$$

□

Definizione 3.9 (Sottospazi stabili).

Il **sottospazio stabile** di 0 per il sistema $\dot{y} = Ay$ è l'insieme

$$E^s(0) = \text{Span}(v \in V_{\lambda_i} \mid \Re(\lambda_i) < 0).$$

Il **sottospazio instabile** ($E^u(0)$) e il **sottospazio centrale** ($E^c(0)$) sono definiti in modo analogo considerando $\Re(\lambda_i) > 0$ e $\Re(\lambda_i) = 0$ rispettivamente.

Teorema 3.10 (Invarianza e caratterizzazione dei sottospazi stabili).

Dato il sistema $\dot{y} = Ay$ si ha che:

1. $\dim E^u(0) + \dim E^s(0) + \dim E^c(0) = d$

2. $E^{s,c,u}(0)$ è invariante per ϕ_t

3. $E^s(0) = \left\{ y_0 \in \mathbb{R}^d \mid \lim_{t \rightarrow +\infty} \phi_t(y) = 0 \right\}$

4. $E^u(0) = \left\{ y_0 \in \mathbb{R}^d \mid \lim_{t \rightarrow -\infty} \phi_t(y) = 0 \right\}.$

Dimostrazione. (NON DATA DURANTE IL CORSO).

Il primo punto segue da noti risultati sugli autospazi generalizzati.

Il secondo punto è una conseguenza dell'invarianza degli autospazi (3.8).

Gli ultimi due punti seguono da come funzionano i $e^{\Re(\lambda)t}$ (questi fattori appaiono dopo essersi portati in forma di Jordan). □

¹dove λ_1 in questo caso si riferisce ad autovalori potenzialmente complessi.

3.2 Pozzi e Sorgenti

Definizione 3.11 (Pozzi e sorgenti).

Sia x_0 un punto fisso. Esso si dice

- **pozzo** se ogni autovalore di $\mathcal{D}F(x_0)$ ha parte reale negativa,
- **sorgente** se ogni autovalore di $\mathcal{D}F(x_0)$ ha parte reale positiva.

Osservazione 3.12.

Si può pensare a sorgenti come pozzi per tempi negativi.

Proposizione 3.13 (Stabilità dei pozzi).

I pozzi sono asintoticamente stabili

Dimostrazione.

A meno di traslare il sistema supponiamo $x_0 = 0 \in \mathbb{R}^d$.

Poiché cambi di base lineari non cambiano la stabilità dell'origine supponiamo che $\mathcal{D}F(0)$ sia in forma di Jordan reale. Trattiamo prima i casi dove $\mathcal{D}F(0)$ consiste di un solo blocco di Jordan e poi uniamo i risultati.

$\boxed{\lambda \in \mathbb{R}}$ Supponiamo che

$$\mathcal{D}F(0) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \lambda & 1 \\ & & & \lambda \end{pmatrix} \implies \dot{x} = F(x) = \underbrace{F(0)}_{=0} + \mathcal{D}F(0)x + O(\|x\|^2).$$

Dato $\varepsilon > 0$ consideriamo il cambio di base

$$y = (y_1, \dots, y_d), \quad y_i = \varepsilon^{-i+1} x_i,$$

da cui

$$\dot{y} = Ay + \tilde{G}(y), \quad A = \begin{pmatrix} \lambda & \varepsilon & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & \lambda & \varepsilon \\ & & & \lambda \end{pmatrix}, \quad \tilde{G}(y) = O(\|y\|^2).$$

Affermiamo che la funzione

$$V(y) = \frac{1}{2} \|y\|^2$$

è di Lyapunov stretta in un intorno di 0. La prima condizione è evidentemente verificata, quindi dobbiamo solo trovare un intorno dove $\dot{V}(y) < 0$ per $y \neq 0$.

$$\begin{aligned} \dot{V}(y) &= \sum_{i=1}^{d-1} y_i \underbrace{(\lambda y_i + \varepsilon y_{i+1} + \tilde{G}_i(y))}_{\dot{y}_i} + y_d \underbrace{(y_d + \tilde{G}_d(y))}_{\dot{y}_d} = \\ &= \lambda \|y\|^2 + \varepsilon \sum_{i=1}^{d-1} y_i y_{i+1} + y \cdot \tilde{G}(y) \stackrel{(*)}{\leq} \\ &\leq \lambda \|y\|^2 + \frac{\varepsilon}{2} \left(\sum_{i=1}^{d-1} y_i^2 + \sum_{i=2}^d y_i^2 \right) + O(\|y\|^3) = \\ &= \left(\lambda + \frac{\varepsilon}{2} \right) (y_1^2 + y_d^2) + (\lambda + \varepsilon) \sum_{i=2}^{d-1} y_i^2 + O(\|y\|^3) \leq \\ &\leq (\lambda + \varepsilon) \|y\|^2 + O(\|y\|^3), \end{aligned}$$

dove nel passaggio evidenziato abbiamo usato

$$0 \leq \left\| \begin{pmatrix} y_1 - y_2 \\ \vdots \\ y_{d-1} - y_d \end{pmatrix} \right\|^2.$$

Cerchiamo dunque condizioni valide per ε e $\|y\|$:

Poiché $\lambda < 0$ è lecito fissare $\varepsilon \in (0, |\lambda|)$. Per le proprietà degli O grandi esistono $r, C > 0$ tali che

$$\|y\| < r \implies \dot{V}(y) \leq ((\lambda + \varepsilon) + C \|y\|) \|y\|^2.$$

Ponendo ora $\lambda + \varepsilon + C \|y\| < 0$ si ha che se

$$r' < \min \left\{ r, \frac{|\lambda + \varepsilon|}{C} \right\}$$

allora per $y \in B_{r'}(0) \setminus \{0\}$ vale

$$\dot{V}(y) \leq ((\lambda + \varepsilon) + C \|y\|) \|y\|^2 < 0,$$

cioè V è una funzione di Lyapunov stretta per x_0 in un opportuno cambio di base, dunque x_0 è asintoticamente stabile per il secondo teorema di Lyapunov (2.10).

$\boxed{\lambda \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}}$ Supponiamo che

$$\mathcal{D}F(0) = \begin{pmatrix} a & b & 1 & 0 \\ -b & a & 0 & 1 \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & \ddots \end{pmatrix}$$

A meno di un coniugio² troviamo

$$\dot{y} = Ay + \tilde{G}(y), \quad A = \begin{pmatrix} a & b & \varepsilon & 0 \\ -b & a & 0 & \varepsilon \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & \ddots \end{pmatrix}$$

e concludiamo in modo simile al caso precedente.

$\boxed{\text{generale}}$ Segue dai due casi precedenti dando un'ulteriore limitazione con gli O grandi sui termini non lineari.

□

3.3 Classificazione dei punti stabili lineari sul piano

Consideriamo i sistemi lineari di questa forma

$$\dot{x} = Ax, \quad A \in \mathcal{M}(2, \mathbb{R}), \quad x = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2.$$

²nota che anche la matrice del cambio di base deve avere blocchi 2×2 .

Sappiamo che

$$\phi_t(x_0) = e^{At}x_0,$$

in particolare $x_0 = 0$ è un punto fisso.

$$A = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \implies p_A(\lambda) = \lambda^2 - (a+d)\lambda + ad - bc = \lambda^2 - (\text{tr } A)\lambda + \det A.$$

Segue che gli autovalori di A sono

$$\lambda_{\pm} = \frac{\text{tr } A \pm \sqrt{\Delta}}{2}, \quad \Delta = (\text{tr } A)^2 - 4 \det A.$$

Consideriamo i possibili casi:

$$\boxed{\begin{array}{l} \det A > 0 \\ \Delta > 0 \end{array}}$$

Gli autovalori λ_{\pm} sono reali distinti.

*) Se $\text{tr } A > 0$ allora $\lambda_+ > \lambda_- > 0$, da cui a meno di coniugio

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_+ & 0 \\ 0 & \lambda_- \end{pmatrix} \implies \begin{cases} \dot{u} = \lambda_+ u \\ \dot{v} = \lambda_- v \end{cases},$$

da cui le soluzioni sono

$$(u(t), v(t)) = (e^{\lambda_+ t} u_0, e^{\lambda_- t} v_0).$$

Questa situazione è detta **nodo instabile**.

Osserviamo che $E^u(0) = \mathbb{R}^2$ e $E^s(0) = E^c(0) = \{0\}$.

*) Se $\text{tr } A < 0$ allora $\lambda_- < \lambda_+ < 0$ e troviamo il **nodo stabile**.

Osserviamo che $E^s(0) = \mathbb{R}^2$ e $E^u(0) = E^c(0) = \{0\}$.

$$\boxed{\begin{array}{l} \det A > 0 \\ \Delta < 0 \end{array}}$$

Gli autovalori λ_{\pm} sono complessi coniugati. $\lambda_{\pm} = \alpha \pm i\beta$ con $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Segue che

$\text{tr } A = 2\alpha$. A meno di coniugio

$$A = \begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix} \implies e^{At} = e^{\alpha t} \begin{pmatrix} \cos(\beta t) & -\sin(\beta t) \\ \sin(\beta t) & \cos(\beta t) \end{pmatrix}.$$

*) Se $\alpha > 0$ troviamo

$$x(t) = e^{\alpha t} R_{\beta t}(x_0)$$

cioè un **fuoco instabile**. Osserviamo che $E^u(0) = \mathbb{R}^2$ e $E^s(0) = E^c(0) = \{0\}$.

*) Se $\alpha < 0$ troviamo

$$x(t) = e^{\alpha t} R_{\beta t}(x_0)$$

cioè un **fuoco stabile**. Osserviamo che $E^s(0) = \mathbb{R}^2$ e $E^u(0) = E^c(0) = \{0\}$.

*) Se $\alpha = 0$ troviamo

$$x(t) = R_{\beta t}(x_0)$$

cioè un **centro**. Osserviamo che $E^c(0) = \mathbb{R}^2$ e $E^s(0) = E^u(0) = \{0\}$.

$$\boxed{\begin{array}{l} \det A > 0 \\ \Delta = 0 \end{array}}$$

Gli autovalori coincidono e sono della forma $\lambda = \text{tr } A/2$. A meno di coniugio abbiamo

due possibilità:

$$A = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \implies x(t) = e^{\lambda t} x_0$$

Questa situazione è detta **Stella stabile/instabile** per segno negativo o positivo della traccia rispettivamente.

$$A = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} \implies x(t) = e^{\lambda t}(u_0 + tv_0, v_0).$$

Questa situazione è detta **nodo stabile/instabile improprio**.

$\det A < 0$
$\Delta > 0$

Gli autovalori sono reali di segno opposto $\lambda_- < 0 < \lambda_+$. A meno di coniugio

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_+ & 0 \\ 0 & \lambda_- \end{pmatrix} \implies x(t) = (u_0 e^{\lambda_+ t}, v_0 e^{\lambda_- t}).$$

Troviamo un **punto di sella**. Il segno della traccia specifica solo verso quale asse le iperboli sono schiacciate.

Osserviamo che $E^s(0) = \{x = 0\}$, $E^u(0) = \{y = 0\}$, $E^c(0) = 0$, cioè lo “spazio tangente” in 0 si decompone in una retta stabile e una instabile.

$\det A = 0$

Gli autovalori sono 0 e $\text{tr } A$. In tutti i casi a meno di coniugio una coordinata resta costante, dunque troviamo delle **rette**.

Riassumiamo i casi nella seguente tabella

sgn $\det A$	sgn Δ	sgn $\text{tr } A$	Nome
+	+	+	Nodo instabile
+	+	-	Nodo stabile
+	-	+	Fuoco instabile
+	-	-	Fuoco stabile
+	-	0	Centro
+	0	+	Stella o nodo improprio instabile
+	0	-	Stella o nodo improprio stabile
-	+	•	Punto di Sella
0	•	•	Rette

Riportiamo dei diagrammi di fase per evidenziare la forma delle orbite.

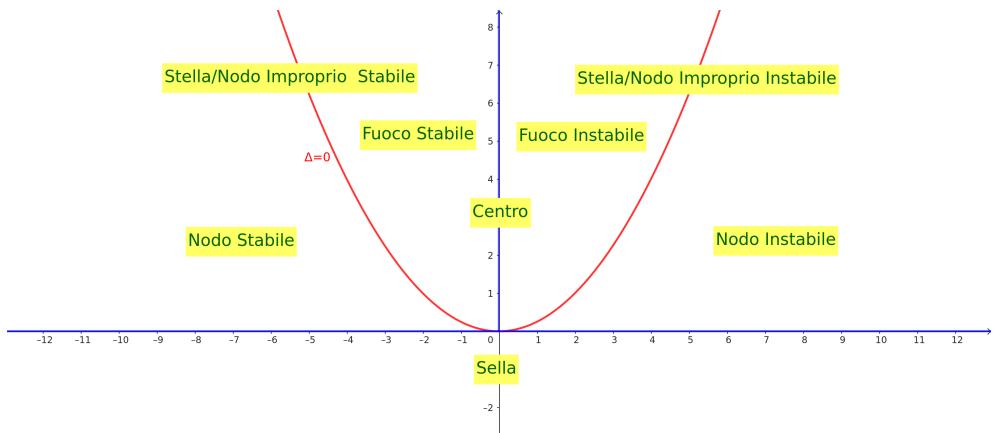


Figura 3.1: Utile diagramma che organizza i tipi di punti stabili lineari. L'asse x corrisponde ai possibili valori di $\text{tr } A$ e l'asse y ai possibili valori di $\det A$. La parabola rossa indica il luogo dove $\Delta = 0$; nella regione sopra la parabola troviamo $\Delta < 0$ e sotto $\Delta > 0$. In blu sono indicati i valori di $\text{tr } A$ e $\det A$ per cui il punto stabile in considerazione NON è iperbolico.

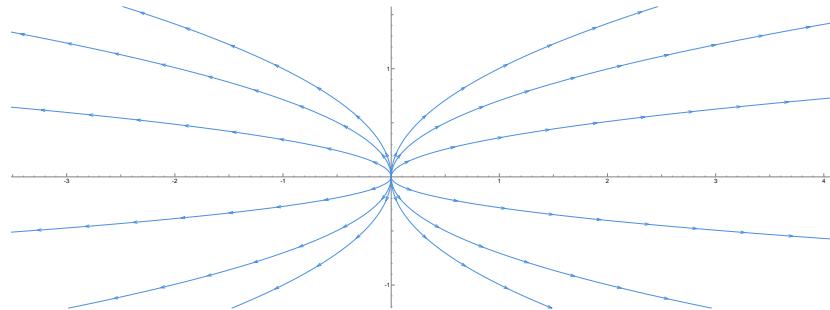


Figura 3.2: Nodo instabile

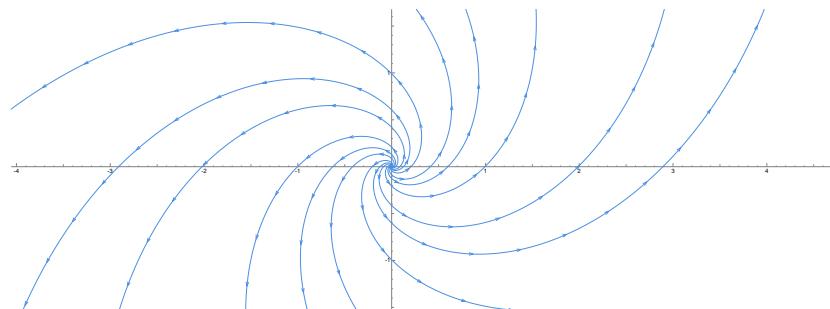


Figura 3.3: Fuoco instabile

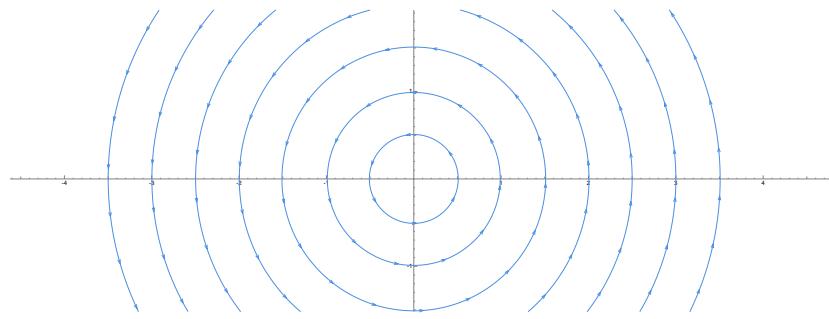


Figura 3.4: Centro

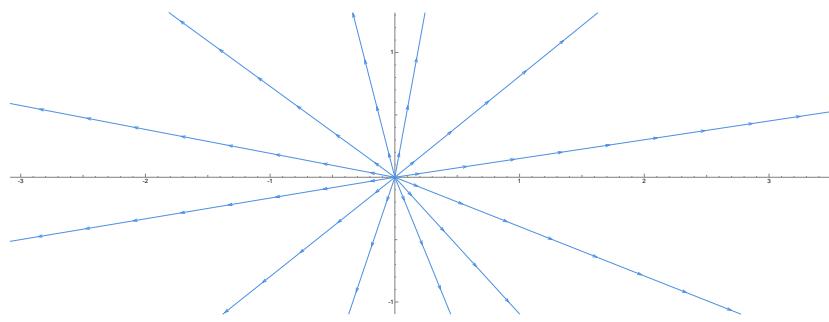


Figura 3.5: Stella instabile

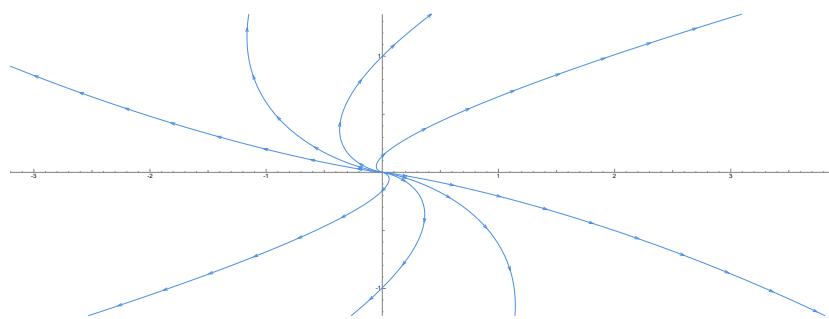


Figura 3.6: Nodo improprio instabile

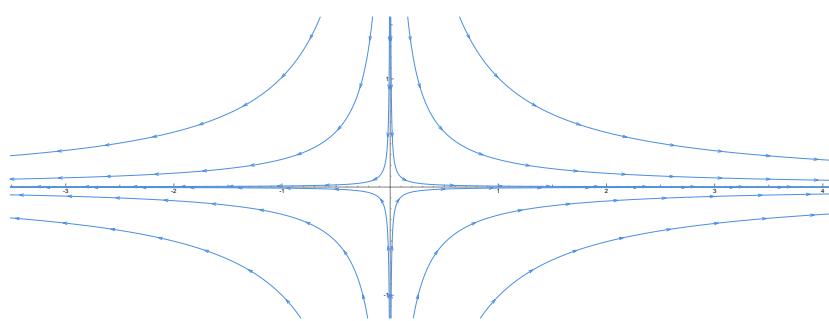


Figura 3.7: Sella

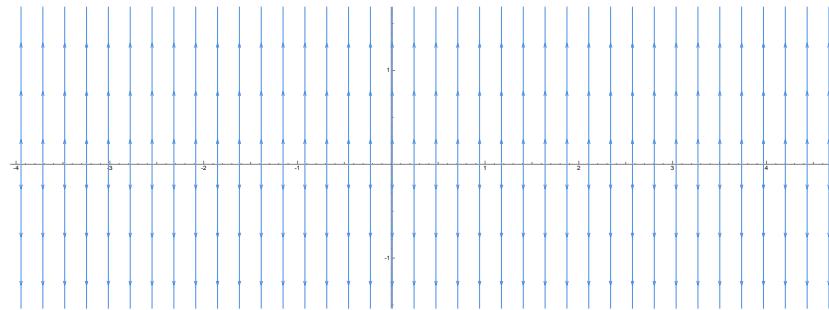


Figura 3.8: Rette per matrice diagonalizzabile

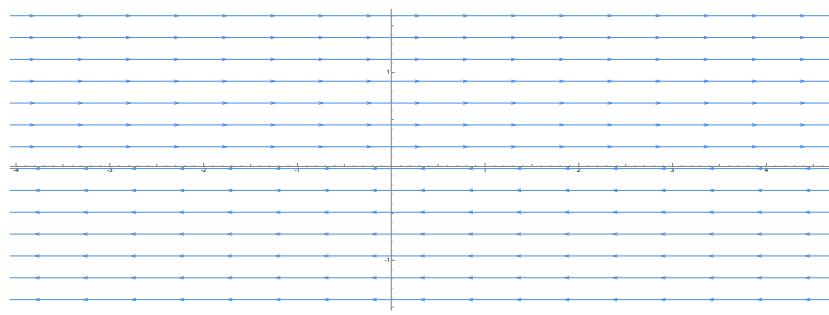


Figura 3.9: Rette per blocco di Jordan nilpotente

Capitolo 4

Integrali Primi e Sistemi Hamiltoniani

In questo capitolo introduciamo una classe di sistemi che ammettono integrale primo (e quindi ci permettono di fare uno studio globale guardando le curve di livello di questo). A volte, anche se un sistema non è della forma trattata in questo capitolo, è possibile studiarne il comportamento approssimandolo prima ad uno di questi e poi perturbando la soluzione trovata in modo opportuno.

4.1 Sistemi Hamiltoniani

Notazione 4.1.

Quando consideriamo lo spazio \mathbb{R}^{2d} in questo capitolo indichiamo le coordinate come $(x, y) = (q, p) \in \mathbb{R}^{2d}$ con $x = q \in \mathbb{R}^d$ e $y = p \in \mathbb{R}^d$. In genere q è detto **coordinata generalizzata** e p è detto **momento generalizzato**.

Con la notazione $\frac{\partial H}{\partial x}$ intendiamo il vettore la cui componente i -esima è $\frac{\partial H}{\partial x_i}$. Similmente per $\frac{\partial H}{\partial y}$.

Definizione 4.2 (Sistema Hamiltoniano).

Un sistema di ODE su \mathbb{R}^{2d} è un **sistema Hamiltoniano** se è della forma

$$\begin{pmatrix} -\dot{y} \\ \dot{x} \end{pmatrix} = \nabla H \iff \begin{cases} \dot{x}_i = \frac{\partial H}{\partial y_i} \\ \dot{y}_i = -\frac{\partial H}{\partial x_i} \end{cases} \quad \text{per ogni } i \in \{1, \dots, d\},$$

dove $H : \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione di classe $C^2(\mathbb{R}^{2d})$ detta **funzione Hamiltoniana** del sistema.

Il numero d è detto numero di **gradi di libertà**.

Osservazione 4.3.

Ad ogni funzione $H : \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^2 è associato un sistema Hamiltoniano.

Proposizione 4.4 (Hamiltoniana è un integrale primo).

Se H è una funzione Hamiltoniana allora è un integrale primo del sistema ad essa associato.

Dimostrazione.

Basta calcolare \dot{H} .

$$\begin{aligned}\dot{H}(x, y) &= \nabla H(x, y) \cdot \begin{pmatrix} \frac{\partial H}{\partial y} \\ -\frac{\partial H}{\partial x} \end{pmatrix} = \\ &= \sum_{i=1}^d \left(\frac{\partial H}{\partial x_i} \frac{\partial H}{\partial y_i} + \frac{\partial H}{\partial y_i} \left(-\frac{\partial H}{\partial x_i} \right) \right) = 0.\end{aligned}$$

□

Esempio 4.5.

Un sistema con due gradi di libertà è dato dal doppio pendolo, il quale è interamente determinato da due angoli. Lo spazio delle fasi è $T^2 \times \mathbb{R}^2$ dove $T^2 = S^1 \times S^1$ parametrizza i due angoli e \mathbb{R}^2 le velocità angolari.

Osserviamo intuitivamente che $\dim \{H = c\} = 3$, che vedremo essere la minima dimensione che permette orbite caotiche.

Esempio 4.6 (Un grado di libertà e mezzo).

Se un sistema ha un grado di libertà ma non è autonomo possiamo reinterpretarlo come un sistema con due gradi di libertà dove abbiamo aggiunto il tempo e questi sistemi possono ancora presentare comportamenti caotici. Un esempio sono oscillatori armonici perturbati periodicamente.

Teorema 4.7 (Liouville).

Sia $H : \mathbb{R}^{2d} \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^3 e sia ϕ_t il flusso del sistema Hamiltoniano associato. Allora per ogni $A \subseteq \mathbb{R}^{2d}$ misurabile si ha che per ogni $t \in \mathbb{R}$

$$\mathcal{L}(A) = \mathcal{L}(\phi_t(A)).$$

Dimostrazione.

Osserviamo che

$$\frac{d}{dt} \phi_t(x, y) = F(\phi_t(x, y)) = \begin{pmatrix} \frac{\partial H}{\partial y}(\phi_t(x, y)) \\ -\frac{\partial H}{\partial x}(\phi_t(x, y)) \end{pmatrix}.$$

Poiché H è di classe C^3 , si ha che $\phi : (x, y, t) \mapsto \phi_t(x, y)$ è di classe C^2 ¹, quindi

$$\frac{d}{dt} (\mathcal{D}(\phi_t(x, y))) \stackrel{\text{regolarità}}{=} \underbrace{\mathcal{D}\left(\frac{d}{dt} \phi_t(x, y)\right)}_{=F(\phi_t(x, y))} = \mathcal{D}F(\phi_t(x, y))\mathcal{D}(\phi_t(x, y)).$$

Poiché $\mathcal{D}\phi_0(x, y) = I$, possiamo integrare l'identità precedente² per trovare

$$\mathcal{D}(\phi_t(x, y)) = \exp\left(\int_0^t \mathcal{D}F(\phi_s(x, y))ds\right).$$

¹Poiché H è C^3 ne deriva che F è C^2 . Dato che $\phi' = F(\phi)$ si ha per il teorema del differenziale totale che ϕ è almeno C^2 in ogni entrata.

²è come se stessimo risolvendo insieme tutti i sistemi della forma

$$\frac{d}{dt} v(t) = \mathcal{D}F(\phi_t(x, y))v(t), \quad \text{per } v(t) = \mathcal{D}(\phi_t(x, y))e_i : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^{2d}.$$

Segue da una identità nota³ che

$$\det \mathcal{D}(\phi_t(x, y)) = \exp \left(\int_0^t \operatorname{tr} (\mathcal{D}F(\phi_s(x, y))) ds \right).$$

Per il teorema di Schwarz

$$\frac{\partial^2 H}{\partial x_i \partial y_i} = \frac{\partial^2 H}{\partial y_i \partial x_i},$$

dunque $\operatorname{tr} (\mathcal{D}F) = 0$, da cui

$$\operatorname{tr} (\mathcal{D}F(\phi_s(x, y))) = 0.$$

Segue che

$$\det \mathcal{D}(\phi_t(x, y)) = e^0 = 1.$$

Concludiamo con il seguente conto

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\phi_t(A)) &= \int_{\phi_t(A)} 1 d\mathcal{L} = \int_A |\det \mathcal{D}\phi_t(x, y)(x, y)| d\mathcal{L} = \\ &= \int_A 1 d\mathcal{L} = \mathcal{L}(A). \end{aligned}$$

□

4.1.1 Sistemi meccanici con un grado di libertà

Definizione 4.8 (Sistema meccanico).

Un **sistema meccanico** è un sistema Hamiltoniano della forma

$$H(x, y) = \frac{1}{2} y^\top A y + V(x)$$

con $V : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ e $A \in Sym(d, \mathbb{R})$. La funzione V è detta **potenziale**.

Studiamo un sistema meccanico con un grado di libertà:

A meno di riscalamento poniamo $A = (1)$.

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\partial H}{\partial y} = y \\ \dot{y} = -\frac{\partial H}{\partial x} = -V'(x) \end{cases}$$

Osserviamo che i punti fissi sono $\{(x, 0) \mid V'(x) = 0\}$. La matrice Jacobiana è data da

$$\mathcal{D}F(x, y) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -V''(x) & 0 \end{pmatrix} \implies \operatorname{tr} \mathcal{D}F = 0, \det \mathcal{D}F = V''(x).$$

Se $V''(x) = 0$ siamo in un caso degenere e il linearizzato non ci aiuta.

Se $V''(x) < 0$ il punto $(x, 0)$ è una sella.

Se $V''(x) > 0$ il punto $(x, 0)$ è un punto non iperbolico di tipo centro.

Il teorema di linearizzazione ci informa solo sul caso $(x, 0)$ sella. Studiamo la stabilità del caso di tipo centro.

³ $\det(e^A) = e^{\operatorname{tr} A}$

Proposizione 4.9 (Caratterizzazione dei punti fissi in sistema meccanico ad un grado di libertà).

I punti fissi non degeneri⁴ di un sistema meccanico ad un grado di libertà sono selle o centri⁵.

Idea di dimostrazione.

Se $(x_0, 0)$ è una sella nel linearizzato allora la tesi segue per Hartmann-Grobman (3.3).

Supponiamo dunque che $(x_0, 0)$ sia un centro lineare tale che $V''(x_0) \neq 0$.

Se $(x_0, 0)$ fosse instabile, esisterebbe un $\varepsilon > 0$ tale che per ogni $\delta > 0$ esiste $z_0 \in B_\delta((x_0, 0))$ tale che $\|\phi_t(z_0) - (x_0, 0)\| > \varepsilon$. Poniamo

$$m_\varepsilon = \min_{\partial B_\varepsilon((x_0, 0))} H$$

e consideriamo un ε abbastanza piccolo in modo tale che $m_\varepsilon \geq \sup_{B_\varepsilon((x_0, 0))} H$, che sappiamo esistere perché da noti criteri sulle derivate prime e seconde $(x_0, 0)$ è un minimo locale di H . Poiché le orbite del sistema corrispondono alle curve di livello di H abbiamo trovato una contraddizione in quanto per ε abbastanza piccolo le orbite non possono attraversare $\partial B_\varepsilon((x_0, 0))$.

Se $(x_0, 0)$ fosse asintoticamente stabile esisterebbe un intorno di $(x_0, 0)$ che converge a $(x_0, 0)$, in particolare l'area di questo intorno non si conserva, contraddicendo il teorema di Liouville (4.7). \square

Nel caso di $V'(x_0) = V''(x_0) = 0$ spesso ci aspettiamo orbite omocline dove il punto fisso è una cuspide. Più precisamente⁶, applicando il teorema di Taylor:

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{V'(x)}{y} = -\frac{V'(x)}{\pm\sqrt{2(V(x_0) - V(x))}} = -\frac{o(x - x_0)}{\pm\sqrt{2o((x - x_0)^2)}} = o(1) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} 0,$$

cioè la pendenza delle orbite nello spazio delle fasi quando ci avviciniamo ad un punto fisso come sopra tende a 0. Data la simmetria per l'asse orizzontale dei sistemi Hamiltoniani, questa condizione sulla derivata si traduce geometricamente nella presenza di una cuspide.

⁴ $(x_0, 0)$ con $V'(x_0) = 0$ e $V''(x_0) \neq 0$

⁵non solo nel linearizzato

⁶Questa motivazione non è stata data a lezione.

Capitolo 5

Primi metodi di studio globale

5.1 Metodo delle isocline nel piano

Supponiamo $F = (f, g)$ con $f, g : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^1 .

Introduciamo un metodo che permette di calcolare esplicitamente orbite in qualche caso.

Proposizione 5.1 (Metodo delle isocline nel piano).

Sia (x_0, y_0) tale che $F(x_0, y_0) \neq (0, 0)$, allora esiste un intorno U di (x_0, y_0) tale che $\mathcal{O}(x_0, y_0) \cap U$ è il grafico di una funzione $h(x)$ (se $f(x_0, y_0) \neq 0$, altrimenti $h(y)$) che risolve l'equazione differenziale

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{g(x, h(x))}{f(x, h(x))}.$$

Dimostrazione.

Senza perdita di generalità supponiamo $f(x_0, y_0) \neq 0$, esiste dunque U intorno di (x_0, y_0) dove f non si annulla. Consideriamo la funzione

$$I(x, y) = y - h(x)$$

dove $h(x)$ è la soluzione del problema di Cauchy

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{g(x, h(x))}{f(x, h(x))}, \quad h(x_0) = y_0$$

definita in un intorno di x_0 contenuto nella proiezione sulla prima componente di U . Osserviamo che

$$\dot{I}|_{I=0}(x, y) = \dot{y} - h'(x)\dot{x}|_{I=0} = g(x, y) - \frac{g(x, h(x))}{f(x, h(x))}f(x, y)|_{y=h(x)} = 0,$$

dunque per il criterio (1.10) sappiamo che $\{y = h(x)\}$ è un insieme invariante. Poiché è una curva e contiene (x_0, y_0) questa è l'orbita voluta ed effettivamente l'abbiamo scritta come grafico. \square

5.2 Ricerca di simmetrie

Spesso, soprattutto negli esercizi, i sistemi in esame presentano delle simmetrie, ovvero è possibile costruire una mappa¹

$$\begin{aligned} C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}^d) &\longrightarrow C^1(\mathbb{R}, \mathbb{R}^d) \\ x(t) &\longmapsto \tilde{x}(t) \end{aligned}$$

tale che

$$\frac{d}{dt}x(t) = F(x(t)) \implies \frac{d}{dt}\tilde{x}(t) = F(\tilde{x}(t)).$$

Spesso una simmetria si fattorizza in una mappa “geometrica” composta con una mappa “temporale”, cioè esistono $\tau : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ e $g : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$ tali che

$$\tilde{x}(t) = g(x(\tau(t))).$$

Esempio 5.2 (Esempio di simmetrie).

Consideriamo il sistema

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

L’unico punto fisso è $(0,0)$ e gli assi sono invarianti. Ci sono altre rette invarianti? Cioè, esistono a, b tali che una curva di livello di $I(x, y) = ax + by$ è invariante?

$$\begin{aligned} \dot{I}|_{I=c} &= a\dot{x} + b\dot{y}|_{ax+by=c} \stackrel{\text{se } b \neq 0}{=} \\ &= ax^2 + by^2|_{ax+by=c} = ax^2 + b\left(\frac{c - ax}{b}\right)^2 = \\ &= \left(a + \frac{a^2}{b}\right)x^2 - 2\frac{ac}{b}x + \frac{c^2}{b}. \end{aligned}$$

Per annullare tutti i coefficienti $c = 0$ e $a \in \{0, -b\}$. Troviamo dunque le condizioni $c = 0$ e $a = 0$ o $a = -b$. Dunque $\{x = y\}$ è un insieme invariante.

Andiamo ora a studiare le isocline. Per $x \neq 0$ consideriamo

$$\frac{dx}{dy} = \frac{y^2}{x^2} \implies -\frac{1}{y(x)} + \frac{1}{y_0} = -\frac{1}{x} + \frac{1}{x_0} \implies y(x) = \frac{1}{\frac{1}{x} + \left(\frac{1}{y_0} - \frac{1}{x_0}\right)}.$$

Studiamo le simmetrie del sistema. Proviamo a porre $(\tilde{x}(t), \tilde{y}(t)) = (-x(-t), -y(-t))$, da cui

$$\frac{d}{dt}\tilde{x}(t) = -\dot{x}(-t)(-1) = \dot{x}(-t) = x^2(-t) = (-\tilde{x}(t))^2 = (\tilde{x}(t))^2$$

e similmente per \tilde{y} . Questo mostra che ad ogni orbita possiamo associarne un’altra che geometricamente è la riflessione rispetto all’origine e che viene percorsa in verso opposto.

¹Durante il corso non è stata data una definizione rigorosa di simmetria, solo una idea intuitiva e pratica di come impiegarla nella risoluzione di esercizi. Questa formulazione NON è stata data durante il corso e non so se è standard, serve solo come guida per capire il concetto a chi legge le dispense.

Capitolo 6

Varietà stabili/instabili

6.1 Varietà stabili e instabili locali

In un punto fisso lineare di tipo sella sappiamo che esistono due assi: uno che converge al punto (E^s) e uno che vi diverge (E^u).

Cerchiamo di generalizzare questo concetto.

Definizione 6.1 (Varietà stabile/instabile locale).

Siano x_0 un punto fisso iperbolico per $\dot{x} = F(x)$ e U un intorno di x_0 . La **varietà stabile locale** di x_0 in U è data da

$$W_{loc}^s(x_0) = \left\{ y \in U \mid \forall t \geq 0 \phi_t(y) \in U, \lim_{t \rightarrow +\infty} \phi_t(y) \rightarrow x_0 \right\}.$$

Similmente definiamo la **varietà instabile locale** come

$$W_{loc}^u(x_0) = \left\{ y \in U \mid \forall t \leq 0 \phi_t(y) \in U, \lim_{t \rightarrow -\infty} \phi_t(y) \rightarrow x_0 \right\}.$$

Teorema 6.2 (Varietà stabile/instabile).

Sia x_0 un punto fisso iperbolico¹ per $F \in C^k$ e $k \geq 1$. Allora esiste $\varepsilon > 0$ tale che

1. $W_{loc}^{s/u}(x_0)$ in $B_\varepsilon(x_0)$ esistono e sono uniche,
2. $W_{loc}^s(x_0)$ è positivamente invariante e $W_{loc}^u(x_0)$ è negativamente invariante,
3. $W_{loc}^{s/u}(x_0)$ sono sottovarietà di $B_\varepsilon(x_0)$ di classe C^k .
Inoltre $\dim W_{loc}^s(x_0) = \dim E^s(x_0)$ e $\dim W_{loc}^u(x_0) = \dim E^u(x_0)$.
4. I sottospazi affini $x_0 + E^{s/u}(x_0)$ sono tangenti a $W_{loc}^{s/u}$ in x_0 .

Dimostrazione. (Caso $d = 2$).

Poiché x_0 è un punto fisso iperbolico si presentano due casi: le parti reali dei due autovalori hanno lo stesso segno o hanno segno opposto. Se hanno lo stesso segno sappiamo che $\det DF(x_0) > 0$ e che $\text{tr } DF(x_0) \neq 0$. Segue dunque che $W_{loc}^s(x_0) = B_\varepsilon(x_0)$ e $W_{loc}^u(x_0) = \{x_0\}$ o viceversa a seconda del segno delle parti reali. Da queste caratterizzazioni è evidente che il teorema vale.

¹ricordiamo che x_0 iperbolico implica in particolare che $\dim E^s(x_0) + \dim E^u(x_0) = d$, dove \mathbb{R}^d è lo spazio delle fasi.

Supponiamo dunque che le parti reali dei due autovalori abbiano segno opposto. Segue immediatamente che x_0 è un punto di sella e che gli autovalori sono reali. Siano $-\lambda$ e μ questi autovalori (dove $\lambda, \mu > 0$). A meno di una traslazione e un cambio base supponiamo

$$x_0 = (0, 0), \quad \mathcal{D}F(x_0)e_1 = -\lambda e_1, \quad \mathcal{D}F(x_0)e_2 = \mu e_2.$$

Possiamo dunque riscrivere il sistema come

$$\begin{cases} \dot{x} = -\lambda x + f(x, y) \\ \dot{y} = \mu y + g(x, y) \end{cases}$$

dove f, g sono di classe C^k , $f(0, 0) = g(0, 0) = 0$ ², $\nabla f(0, 0) = \nabla g(0, 0) = (0 \ 0)^T$ ³ e le seguenti funzioni sono o -piccoli di $\sqrt{x^2 + y^2}$: $f, g, \frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial g}{\partial x}$ e $\frac{\partial g}{\partial y}$ ⁴.

Data questa trasformazione, la tesi è equivalente a mostrare che $W_{loc}^s(0, 0)$ esiste, è unico, positivamente invariante, di classe C^k e tangente a

$$\{y = 0\} = (0, 0) + E^s((0, 0)) \text{ in } (0, 0).$$

Un argomento simmetrico mostra i risultati mancanti relativi a W_{loc}^u .

Definiamo i seguenti insiemi: per ogni $\varepsilon > 0$ e per ogni $M > 1$ siano

$$D_\varepsilon = \{|x| \leq \varepsilon, |y| \leq \varepsilon\}, \quad C_M = \{|x| \geq M|y|\}, \quad C_M^+ = C_M \cap \{x > 0\} \cap D_\varepsilon,$$

$$\begin{aligned} I_\varepsilon^+ &= \{y \in (-\varepsilon, \varepsilon) \mid (\varepsilon, y) \in C_M, \exists t_0 > 0 \text{ t.c. } \phi_{t_0}(\varepsilon, y) \in \partial C_M^+ \cap \{y > 0\}\} \\ I_\varepsilon^- &= \{y \in (-\varepsilon, \varepsilon) \mid (\varepsilon, y) \in C_M, \exists t_0 > 0 \text{ t.c. } \phi_{t_0}(\varepsilon, y) \in \partial C_M^+ \cap \{y < 0\}\}. \end{aligned}$$

La dimostrazione si articola nei seguenti passi:

- Per ε abbastanza piccolo, \dot{x} è negativo su C_M^+
- Per ε abbastanza piccolo, \dot{y} ha lo stesso segno di y sul bordo ∂C_M^+
- Gli insiemi I_ε^+ e I_ε^- sono (intervalli) aperti
- Per ogni $(\varepsilon, y) \in C_M$ sappiamo che $\mathcal{O}^+(\varepsilon, y)$ esce dal bordo superiore ($y \in I_\varepsilon^+$), inferiore ($y \in I_\varepsilon^-$), o converge a $(0, 0)$ ($y \in (-\varepsilon, \varepsilon) \setminus (I_\varepsilon^+ \cup I_\varepsilon^-)$). Mostriamo che esiste un solo punto $\bar{y} \in (-\varepsilon, \varepsilon)$ tale che $\omega((\varepsilon, \bar{y})) = \{(0, 0)\}$.
- Con il metodo delle isoline interpretiamo $\mathcal{O}^+((\varepsilon, \bar{y}))$ come il grafico di una funzione $h \in C^k((0, \varepsilon))$
- Per arbitrarietà di $M > 1$ possiamo passare al limite in $M \rightarrow +\infty$ per mostrare $h'(0) = 0$, da cui segue la tangenza.

Fissiamo $M > 1$ e procediamo a mostrare i primi quattro punti:

Claim: Esiste un $\varepsilon > 0$ tale che $\dot{x}|_{C_M^+} < 0$.

²in quanto $x_0 = (0, 0)$ è un punto fisso

³in quanto sappiamo che $\mathcal{D}F((0, 0)) = \begin{pmatrix} -\lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix}$

⁴per come funziona l'espansione di Taylor

Dimostrazione del Claim.

Ricordiamo che

$$\dot{x} = -\lambda x + f(x, y) \quad \text{con } |f(x, y)| = o(\sqrt{x^2 + y^2}),$$

in particolare esiste $\varepsilon > 0$ tale che per ogni $(x, y) \in D_\varepsilon$

$$|f(x, y)| \leq \frac{\lambda}{2\sqrt{2}} \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Se $(x, y) \in C_M$ allora

$$\sqrt{x^2 + y^2} \leq \sqrt{x^2 \left(1 + \frac{1}{M^2}\right)} \stackrel{M \geq 1}{\leq} \sqrt{2}|x|.$$

Mettendo insieme questi risultati

$$\begin{aligned} \dot{x}|_{C_M^+} &= -\lambda x + f(x, y)|_{C_M^+} \leq \\ &\leq -\lambda x + \frac{\lambda}{2\sqrt{2}} \sqrt{x^2 + y^2}|_{C_M^+} \leq \\ &\stackrel{x > 0}{\leq} -\lambda x + \frac{\lambda}{2}x = -\frac{\lambda}{2}x < 0. \end{aligned}$$

□

Claim: Esiste un $\varepsilon > 0$ tale che $\dot{y}|_{\partial C_M^+ \cap \{y > 0\}} > 0$ e $\dot{y}|_{\partial C_M^+ \cap \{y < 0\}} < 0$.

Dimostrazione del Claim.

Ricordiamo che

$$\dot{y} = \mu y + g(x, y) \quad \text{con } |g(x, y)| = o(\sqrt{x^2 + y^2}),$$

in particolare esiste $\varepsilon > 0$ tale che per ogni $(x, y) \in D_\varepsilon$

$$|g(x, y)| \leq \frac{\mu}{2\sqrt{1 + M^2}} \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Segue che

$$\begin{aligned} \dot{y}|_{\partial C_M^+ \cap \{y > 0\}} &= \mu y + g(My, y) \geq \\ &\geq \mu y - \frac{\mu}{2\sqrt{1 + M^2}} \sqrt{(1 + M^2)y} = \\ &= \frac{\mu}{2}y > 0. \end{aligned}$$

Gli stessi conti con le diseguaglianze nel senso opposto danno la dimostrazione per $\dot{y}|_{\partial C_M^+ \cap \{y < 0\}}$. □

Claim: Gli insiemi I_ε^+ e I_ε^- sono intervalli aperti.

Dimostrazione del Claim.

Mostriamo la tesi solo per I_ε^+ . Il caso I_ε^- è simmetrico.

aperto Sia $y_0 \in I_\varepsilon^+$ e sia $t_0 > 0$ tale che $\phi_{t_0}(\varepsilon, y_0) \in \partial C_M^+ \cap \{y > 0\}$. Se $\phi_t(a, b) = (x(t, a, b), y(t, a, b))$ osserviamo che $y(t_0, \varepsilon, y_0) > 0$ e $x(t_0, \varepsilon, y_0) - My(t_0, \varepsilon, y_0) = 0$. Definiamo

$$G(b, t) = x(t, \varepsilon, b) - My(t, \varepsilon, b).$$

Per quanto detto $G(y_0, t_0) = 0$ e, per $\varepsilon > 0$ abbastanza piccolo, $\frac{d}{dt} G(y_0, t_0) = \dot{x}(t_0, \varepsilon, y_0) - M\dot{y}(t_0, \varepsilon, y_0) < 0 \neq 0$ ⁵.

Abbiamo verificato le ipotesi del teorema della funzione implicita, dunque esistono U intorno di y_0 , V intorno di t_0 e $\tau : U \rightarrow V$ continua C^k (regolarità di G) tali che $\tau(y_0) = t_0$ e per ogni $y \in U$ abbiamo

$$G(y, \tau(y)) = 0 \iff \phi_{\tau(y)}(\varepsilon, y) \in \partial C_M^+.$$

La tesi segue a meno di restringere U a $U \cap (\phi_{\tau(\cdot)}(\varepsilon, \cdot))^{-1}(\{y > 0\})$.

connesso Segue immediatamente da esistenza e unicità unito alla monotonia di x in t e per ε abbastanza piccolo (in modo che D_ε contenga come unico punto fisso $(0, 0)$). □

Claim: Si ha che

$$\#\{y \in (-\varepsilon, \varepsilon) \mid (\varepsilon, y) \in C_M, \omega(\varepsilon, y) = \{(0, 0)\}\} = 1.$$

Dimostrazione del Claim.

Supponiamo per assurdo che esistano y_0 e y_1 distinti nell'insieme. A meno di moltiplicare F per una funzione scalare⁶ possiamo supporre

$$\begin{cases} \dot{x} = -x \\ \dot{y} = \frac{\mu y + g(x, y)}{\lambda - \frac{1}{x} f(x, y)} \end{cases}$$

A meno di conti possiamo definire $\tilde{\lambda} > 0$ e \tilde{g} con le stesse proprietà di g come o -piccolo di $\sqrt{x^2 + y^2}$ in modo tale che il sistema diventi

$$\begin{cases} \dot{x} = -x \\ \dot{y} = \tilde{\lambda} y + \tilde{g}(x, y) \end{cases}$$

In questo nuovo sistema $\phi_t(\varepsilon, y) = (\varepsilon e^{-t}, y(t, \varepsilon, y))$, cioè orbite che partono con la stessa componente x mantengono la stessa componente x . Consideriamo come cambia la distanza tra y_0 e y_1 seguendo le orbite:

$$\frac{d}{dt} (y_1(t) - y_0(t)) = \dot{y}_1(t) - \dot{y}_0(t) = \tilde{\lambda}(y_1(t) - y_0(t)) + \tilde{g}(\varepsilon e^{-t}, y_1(t)) - \tilde{g}(\varepsilon e^{-t}, y_0(t)).$$

Per il teorema di Lagrange

$$|\tilde{g}(\varepsilon e^{-t}, y_1(t)) - \tilde{g}(\varepsilon e^{-t}, y_0(t))| = \frac{\partial \tilde{g}}{\partial y}(\varepsilon e^{-t}, \xi(t)) |y_1(t) - y_0(t)|$$

con $\xi(t) \in (y_0(t), y_1(t))$. Sia ora $\varepsilon > 0$ tale che per ogni $(x, y) \in D_\varepsilon$

$$\left| \frac{\partial \tilde{g}}{\partial y} \right| \leq \frac{\tilde{\lambda}}{2} \sqrt{x^2 + y^2}.$$

⁵stiamo usando i due lemma precedenti.

⁶è noto da analisi 2 che questa operazione non cambia le orbite del sistema

Si ha dunque che

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} (y_1(t) - y_0(t)) &\geq \tilde{\lambda}(y_1(t) - y_0(t)) - \frac{\tilde{\lambda}}{2} \sqrt{\varepsilon^2 e^{-2t} + \xi(t)^2} |y_1(t) - y_0(t)| \stackrel{y_1(t), y_0(t) \in D_\varepsilon}{\geq} \\ &\geq \tilde{\lambda}(y_1(t) - y_0(t)) - \frac{\tilde{\lambda}}{2} \varepsilon \sqrt{2} (y_1(t) - y_0(t)) = \\ &= \underbrace{\left(\tilde{\lambda} - \frac{\tilde{\lambda}}{2} \varepsilon \sqrt{2} \right)}_{>0 \text{ per } \varepsilon \in (0, \sqrt{2})} (y_1(t) - y_0(t)) > 0, \end{aligned}$$

dunque $y_1(t) - y_0(t)$ cresce, in particolare non possono entrambe convergere verso $(0, 0)$. \square

Siamo pronti per mostrare gli ultimi due punti e concludere la dimostrazione.

Sia $\bar{y} \in (-\varepsilon, \varepsilon)$ l'unica condizione iniziale tale che $(\varepsilon, \bar{y}) \in C_M$ e $\omega(\varepsilon, \bar{y}) = (0, 0)$. Si ha dunque che

$$W_{loc}^s(0, 0) \cap \{x > 0\} = \mathcal{O}^+(\varepsilon, \bar{y}).$$

Ripetendo quanto fatto per $\{x < 0\}$ troviamo l'esistenza e unicità di W_{loc}^s .

Sappiamo che $W_{loc}^s(0, 0) \cap \{x > 0\} = \mathcal{O}^+(\varepsilon, \bar{y})$ e per il metodo delle isocline (5.1) sappiamo che

$$\mathcal{O}^+(\varepsilon, \bar{y}) \subseteq \{y = h(x)\}$$

con $h(x)$ soluzione di

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\mu y + g(x, y)}{-\lambda x + f(x, y)}.$$

Per la regolarità delle funzioni che definiscono h sappiamo che h è C^k , quindi effettivamente $W_{loc}^s \cap \{x > 0\}$ è una varietà C^k .

Osserviamo inoltre che $h'(0) = 0$, infatti

$$|h'(x)| \sim_{x \rightarrow 0^+} \left| -\frac{\mu}{\lambda} \frac{y}{x} \right| \leq \frac{\mu}{\lambda} \frac{1}{M}$$

per ogni $M > 1$, dunque passando al limite per $M \rightarrow +\infty$ ⁷ troviamo $h'(0) = 0$. Questo mostra la tangenza di $W_{loc}^s \cap \{x > 0\}$ a $\{y = 0\}$ in $(0, 0)$. Ripetendo questi passaggi per l'altro semipiano troviamo finalmente la tesi. \square

6.2 Varietà stabili e instabili

Definizione 6.3 (Varietà stabile/instabile globale).

Definiamo le **varietà stabile/instabile globale** di x_0 come

$$\begin{aligned} W^s(x_0) &= \bigcup_{t \leq 0} \phi_t(W_{loc}^s(x_0)) \\ W^u(x_0) &= \bigcup_{t \geq 0} \phi_t(W_{loc}^u(x_0)) \end{aligned}$$

⁷ anche se a priori per M diversi dovremmo considerare ε, \bar{y} e h diversi, per l'unicità mostrata stiamo solo restringendo il tratto di h che stiamo considerando senza alterarne la forma.

Osservazione 6.4.

Studiamo velocemente come W^s e W^u possono intersecarsi in \mathbb{R}^2 . Per l'unicità locale se si incontrano coincidono o si incontrano in un punto fisso, restituendo orbite omo-cline ed eterocline rispettivamente.

Per $d > 2$ il comportamento di W^s e W^u è più intricato.

Osservazione 6.5.

In generale W^s e W^u perdono alcune proprietà della struttura differenziale che hanno W_{loc}^s e W_{loc}^u .

Capitolo 7

Orbite periodiche

Lo studio delle orbite periodiche si riduce a capire se ci sono ed eventualmente trovarle esplicitamente.

7.1 Criteri di non esistenza differenziali

Intuitivamente se aumento o diminuisco l'area di una regione con il flusso, non posso avere orbite periodiche, perché altrimenti l'area dentro l'orbita si manterrebbe.

Proposizione 7.1 (Metodo di Bendixon-Dulec).

Consideriamo il sistema $(\dot{x}, \dot{y}) = F(x, y) = (f(x, y), g(x, y))$ con $F \in C^1$. Sia $U \subseteq \mathbb{R}^2$ semplicemente connesso e aperto. Se esiste $h : U \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^1 tale che

$$\operatorname{div}(hF)(x, y) = \left(\frac{\partial h f}{\partial x} + \frac{\partial h g}{\partial y} \right) (x, y)$$

ha segno costante in U allora non esistono orbite periodiche interamente contenute in U .

Dimostrazione.

Sia per assurdo Γ un orbita periodica contenuta in U e sia $\gamma(t) = (x(t), y(t))$ la sua parametrizzazione con $t \in [0, T]$. Indichiamo con $\tilde{U} \subseteq U$ la componente connessa di \mathbb{R}^2 limitata racchiusa da Γ . Senza perdita di generalità per il segno della divergenza

$$\begin{aligned} 0 &< \iint_{\tilde{U}} \operatorname{div}(hF)(x, y) dx dy = \\ &= \iint_{\tilde{U}} \left(\frac{\partial}{\partial x} (h f) + \frac{\partial}{\partial y} (h g) dx dy \right) \stackrel{\text{(G.G.)}}{=} \\ &= \int_{\Gamma^+} h f dy - h g dx = \\ &= \pm \int_0^T h(x(t), y(t)) (f(x(t), y(t)) \dot{y}(t) - g(x(t), y(t)) \dot{x}(t)) dt \stackrel{(\dot{x}, \dot{y}) \equiv (f, g)}{=} 0, \end{aligned}$$

e questo mostra l'assurdo. \square

Proposizione 7.2 (Criterio con gradiente per inesistenza delle orbite periodiche).

Se $\dot{x} = F(x)$ con F di classe C^1 (anche in \mathbb{R}^d) e $F = \nabla I$ allora non esistono orbite periodiche.

Dimostrazione.

Supponiamo che esista $\Gamma \subseteq U$ orbita periodica e sia $\gamma(t)$ con $t \in [0, T]$ una curva che la parametrizza. Troviamo un assurdo svolgendo il seguente conto

$$\begin{aligned} 0 &= I(\gamma(T)) - I(\gamma(0)) = \int_0^T \frac{d}{dt} (I(\gamma(t))) dt = \\ &= \int_0^T \nabla I(\gamma(t)) \cdot \dot{\gamma}(t) dt \stackrel{\gamma \text{ è orbita}}{=} F \\ &= \int_0^T F(\gamma(t)) \cdot F(\gamma(t)) dt = \\ &= \int_0^T \underbrace{\|F(\gamma(t))\|^2}_{\neq 0} dt > 0 \end{aligned}$$

dove $F(\gamma(t)) \neq 0$ perché l'orbita è periodica (e quindi non contiene punti fissi). \square

Formalizziamo ora l'idea che se il campo non ruota (o equivalentemente, se il campo è conservativo) allora non abbiamo orbite periodiche (se torno al punto di partenza il campo non compie lavoro)

Proposizione 7.3 (Metodo del rotore).

Consideriamo il sistema $(\dot{x}, \dot{y}) = F(x, y) = (f(x, y), g(x, y))$ con $F \in C^1$. Se $\frac{\partial f}{\partial y} = \frac{\partial g}{\partial x}$ su U aperto semplicemente connesso allora non esistono orbite periodiche interamente contenute in U .

Dimostrazione.

Consideriamo $\omega = f dx + g dy$. Per ipotesi, su U vale

$$d\omega = \left(-\frac{\partial f}{\partial y} + \frac{\partial g}{\partial x} \right) dx \wedge dy = 0,$$

cioè ω è chiusa su U . Poiché U è semplicemente connesso si ha che ω è esatta, dunque esiste $I : U \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^2 tale che $\omega = dI$, cioè $F = \nabla I$. Questo conclude per la proposizione precedente. \square

7.2 Teoria dell'indice di Poincaré nel piano

Consideriamo sistemi della forma

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

Definizione 7.4 (Indice di una curva).

Sia Γ una curva chiusa in \mathbb{R}^2 regolare (a tratti) semplice¹ che non contiene punti fissi. Chiamiamo **indice di Γ**

$$I(\Gamma) = \frac{1}{2\pi} \int_{\Gamma^+} \frac{fdg - gdf}{f^2 + g^2}.$$

Osservazione 7.5.

Quando $f \neq 0$ osserviamo che

$$\frac{fdg - gdf}{f^2 + g^2} = d \left(\arctan \left(\frac{g}{f} \right) \right),$$

¹la condizione di semplicità serve per evitare che tutto venga contato con arbitrarie molteplicità.

quindi stiamo contando quante volte F gira seguendo Γ in senso diretto. Più precisamente

$$I(\Gamma) = \# \{ \text{giri di } F \text{ lungo } \Gamma \text{ in senso antiorario} \} - \# \{ \text{giri di } F \text{ in senso orario} \}$$

Proposizione 7.6 (Proprietà dell'indice).

Valgono le seguenti affermazioni

- Sia $H : [0, 1]^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, $(s, t) \mapsto \gamma_s(t)$ una famiglia continua di curve chiuse regolari a tratti che non contengono punti fissi (le curve sono $\text{Imm } \gamma_s = \Gamma_s$). Allora $I(\Gamma_s)$ è costante in s .
- Siano Γ_1 e Γ_2 curve chiuse regolari a tratti che non contengono punti fissi tali che $\Gamma_1 \cap \Gamma_2 \neq \emptyset$ ma le regioni da loro racchiuse si intersecano nel vuoto², allora

$$I(\Gamma_1 + \Gamma_2) = I(\Gamma_1) + I(\Gamma_2),$$

dove $\Gamma_1 + \Gamma_2$ è la curva dove vengono percorse in successione le due e i tratti in comune vergono percorsi una volta in un senso e una volta nel senso opposto³.

Dimostrazione.

Vedi Geometria 2. □

Definizione 7.7 (Indice di un punto fisso).

Sia (x_0, y_0) un punto fisso isolato di F . L'indice di (x_0, y_0) è dato dall'indice di una qualsiasi curva chiusa regolare a tratti semplice che lo racchiude e che non racchiude altri punti fissi.

Proposizione 7.8 (Indici di alcuni punti fissi).

Valgono le seguenti affermazioni:

- $I(\text{nodo}) = I(\text{fuoco}) = +1$
- $I(\text{sella}) = -1$
- Se Γ è un'orbita periodica $I(\Gamma) = +1$
- Se Γ è una curva regolare a tratti semplice che racchiude solo punti fissi isolati allora

$$I(\Gamma) = \sum_{\substack{P \text{ punto fisso} \\ P \text{ racchiuso da } \Gamma}} I(P).$$

Dimostrazione.

Per i primi due punti la tesi segue riportandoci al caso lineare standard tramite il teorema di linearizzazione (3.3).

Il terzo punto è geometricamente evidente date le possibili forme di orbite periodiche in \mathbb{R}^2 .

Il quarto punto segue dalle proprietà dell'indice (7.6)⁴. □

Osservazione 7.9.

Un'orbita periodica racchiude necessariamente punti fissi i cui indici sommano a 1. Per esempio un'orbita periodica non può racchiudere solo una sella.

²per regione racchiusa intendiamo la componente connessa di $\mathbb{R}^2 \setminus \Gamma$ limitata

³Pensa alla somma di 1-cicli singolari

⁴Vedi teorema dei residui.

7.3 Criteri di esistenza di orbite periodiche

Per trovare esplicitamente orbite periodiche possiamo provare a passare alle coordinate polari

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ \dot{y} = g(x, y) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \dot{\rho} = \frac{x\dot{x} + y\dot{y}}{\rho} \\ \dot{\theta} = \frac{x\dot{y} - y\dot{x}}{\rho^2} \end{cases}$$

dove nel secondo sistema dobbiamo ricordarci $x = \rho \cos \theta$ e $y = \rho \sin \theta$. Per semplicità scriviamo

$$\begin{cases} \dot{\rho} = h(\rho, \theta) \\ \dot{\theta} = \ell(\rho, \theta) \end{cases}$$

Un'orbita periodica può essere della forma particolare $\{\rho = \text{cost.}\}$.

Proposizione 7.10 (Criterio polare esistenza orbita periodica).

Dato un sistema in coordinate polari, se esiste $c > 0$ tale che per ogni θ valgono $\dot{\rho}|_{\rho=c} = 0$ e $\dot{\theta}|_{\rho=c} \neq 0$ allora $\{\rho = c\}$ è un'orbita periodica.

Dimostrazione.

Segue dal criterio sull'invarianza di curve di livello (1.10) applicato alla mappa $(\rho, \theta) \mapsto \rho$ unito all'assenza di punti fissi. \square

Un problema cruciale di questo risultato è che la minima perturbazione annichila le ipotesi.

7.3.1 Teorema di Poincaré-Bendixon

Definizione 7.11 (Sezione locale di data larghezza).

Sia $y \in \mathbb{R}^2$ tale che $F(y) \neq 0$. Se $\ell(y) = \text{Span}(v) + y$ è la retta passante per y ortogonale a $F(y)$, fissato un $k \in (0, 1)$ definiamo la **sezione locale di larghezza k** per y come⁵

$$S_k(y) = \text{comp. conn. contenente } y \text{ di } \left\{ z \in \ell(y) \mid \left| \widehat{\sin(v, F(z))} \right| > k \right\}.$$

Lemma 7.12 (Rettificazione locale).

Dato $y \in \mathbb{R}^2$ tale che $F(y) \neq 0$ consideriamo la parametrizzazione di $\ell(y)$ data da $\gamma(u) = y + uv$ al variare di $u \in \mathbb{R}$. Affermiamo che esistono V e U intorni di y e 0 rispettivamente e un diffeomorfismo $\psi : U \rightarrow V$ tale che $\psi(s, u) = \phi_s(\gamma(u))$.

Dimostrazione.

NON DATA DURANTE IL CORSO. \square

Definizione 7.13 (Rettangolo di flusso).

Sia $\psi : U \rightarrow V$ un diffeomorfismo di rettificazione locale. Fissiamo $\sigma > 0$, $\chi > 0$ tali che

$$N_{\sigma, \chi} = \{(s, u) \in \mathbb{R}^2 \mid |s| \leq \sigma, |u| \leq \chi\} \subseteq U.$$

Definiamo il **rettangolo di flusso** per questa scelta di σ e χ come $\mathcal{N}_{\sigma, \chi} = \psi(N_{\sigma, \chi})$.

Lemma 7.14 (Sui rettangoli di flusso).

Se $\mathcal{N}_{\sigma, \chi}$ è un rettangolo di flusso allora $\mathcal{N}_{\sigma, \chi}$ è un intorno di y tale che per ogni $z \in \mathcal{N}_{\sigma, \chi}$ esiste $\bar{t}(z) \in (-\sigma, \sigma)$ tale che $\phi_{\bar{t}}(z) \in \psi(\{0\} \times (-\chi, \chi))$.

⁵dati due vettori v e w , con $\widehat{v, w}$ intendiamo l'angolo minore tra essi nel piano generato da v e w

Dimostrazione.

NON DATA DURANTE IL CORSO. □

Osservazione 7.15.

Se sceglieremo rettangoli di flusso abbastanza piccoli possiamo scrivere $S_k(y)$ al posto di $\psi(\{0\} \times (-\chi, \chi))$.

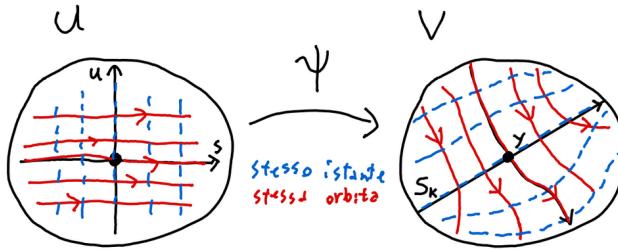


Figura 7.1: Rappresentazione di come agisce una ψ rettificazione locale come sopra.

Teorema 7.16 (Poincaré-Bendixon).

Sia $\dot{x} = F(x)$ con $F \in C^1(\mathbb{R}^2)$. Supponiamo che esista $D \subseteq \mathbb{R}^2$ compatto non vuoto che non contiene punti fissi e per il quale esiste $x_0 \in D$ tale che per qualche $t_0 > 0$ abbiamo $\phi_t(x_0) \in D$ per ogni $t \geq t_0$.

Allora $\Gamma = \omega(x_0) \subseteq D$ è un'orbita periodica.

Dimostrazione.

Sia $x_0 \in \mathbb{R}^2$ per cui esiste $t_0 > 0$ tale che $\phi_t(x_0) \in D$ per ogni $t \geq t_0$. Allora $\omega(x_0)$ è non vuoto, invariante e $\omega(x_0) \subseteq D$ per (1.17). Scelto $x \in \omega(x_0) \subseteq D$ allora $\mathcal{O}^+(x) \subseteq \omega(x_0)$ e quindi $\omega(x) \subseteq \omega(x_0)$. Sia $y \in \omega(x)$

Claim: $\#(S_k(y) \cap \mathcal{O}^+(x)) = 1$.

Dimostrazione del claim.

Mostriamo prima che l'intersezione è non vuota e poi mostriamo che contiene un'unico punto.

- Per definizione di $\omega(x)$ esiste una successione monotona $t_k \nearrow +\infty$ tale che $\phi_{t_k}(x) \rightarrow y$. Poiché $\mathcal{N}_{\sigma, \chi}$ è un intorno di y , per definizione di convergenza esiste $\bar{t} > \sigma$ tale che $\phi_{\bar{t}}(x) \in \mathcal{N}_{\sigma, \chi}$. Per il lemma sui rettangoli di flusso (7.14) esiste $\hat{t} \in (-\sigma, \sigma)$ tale che $\phi_{\hat{t}}(\phi_{\bar{t}}(x)) \in S_k(y)$. Ponendo $\hat{t} + \bar{t} = \tilde{t} > 0$ tale che $\phi_{\tilde{t}}(x) \in S_k(y)$.
- ! Supponiamo per assurdo che esistano $x_1, x_2 \in S_k(y) \cap \mathcal{O}^+(x) \subseteq \omega(x_0)$ distinti. Per definizione di ω -limite esistono $\tau_j^1 \nearrow +\infty$ e $\tau_j^2 \nearrow +\infty$ tali che

$$\lim_{j \rightarrow +\infty} \phi_{\tau_j^1}(x_0) = x_1, \quad \lim_{j \rightarrow +\infty} \phi_{\tau_j^2}(x_0) = x_2.$$

Esistono dunque definitivamente per il lemma sui rettangoli di flusso (7.14) $\tilde{\tau}_j^1$ e $\tilde{\tau}_j^2$ tali che $\phi_{\tilde{\tau}_j^i}(x_0) \in S_k(y)$ ⁶. Siano U_1 e U_2 intorni di x_1 e x_2 disgiunti. Per j abbastanza grande abbiamo che $\phi_{\tilde{\tau}_j^i}(x_0) \in U_i$.

Poiché sia $\tilde{\tau}_j^1$ che $\tilde{\tau}_j^2$ vanno a $+\infty$, esistono $\xi_1 < \xi_2 < \xi_3$ tali che

$$\phi_{\xi_1}(x_0) \in U_1, \quad \phi_{\xi_2}(x_0) \in U_2, \quad \phi_{\xi_3}(x_0) \in U_1.$$

⁶ $\tilde{\tau}_j^i \in (\tau_j^i - \sigma, \tau_j^i + \sigma)$

Sia $\tilde{\Gamma}$ la curva chiusa data da

$$\tilde{\Gamma} = \{\alpha\phi_{\xi_1}(x_0) + (1 - \alpha)\phi_{\xi_2}(x_0) \mid \alpha \in [0, 1]\} \cup \bigcup_{s \in (\xi_1, \xi_2)} \phi_s(x_0).$$

Per definizione di $S_k(y)$ e per unicità locale si ha che $\mathcal{O}^+(\phi_{\xi_2}(x_0))$ è contenuto nella componente连通的 limitata definita da $\tilde{\Gamma}$, ma questo è assurdo perché esiste $\Delta t = \xi_3 - \xi_2$ tale che $\phi_{\Delta t}(\phi_{\xi_2}(x_0)) = \phi_{\xi_3}(x_0)$ ma per definizione di $S_k(y)$ un'orbita che parte da $S_k(y)$ torna a $S_k(y)$ dal lato opposto rispetto a quello di partenza.

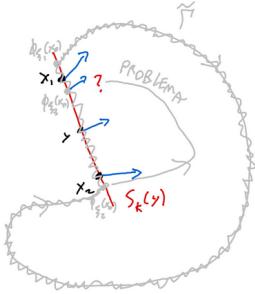


Figura 7.2: Rappresentazione grafica dell'assurdo trovato.

□

Sia $y \in \omega(x)$ e sia $\tilde{t} > 0$ tale che $\phi_{\tilde{t}}(x) \in S_k(y)$ (esiste per il primo punto del claim). Sappiamo che esiste $\tau > \tilde{t}$ tale che $\phi_\tau(x) \in \mathcal{N}_{\sigma, \chi}$ (convergenza di successioni). Esiste dunque per il lemma (7.14) un $\tilde{\tau} \in (-\sigma, \sigma)$ tale che $\phi_{\tau+\tilde{\tau}}(x) \in S_k(y)$ e per il secondo punto del claim $\phi_{\tau+\tilde{\tau}}(x) = \phi_{\tilde{t}}(x)$, dunque $\Gamma = \mathcal{O}(x)$ è periodica.

Osserviamo che $\Gamma \subseteq \omega(x_0)$ per costruzione. Mostriamo l'altro contenimento:
Sia $z \in \omega(x_0)$ e notiamo che

$$z = \lim_j \phi_{t_j}(x_0), \quad x = \lim_h \phi_{\tau_h}(x_0).$$

Ponendo $j(0) = 0$, sia $j(h+1)$ il più piccolo intero tale che $t_{j(h+1)} > t_{j(h)} + \tau_{h+1} - \tau_h + 1$. Con questa scelta $t_{j(h)} - \tau_h \nearrow +\infty$. Notiamo che $\{\phi_{t_j(h)-\tau_h}(x)\} \subseteq \mathcal{O}(x)$ e che $\mathcal{O}(x)$ è compatto, quindi esiste una sottosuccessione convergente $\{\phi_{t_{j(h_k)}-\tau_{h_k}}(x)\}$. Calcoliamo il limite

$$\begin{aligned} \lim_k \phi_{t_j(h_k)-\tau_{h_k}}(x) &= \lim_k \lim_\ell \phi_{t_j(h_k)-\tau_{h_k}+\tau_\ell}(x_0) \stackrel{\text{sottosucc.}}{=} \\ &= \lim_k \phi_{t_j(h_k)-\tau_{h_k}+\tau_{h_k}}(x_0) = \lim_k \phi_{t_j(h_k)}(x_0). \end{aligned}$$

Poiché $\{\phi_{t_j(h_k)}(x_0)\}$ è una sottosuccessione di $\{\phi_{t_j}(x_0)\}$ e questa converge a z , anche il limite cercato converge a z . Questo mostra che $z \in \omega(x)$ e, poiché $\mathcal{O}(x)$ è un'orbita periodica, si ha $\mathcal{O}(x) = \omega(x)$ e quindi $z \in \mathcal{O}(x)$ come voluto. □

Osservazione 7.17.

Osserviamo che D come nel teorema di Poicaré-Bendixon non può essere semplicemente connesso per la teoria dell'indice.

Osservazione 7.18 (Tipico uso di Poincaré-Bendixon).

Nel contenuto di esercizi, spesso il teorema di Poincaré-Bendixon come segue:

- Ci mettiamo in coordinate polari centrate in un punto fisso instabile isolato.
- Verifichiamo che esistono $0 < \rho_0 < \rho_1$ tali che $\{\rho_0 \leq \rho \leq \rho_1\}$ non contiene punti fissi e (generalmente)

$$\dot{\rho}|_{\rho=\rho_0} > 0, \quad \dot{\rho}|_{\rho=\rho_1} < 0.$$

Fatto 7.19 (Poincaré-Bendixon generale).

Se per x_0 esiste $t_0 > 0$ tale che $\phi_t(x_0) \in D$ per ogni $t \geq t_0$ con D non vuoto e compatto allora $\omega(x_0)$ può essere

- punto fisso
- orbita periodica
- unione di punti fissi e orbite eterocline
- punto fisso e orbita omoclinica

Esempio 7.20.

Consideriamo il sistema

$$\begin{cases} \dot{\rho} = \rho(1 - \rho^2) + \varepsilon f(x, y) \\ \dot{\theta} = 1 + \varepsilon g(x, y) \end{cases}$$

Se $f, g \in C^1$ allora esiste $\varepsilon_0 > 0$ tale che per ogni $\varepsilon < \varepsilon_0$ esiste un'orbita periodica.

Proviamo a definire

$$D = \{\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2\}$$

Osserviamo che nel caso non perturbato, per $\rho < 1$ allora $\dot{\rho} > 0$ mentre per $\rho > 1$ allora $\dot{\rho} < 0$.

Sia $M = \max \left\{ \|f|_{\{\rho \leq 5\}}\|_{\infty}, \|g|_{\{\rho \leq 5\}}\|_{\infty} \right\}$ (dove 5 è un qualche valore “grosso”).

Proviamo a definire $D = \left\{ \frac{1}{2} \leq \rho \leq 2 \right\}$.

$\dot{\rho}|_{\rho=\frac{1}{2}} = \frac{3}{8} + \varepsilon f(\frac{1}{2}, \theta) \geq \frac{3}{8} - \varepsilon M$ e questo è maggiore di 0 per $\varepsilon < \frac{3}{8M}$. Similmente per $\dot{\rho}|_{\rho=2}$ chiediamo $\varepsilon < \frac{6}{M}$. Cerchiamo allora stime tali che $\dot{\theta}|_{\left\{ \frac{1}{2} \leq \rho \leq 2 \right\}} \neq 0$ e dopo conti simili troviamo che $\varepsilon_0 = \frac{3}{8M}$ rispetta tutte le condizioni volute.

Capitolo 8

Esempi di sistemi dinamici continui

8.1 Alcuni sistemi meccanici

8.1.1 L'oscillatore armonico

Consideriamo l'equazione

$$\ddot{x} = -kx$$

con $k > 0$ e $x \in \mathbb{R}$.

Studiamo il sistema equivalente

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = -kx \end{cases}$$

con $(x, y) \in \mathbb{R}^2$ e $F(x, y) = (y, -kx)$.

- **Punti fissi:** $(y, -kx) = (0, 0) \implies (x, y) = (0, 0)$, quindi abbiamo un solo punto fisso.
- Questo è evidentemente un sistema meccanico con $V(x) = \frac{k}{2}x^2$, da cui $E(x, y) = \frac{1}{2}y^2 + \frac{k}{2}x^2$ è l'Hamiltoniana.
- Sia $E_c = \{\frac{1}{2}y^2 + \frac{k}{2}x^2 = c\}$. Questi insiemi sono evidentemente ellissi. Descrivono veramente orbite periodiche? Sì, infatti se per assurdo non fossero orbite periodiche, poiché le orbite che cominciano in uno di questi insiemi sono costrette a rimanervi, per compattezza di E_c dovremmo avere

$$\ell = \lim_{t \rightarrow +\infty} \phi_t(x_0) \in E_c$$

per $x_0 \in E_c$, ma questo significa che ℓ sarebbe un punto fisso, che è assurdo perché l'unico punto fisso è $(0, 0)$.

8.1.2 Pendolo semplice

L'equazione in esame è

$$\ddot{\theta} = -\frac{g}{\ell} \sin \theta.$$

Riformuliamo in

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \psi \\ \dot{\psi} = -\frac{g}{\ell} \sin \theta \end{cases}$$

Punti fissi:

$\psi = 0$ e $\sin \theta = 0$, dunque

$$pt. fix = \{(k\pi, 0) \mid k \in \mathbb{Z}\}.$$

Integrale primo:

Anche questo è un sistema meccanico, che quindi ammette Hamiltoniana

$$E(\theta, \dot{\theta}) = \frac{1}{2}\dot{\theta}^2 - \frac{g}{\ell} \cos \theta,$$

dunque gli insiemi di livello che ci interessano sono

$$E_c = \left\{ \frac{1}{2}\psi^2 - \frac{g}{\ell} \cos \theta = c \right\}.$$

Osserviamo che

$$E(k\pi, 0) = -\frac{g}{\ell} \cos(k\pi) = (-1)^{k+1} \frac{g}{\ell} \implies E(2\pi, 0) = E(-2\pi) = E(0, 0).$$

$$E_{-\frac{g}{\ell}} = \left\{ \frac{1}{2}\psi^2 - \frac{g}{\ell} \cos \theta = -\frac{g}{\ell} \right\} \implies \psi^2 = -2\frac{g}{\ell}(1 - \cos \theta)$$

$$E_{\frac{g}{\ell}} = \left\{ \frac{1}{2}\psi^2 - \frac{g}{\ell} \cos \theta = \frac{g}{\ell} \right\} \implies \psi^2 = 2\frac{g}{\ell}(1 + \cos \theta)$$

Se $c \in (-\frac{g}{\ell}, \frac{g}{\ell})$ troviamo orbite periodiche contenute dentro le ordine dei primi due. Per $c \notin [-\frac{g}{\ell}, \frac{g}{\ell}]$ abbiamo invece ordine tutte sopra o tutte sotto.

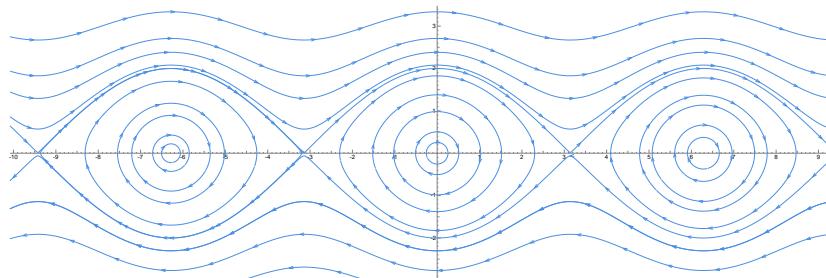


Figura 8.1: Diagramma di fase del pendolo per $\frac{g}{\ell} = 1$

8.2 Dinamica di Lotka-Volterra

Possiamo modellare una singola popolazione in modo semplice con l'equazione (detta *equazione logistica*)

$$\dot{x} = x(c - ax), \quad a, c > 0.$$

Ponendo $F(x) = xc - ax^2$ si ha che $F(x) = 0 \implies x = 0$ oppure $x = c/a$.

Inserendo nel sistema una seconda popolazione che più interagire con la prima troviamo il sistema

$$\begin{cases} \dot{x} = x(c_1 - a_1x - b_1y) \\ \dot{y} = y(c_2 - a_2y - b_2x) \end{cases}.$$

Osserviamo che gli assi sono invarianti. A meno di riscalamento possiamo considerare il sistema

$$\begin{cases} \dot{x} = x(1 - x - \alpha y) \\ \dot{y} = y(1 - \beta x - y) \end{cases}$$

Troviamo come punti fissi $(0, 0)$, $(1, 0)$, $(0, 1)$ e

$$P = \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha\beta - 1}, \frac{\beta - 1}{\alpha\beta - 1} \right).$$

Osserviamo che $P \in \{x > 0, y > 0\}$ se e solo se $\alpha > 1$ e $\beta > 1$ o $0 < \alpha < 1$ e $0 < \beta < 1$. Calcoliamo ora $\mathcal{D}F$

$$\mathcal{D}F = \begin{pmatrix} 1 - 2x - \alpha y & -\alpha x \\ -\beta y & 1 - \beta x - 2y \end{pmatrix}.$$

Segue che

$$\begin{aligned} \mathcal{D}F((0, 0)) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \\ \mathcal{D}F((1, 0)) &= \begin{pmatrix} -1 & -\alpha \\ 0 & 1 - \beta \end{pmatrix}, \quad \mathcal{D}F((0, 1)) = \begin{pmatrix} 1 - \alpha & 0 \\ -\beta & -1 \end{pmatrix}, \\ \mathcal{D}F(P) &= \frac{1}{\alpha\beta - 1} \begin{pmatrix} 1 - \alpha & \alpha(1 - \alpha) \\ \beta(1 - \beta) & 1 - \beta \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

Esempio 8.1.

Consideriamo il modello Lotka-Volterra dato da $\alpha = 2$ e $\beta = 2$, cioè

$$\begin{cases} \dot{x} = x(1 - x - 2y) \\ \dot{y} = y(1 - 2x - y) \end{cases}$$

Per quanto detto sopra i punti fissi sono

$$(0, 0), (1, 0), (0, 1), \left(\frac{1}{3}, \frac{1}{3} \right),$$

che nominiamo rispettivamente P_0 , P_1 , P_2 e P_3 .

Segue che P_0 è una stella instabile, P_1 e P_2 sono nodi impropri stabili e P_3 è una sella. Gli autovettori di $\mathcal{D}F(P_3) = -\frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$ sono $v_+ = (1 - 1)^T$ e $v_- = (1 1)^T$, corrispondenti agli autovalori $1/3$ e -1 rispettivamente. Graficando il sistema possiamo effettivamente notare che le varietà instabili e stabili hanno come giacitura della retta tangente in P_3 proprio le rette generate da questi vettori.

Esempio 8.2 (Lotka-Volterra per preda-predatore).

Consideriamo il sistema

$$\begin{cases} \dot{x} = x(-1 + y) \\ \dot{y} = y(1 - x) \end{cases}$$

I punti fissi sono $(0, 0)$ e $(1, 1)$. Osserviamo anche che gli assi e tutto il primo quadrante sono insiemi invarianti. Consideriamo allora solo il primo quadrante che tanto è il

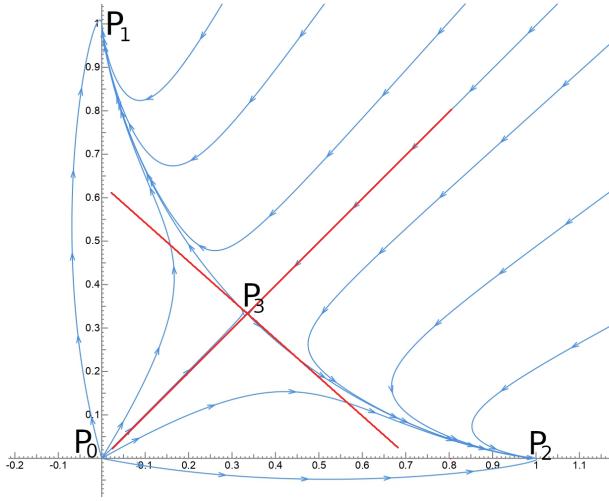


Figura 8.2: Diagramma di fase di questo sistema.
In rosso sono indicati $P_3 + \text{Span}(v_+)$ e $P_3 + \text{Span}(v_-)$.

caso interessante per questo modello.

Studiamo lo Jacobiano

$$DF(x, y) = \begin{pmatrix} -1+y & x \\ -y & 1-x \end{pmatrix} \implies DF(0, 0) = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad DF(1, 1) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

(0, 0) (0, 0) è una sella. Si ha che

$$E^s(0, 0) = \text{Span} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad E^u(0, 0) = \text{Span} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

e per il teorema delle varietà stabili locali (6.2) sappiamo che $W^s(0, 0)$ e $W^u(0, 0)$ locali esistono e sono uniche. Per l'invarianza degli assi in realtà $W^{u/s}(0, 0) = E^{u/s}(0, 0)$.

(1, 1) (1, 1) è di tipo centro e quindi non è iperbolico. Una possibile funzione di Lyapunov potrebbe avere forma

$$V(x, y) = a(x - 1)^{2n} + b(y - 1)^{2m}, \quad a, b > 0, \quad n, m \in \mathbb{N}.$$

Un altro metodo potrebbe essere studiare il punto passando a coordinate polari centrate in (1, 1).

Un'ulteriore possibilità potrebbe essere studiare il segno del campo di vettori, ma poiché (1, 1) è di tipo centro non è molto utile.

Trovare insiemi invarianti non è molto facile in questo caso.

Possiamo provare il metodo delle isocline

$$\begin{cases} \frac{dx}{dy} = \frac{y(1-x)}{x(-1+y)} \\ y(x_0) = y_0 \text{ t.c. } x_0(-1 + y_0) \end{cases}$$

È chiaro che possiamo trarre qualche beneficio dal metodo delle isocline perché l'equazione differenziale in questione è separabile

$$\frac{-1+y}{y} dy = \frac{1-x}{x} dx \implies \int_{y_0}^{y(x)} \frac{-1+y}{y} dy = \int_{x_0}^x \frac{1-x}{x} dx$$

$$y(x) - \log(y(x)) = \log y_0 - y_0 + \log x - x - \log x_0 + x_0.$$

Non posso scrivere esplicitamente $y(x)$ = “qualcosa”, ma comunque posso studiare l’equazione, infatti, poiché $\{y = y(x)\}$ è invariante (5.1) sappiamo che c’è un insieme invariante. Per identificarlo definiamo

$$I(x, y) = y - \log y + x - \log x.$$

Segue che¹

$$\dot{I}|_{I=c} = \left(1 - \frac{1}{x}\right)x(-1 + y) + \left(1 - \frac{1}{y}\right)y(1 - x) = 0,$$

cioè I è un integrale primo.

$$\nabla I(1, 1) = \begin{pmatrix} 1 - \frac{1}{x} \\ 1 - \frac{1}{y} \end{pmatrix} |_{(x,y)=(1,1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

$$H_I(x, y) = \begin{pmatrix} \frac{1}{x^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{y^2} \end{pmatrix} |_{(x,y)=(1,1)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \implies \text{minimo locale.}$$

Troviamo dunque che localmente le traiettorie sono curve semplici chiuse tali che $(1, 1)$ si trova nella componente连nessa limitata tra le due che hanno come bordo le traiettorie.

Per trovare il verso di percorrenza possiamo usare il segno del campo.

Esempio 8.3.

Un esempio semplice per i parametri del modello sopra è

$$\begin{cases} \dot{x} = x(3 - x - 2y) \\ \dot{y} = y(2 - y - x) \end{cases} \implies F(x, y) = (x(3 - x - 2y), y(2 - y - x)).$$

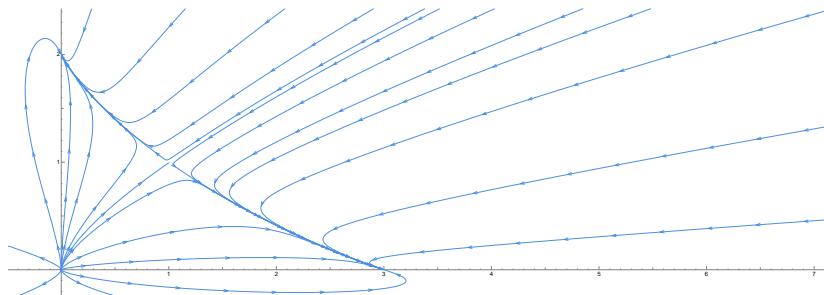


Figura 8.3: Diagramma di fase per questo esempio di Lotka-Volterra.

I punti fissi sono

$$(0, 0), (0, 2), (3, 0), (1, 1)$$

e la matrice Jacobiana di F è

$$\mathcal{D}F(x, y) = \begin{pmatrix} 3 - 2x - 2y & -2x \\ -y & 2 - x - 2y \end{pmatrix}.$$

Valutando lo Jacobiano nei punti fissi troviamo

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix}}_{\text{nodo instabile}}, \underbrace{\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ -2 & -2 \end{pmatrix}}_{\text{nodo stabile}}, \underbrace{\begin{pmatrix} -3 & -6 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}}_{\text{nodo stabile}}, \underbrace{\begin{pmatrix} -1 & -2 \\ -1 & -1 \end{pmatrix}}_{\text{sella}}.$$

¹pensando $c = \log y_0 - y_0 - \log x_0 + x_0$

8.3 Sistema di Lorenz

Un sistema storicamente importante è il seguente:

$$\begin{cases} \dot{x} = \sigma(-x + y) \\ \dot{y} = rx - y - xz \\ \dot{z} = -bz + xy \end{cases}, \quad r, b, \sigma \in \mathbb{R}^+.$$

Osserviamo che i punti fissi del sistema corrispondono a

$$P_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad P_+ = \begin{pmatrix} \sqrt{b(r-1)} \\ \sqrt{b(r-1)} \\ r-1 \end{pmatrix}, \quad P_- = \begin{pmatrix} -\sqrt{b(r-1)} \\ -\sqrt{b(r-1)} \\ r-1 \end{pmatrix},$$

dove P_{\pm} è definito solo per $r \geq 1$. Osserviamo inoltre che

$$\mathcal{D}F = \begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ r-z & -1 & -x \\ y & x & -b \end{pmatrix}.$$

Studiamo la stabilità di P_0 :

Notiamo che

$$\mathcal{D}F(P_0) = \begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ r & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{pmatrix},$$

dunque $(0, 0, 1)$ è sempre un autovettore relativo all'autovalore $-b$ per il sistema linearizzato vicino a P_0 . Il segno di $-b$ ci dice che $\dim E^s(P_0) \geq 1$. Studiamo la stabilità delle altre direzioni al variare di r

- | | |
|----------------|---|
| $r \in (0, 1)$ | In questo caso gli autovalori sono entrambi con parte reale negativa, quindi per Hartman Grobman (3.3) P_0 è asintoticamente stabile e $\dim E^s(P_0) = 3$. |
| $r > 1$ | In questo caso gli autovalori sono reali di segno opposto dunque il punto fisso è instabile per Hartman Grobman (3.3) e $\dim E^s(P_0) = 2$, $\dim E^u(P_0) = 1$. |
| $r = 1$ | In questo caso P_0 non è iperbolico dunque per predicare sulla stabilità proviamo a cercare una funzione di Lyapunov. Tentiamo una di questa forma |

$$V(x, y, z) = \frac{1}{2}(k_1 x^2 + k_2 y^2 + k_3 z^2).$$

Chiaramente V è di classe C^1 e $V(P) > V(P_0) = 0$ per ogni $P \in \mathbb{R}^3 \setminus \{P_0\}$. Cerchiamo delle condizioni sui k_i in modo tale che $\dot{V}(P) \leq 0$ per ogni $P \neq P_0$. Dopo qualche conto si può verificare che

$$V(x, y, z) = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma} x^2 + y^2 + z^2 \right)$$

è una funzione di Lyapunov (non stretta). Per il primo teorema di Lyapunov (2.7) segue che P_0 è stabile.

Per il criterio di La Salle (2.8) sappiamo che $\{\dot{V} = 0\} = \{x = y, z = 0\}$ contiene tutti gli ω -limiti e che questi sono insiemi invarianti. Poiché

$$F|_{\{x=y, z=0\}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ x^2 \end{pmatrix}$$

si ha che $\{P_0\}$ è l'unico insieme invariante contenuto in $\{\dot{V} = 0\}$, dunque tutti gli ω -limiti sono $\{P_0\}$. Questa condizione insieme alla stabilità di P_0 mostra che P_0 è asintoticamente stabile.

Attraverso conti non visti a lezione sappiamo che se $\sigma > b + 1$ e $r > \bar{r}$ per un qualche $\bar{r} > 1$ si ha che $\dim E^s(P_\pm) = 1$ e $\dim E^u(P_\pm) = 2$. Le traiettorie dunque approcciano P_+ e P_- “lateralmente” e “trasversalmente” si allontanano lungo una spirale.

Sempre attraverso conti non visti a lezione individuiamo la funzione

$$W(x, y, z) = \frac{1}{2}(rx^2 + \sigma y^2 + \sigma(z - 2r)^2),$$

il cui dot è dato da

$$\dot{W}(x, y, z) = -\sigma(rx^2 + y^2 + b(z - r)^2 - br^2).$$

Osserviamo che, fissato $k \in \mathbb{R}^+$ possiamo trovare $c \in \mathbb{R}$ tale che $\dot{W}|_{W \geq c} \leq -\sigma k < 0$: basta prendere c grande abbastanza in modo tale che i punti fuori l'ellissoide $\{W = c\}$ abbiano coordinate grandi abbastanza da forzare la disuguaglianza voluta, che possiamo fare per il segno dei termini in \dot{W} .

Osserviamo che se $y_0 \notin \{W \leq c\}$ allora

$$W(\phi_t(y_0)) - W(y_0) = \int_0^t \underbrace{\frac{d}{ds}W(\phi_s(y_0))}_{=\dot{W}} ds \leq -k\sigma t$$

finché $\phi_t(y_0)$ continua ad essere fuori l'ellissoide. Segue dunque che definitivamente $\phi_t(y_0)$ cade nell'ellissoide.

Questo ragionamento mostra che tutti i punti ammettono ω -limite, ma questo non può in generale essere un punto fisso (sono instabili) o un'orbita periodica (perché assenti dal sistema²). Si scopre che l' ω -limite generale corrisponde ad un frattale e per questo motivo viene detto *attrattore strano*.

²questa affermazione non è stata mostrata

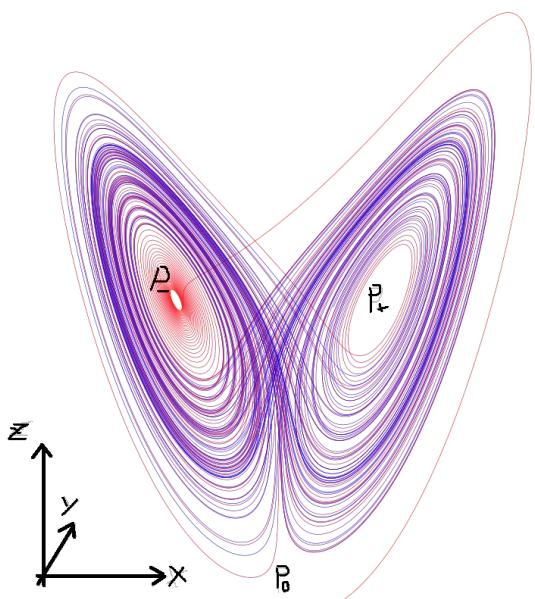


Figura 8.4: Qualche orbita del sistema di Lorenz dove sono stati contrassegnati i punti fissi. Immagine originariamente da https://en.wikipedia.org/wiki/Lorenz_system e modificata da me.

Parte II

Sistemi discreti

Capitolo 9

Basi di Dinamica Topologica

Consideriamo $T : X \rightarrow X$ con X compatto e T continua. Con la notazione T^n intendiamo sempre la n -iterata di T .

Per semplicità poniamo $\mathbb{N}^+ = \mathbb{N} \setminus \{0\}$.

9.1 Punti periodici e coniugio topologico

Definizione 9.1 (Orbita).

Sia $x \in X$, l'**orbita** di x è l'insieme

$$\mathcal{O}(x) = \{T^n(x)\}_{n \in \mathbb{N}}.$$

Definizione 9.2 (Punto periodico).

Un punto $x \in X$ è **periodico** se esiste $m \in \mathbb{N}^+$ tale che $T^m(x) = x$.

Se x è periodico chiamiamo **periodo minimo** il numero

$$p = \min \{m \in \mathbb{N}^+ \mid T^m(x) = x\}.$$

Osservazione 9.3.

Un **punto fisso** è un punto periodico di periodo minimo 1 (cioè $T(x) = x$).

Osservazione 9.4.

Se x è periodico con periodo minimo p allora $\mathcal{O}(x) = \{x, T(x), \dots, T^{p-1}(x)\}$.

Definizione 9.5 (Punti definitivamente periodici).

Un punto $x \in X$ si dice **definitivamente periodico** se esiste $m \in \mathbb{N}^+$, tale che $T^m(x)$ è periodico ma x non lo è.

Osservazione 9.6.

Il numero di punti fissi di periodo minimo p è un multiplo di p , precisamente

$$p \cdot \# \{\text{Orbite disgiunte}\}.$$

Definizione 9.7 (Coniugio topologico).

Due insiemi X_1, X_2 tali che esistano $T_1 : X_1 \rightarrow X_1$ e $T_2 : X_2 \rightarrow X_2$ continue si dicono **coniugati topologicamente** se esiste $\varphi : X_1 \rightarrow X_2$ omeomorfismo tale che $\varphi \circ T_1 = T_2 \circ \varphi$, cioè commuta il diagramma

$$\begin{array}{ccc} X_1 & \xrightarrow{T_1} & X_1 \\ \varphi \downarrow & & \varphi \downarrow \\ X_2 & \xrightarrow{T_2} & X_2 \end{array}$$

Osservazione 9.8.

Con la notazione sopra, segue che $\varphi \circ T_1^n = T_2^n \circ \varphi$, quindi due sistemi coniugati topologicamente hanno la stessa dinamica.

Definizione 9.9 (Insieme invariante).

Sia (X, T, \mathbb{N}) un sistema discreto. $A \subseteq X$ è **positivamente invariante** se $T(A) \subseteq A$ e **invariante** se $T(A) = A$.

Osservazione 9.10.

A volte (fuori da questo corso) può essere utile definire l'invarianza come

$$T^{-1}(A) = A.$$

Questa nozione NON è equivalente alla precedente.

Definizione 9.11 (ω -limite).

Definiamo l' **ω -limite** di x come

$$\omega(x) = \left\{ y \in X \mid \exists n_k \nearrow +\infty \text{ t.c. } \lim_{k \rightarrow +\infty} T^{n_k}(x) = y \right\}.$$

Similmente definiamo l' **α -limite**.

Supponiamo da ora in poi che $X \subseteq \mathbb{R}^k$ per qualche k .

Proposizione 9.12 (Orbita limitata restituisce ω compatto invariante).

Se $\mathcal{O}(x)$ è limitata allora $\omega(x)$ è un compatto non vuoto. Se T è continua allora $\omega(x)$ è invariante.

Dimostrazione.

Come nel teorema (1.17) ricaviamo che $\omega(x) = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \overline{\mathcal{O}(T^n(x))}$ da cui segue compattezza e $\omega(x) \neq \emptyset$.

Mostriamo l'invarianza:

\$T(\omega(x)) \subseteq \omega(x)\$ Se $y \in \omega(x)$ allora troviamo una successione di istanti tale che $T^{n_k}(x) \rightarrow y$, dunque

$$T(y) = T(\lim T^{n_k}(x)) \stackrel{T \text{ cont.}}{\equiv} \lim T^{n_k+1}(x) \in \omega(x).$$

\$T(\omega(x)) \supseteq \omega(x)\$ Se $y \in \omega(x)$ allora troviamo una successione crescente di istanti tale che $T^{n_k}(x) \rightarrow y$. Poiché $\{T^{n_k-1}(x)\} \subseteq \mathcal{O}(x)$, per il teorema di Bolzano-Weierstrass esiste una sottosuccessione k_j tale che $T^{n_{k_j}-1}(x) \rightarrow z \in \overline{X}$. Per definizione di ω -limite $z \in \omega(x)$ e

$$T(z) = T(\lim T^{n_{k_j}-1}(x)) = \lim T^{n_{k_j}}(x) = y$$

dove l'ultimo passaggio segue dal fatto che $T^{n_{k_j}}(x)$ è una sottosuccessione di $T^{n_k}(x)$.

□

Capitolo 10

Stabilità locale dei punti fissi

Definizione 10.1 (Punto attrattivo/repulsivo).

Un punto fisso $x \in X$ si dice **attrattivo** se esiste un intorno U di x tale che per ogni $y \in U$ si ha che $\{T^n(y)\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq U$ e $\lim_{n \rightarrow +\infty} T^n(y) = x$.

L'intorno U come sopra è un **bacino di attrazione**.

Un punto fisso $x \in X$ si dice **repulsivo** se esiste un intorno U di x tale che per ogni $y \in U \setminus \{x\}$ esiste $n(y) \in \mathbb{N}$ tale che $T^{n(y)}(y) \notin U$.

Definizione 10.2 (Semi-atrattività).

Supponiamo che $X = [0, 1]$. Un punto fisso è **semi-attrattivo** o **semi-repulsivo** se è attrattivo da un lato e repulsivo dall'altro.

Definizione 10.3 (Orbita attrattiva/repulsiva).

Sia x punto periodico di periodo minimo p , allora $\mathcal{O}(x) = \{x, \dots, T^{p-1}(x)\}$ è **attrattiva** (rispettivamente **repulsiva**) se x è attrattivo (rispettivamente repulsivo) per T^p .

10.1 Punti iperbolici

Definizione 10.4 (Punto iperbolico).

Supponiamo che $X \in \{[0, 1], S^1, \mathbb{R}, (a, b), [a, b), (a, b]\}$ e $T \in C^1(X, X)$. Un punto fisso $x \in X$ si dice **iperbolico** se $|T'(x)| \neq 1$ ¹.

Proposizione 10.5 (Relazione tra punti iperbolici e attrattività).

Sia $T \in C^1(X, X)$ e x un punto fisso iperbolico. Allora

$$\begin{aligned} |T'(x)| < 1 &\implies x \text{ è attrattivo} \\ |T'(x)| > 1 &\implies x \text{ è repulsivo}. \end{aligned}$$

Dimostrazione.

Studiamo i due casi

$|T'(x)| < 1$ Sia $c \in (|T'(x)|, 1)$ e consideriamo $\delta > 0$ tale che $|T'(y)| \leq c$ per ogni $y \in [x - \delta, x + \delta]$.
Sia ora $y \in (x - \delta, x + \delta)$, segue che esiste $\xi \in (x, y)$ tale che

$$|T(y) - x| = |T'(\xi)| |y - x| \leq c |y - x|.$$

¹L'idea è che $T(y) - x = T(y) - T(x) = T'(x)(y - x) + o(y - x)$, dunque se $|T'(x)| \neq 1$ allora il termine lineare ci dice se per y abbastanza vicino a x vale $|T(y) - x| > |y - x|$ o viceversa.

Segue in particolare che $T(y) \in (x - \delta, x + \delta)$. Ripetendo questo procedimento si ha che $|T^2(y) - x| \leq c |T(y) - x| \leq c^2 |y - x|$. Procedendo per induzione

$$|T^n(y) - x| \leq c^n |y - x| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0,$$

cioè x è attrattivo con bacino di attrazione $(x - \delta, x + \delta)$.

$|T'(x)| < 1$ Sia $c \in (1, |T'(x)|)$ e sia $\delta > 0$ tale che $|T'(y)| \geq c$ per ogni $y \in [x - \delta, x + \delta]$. Consideriamo ora $y \in (x - \delta, x + \delta)$. Supponiamo per assurdo che $T^n(y) \in (x - \delta, x + \delta)$ per ogni n . Con un ragionamento analogo a prima ricaviamo

$$\delta > |T^n(y) - x| \geq c^n |y - x| \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} +\infty,$$

che è assurdo.

□

10.2 Criteri per punti non iperbolici

Risulterà utile per alcuni conti la seguente

Osservazione 10.6 (Derivata delle iterate).
Osserviamo che

$$\begin{aligned} (T^p)'(x) &= \frac{d}{dx} (T^{p-1}(T(x))) = (T^{p-1})'(T(x))T'(x) = \\ &= ((T^{p-2})'(T(T(x)))T'(T(x)))T'(x) = \dots \\ &\dots = \underbrace{(T^{p-p})'(T^p(x))}_{=1} \prod_{k=0}^{p-1} T'(T^k(x)) = \\ &= \prod_{k=0}^{p-1} T'(T^k(x)). \end{aligned}$$

In particolare se x è un punto di periodo p segue riordinando i fattori della formula sopra che $(T^p)'(T^k(x)) = (T^p)'(x)$.

Supponendo una opportuna regolarità di T possiamo estrapolare il comportamento di alcuni punti non iperbolici.

Proposizione 10.7 (Criterio per punti fissi non iperbolici con derivata positiva).
Sia x_0 un punto fisso per $T : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ con $T \in C^3$ e $T'(x_0) = 1$. Allora

- se $T''(x_0) \neq 0$ il punto x_0 è semi-attrattivo.
- se $T''(x_0) = 0$ allora

$$\begin{aligned} T'''(x_0) > 0 &\implies x_0 \text{ repulsivo} \\ T'''(x_0) < 0 &\implies x_0 \text{ attrattivo} \end{aligned}$$

Dimostrazione.

La dimostrazione segue immediatamente dei seguenti disegni:

□

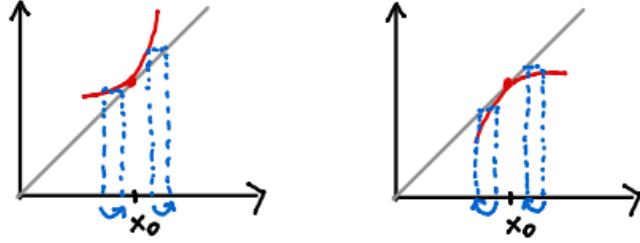


Figura 10.1: Caso $T''(x_0) \neq 0$. A sinistra il caso di $T''(x_0) > 0$ e a destra $T''(x_0) < 0$

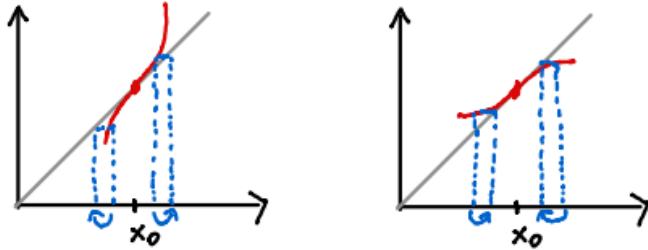


Figura 10.2: Caso $T''(x_0) = 0$ e $T'''(x_0) \neq 0$. A sinistra il caso di $T'''(x_0) > 0$ e a destra l'altro.

Definizione 10.8 (Derivata Schwarziana).

Sia $T \in C^3$, definiamo la sua **derivata Schwarziana** come

$$ST(x) = \frac{T'''(x)}{T'(x)} - \frac{3}{2} \left(\frac{T''(x)}{T'(x)} \right)^2.$$

Proposizione 10.9 (Criterio per punti fissi non iperbolici con derivata negativa).

Sia x_0 un punto fisso e sia $T \in C^3$ tale che $T'(x_0) = -1$. Allora

$$x_0 \text{ è } \begin{cases} \text{attrattivo} & \text{se } ST(x_0) < 0 \\ \text{repulsivo} & \text{se } ST(x_0) > 0 \end{cases}$$

Dimostrazione.

Sia $f = T^2$. Poiché x_0 è un punto fisso di T $f(x_0) = T(T(x_0)) = T(x_0) = x_0$. Calcolando

$$\begin{aligned} f'(x_0) &= T'(T(x_0))T'(x_0) = (T'(x_0))^2 = (-1)^2 = 1 \\ f''(x_0) &= T''(T(x_0))(T'(x_0))^2 + T'(T(x_0))T''(x_0) = T''(x_0) - T''(x_0) = 0 \\ f'''(x_0) &= T'''(x_0)(T'(x_0))^3 + 2T'(x_0)T''(x_0)T''(T(x_0)) + \\ &\quad + T''(T(x_0))T'(x_0)T''(x_0) + T'(T(x_0))T'''(x_0) = \\ &= -T'''(x_0) - 2(T''(x_0))^2 - (T''(x_0))^2 - T'''(x_0) = \\ &= 2 \left(\frac{T'''(x_0)}{-1} - \frac{3}{2} \left(\frac{T''(x_0)}{-1} \right)^2 \right) = 2ST(x_0) \end{aligned}$$

e quindi il segno di $f'''(x_0)$ è lo stesso di $ST(x_0)$. Per il secondo punto del criterio precedente (10.7), x_0 rispetta le condizioni di attrattività o repulsività volute per f^2 ².

□

²Nel caso della repulsività questo conclude. Per l'attrattività notiamo che la convergenza continua a valere per T ma è necessario fare attenzione all'intervallo nella definizione di punto attrattivo. La trattazione rigorosa di questo caso non è stata data a lezione.

Capitolo 11

Orbite periodiche

In questa sezione supponiamo che X sia uno spazio metrico compatto di dimensione 1 (cioè $X = [0, 1]$ o $X = S^1$ a meno di omeomorfismo).

Osservazione 11.1.

Le orbite con periodo p corrispondono a punti fissi di T^p .

11.1 Partizioni e T -grafo

Definizione 11.2 (Partizione finita).

Sia $\{a_1, \dots, a_N\}$ un insieme finito di punti di X e per ogni h definiamo $J_h = [a_h, a_{h+1}]$. L'insieme $\mathcal{J} = \{J_h\}$ è una **partizione finita** di X in intervalli se $X = \bigcup_{h=0}^{N-1} J_h$ e

$$J_h \cap J_k = \begin{cases} J_h & \text{se } k = h \\ a_h & \text{se } k = h - 1 \\ a_k & \text{se } k = h + 1 \\ \emptyset & \text{altrimenti} \end{cases}.$$

Definizione 11.3 (Coprire un intervallo m volte).

Sia m un intero positivo e $T : X \rightarrow X$ continua. Un intervallo J_h **ricopre** un intervallo J_k (**almeno**) m **volte** se esistono K_1, \dots, K_m intervalli aperti disgiunti in J_h tali che $T(K_i) = J_k$ per ogni $i \in \{1, \dots, m\}$.

In particolare J_h **ricopre** J_k se esiste $K \subseteq J_h$ intervallo aperto tale che $T(\overline{K}) = J_k$.

Definizione 11.4 (T -grafo associato a partizione).

Data una partizione $\mathcal{J} = \{J_1, \dots, J_N\}$ finita in intervalli chiusi, definiamo il **T -grafo associato a \mathcal{J}** come il grafo orientato che ha come vertici gli indici $\{1, \dots, N\}$ e collegiamo due vertici con una freccia orientata $m : h \rightarrow k$ se J_h ricopre J_k almeno una volta.

Osservazione 11.5.

È possibile definire una variante graduata del T -grafo dove il grado di $h \rightarrow k$ registra quante volte J_h ricopre J_k .

Definizione 11.6 (Cammino ammissibile su T -grafo).

Un **cammino ammissibile** sul T -grafo associato ad una partizione \mathcal{J} è una successione di intervalli di \mathcal{J} tale che la sequenza di indici ha la proprietà che due indici successivi hk possono presentarsi solo se esiste una freccia orientata $h \rightarrow k$ nel T -grafo associato (cioè solo se J_h ricopre J_k almeno una volta).

Esempio 11.7 (Un T -grafo).

Consideriamo una funzione $T : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ data da Il T -grafo associato è¹

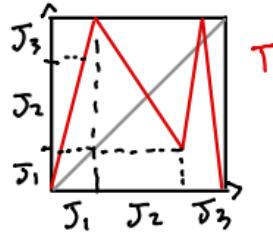
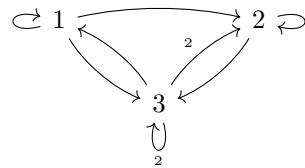


Figura 11.1: Esempio di una funzione. Notiamo che J_1 ricopre J_1 , J_2 e J_3 , J_2 ricopre J_2 e J_3 e J_3 ricopre J_1 , J_2 e J_3 .



Un esempio di cammino ammissibile è $J_1 J_2 J_3 J_3 J_1 J_1$, mentre $J_1 J_2 J_1$ non è ammissibile perché J_2 non ricopre J_1 .

Proposizione 11.8 (Criterio con grafo per esistenza di orbite periodiche).

Sia $T : X \rightarrow X$ continua, X compatto di dimensione 1 e $\mathcal{J} = \{J_1, \dots, J_N\}$ partizione finita di X . Considerando il T -grafo associato a \mathcal{J} , se esiste un cammino ammissibile

$$J_{p(1)} J_{p(2)} \cdots J_{p(s+1)}$$

di lunghezza $s + 1$ chiuso (cioè $p(1) = p(s + 1)$) allora esiste $x \in J_{p(1)}$ tale che $T^s(x) = x$ e $T^i(x) \in J_{p(i+1)}$ per ogni i .

Dimostrazione.

Poniamo $\bar{K}_{s+1} = J_{p(s+1)}$. Poiché il cammino è ammissibile, $J_{p(s)}$ copre $J_{p(s+1)}$ almeno una volta, quindi esiste $K_s \subseteq J_{p(s)}$ tale che $T(\bar{K}_s) = J_{p(s+1)} = \bar{K}_{s+1}$.

Similmente esiste $\tilde{K}_{s-1} \subseteq J_{p(s-1)}$ tale che $T(\tilde{K}_{s-1}) = J_{p(s)}$, quindi restringendo opportunamente troviamo un intervallo $K_{s-1} \subseteq J_{p(s-1)}$ tale che

$$T(\bar{K}_{s-1}) = \bar{K}_s \subseteq J_{p(s)}.$$

Reiterando costruiamo K_1, \dots, K_s aperti in X tali che $K_i \subseteq J_{p(i)}$ e $T(\bar{K}_i) = \bar{K}_{i+1}$ (in particolare $T^{s-i+1}(\bar{K}_i) = \bar{K}_{s+1}$). Questo mostra che $T^s(\bar{K}_1) = \bar{K}_{s+1} = J_{p(s+1)} = J_{p(1)}$, quindi per il teorema del valore intermedio $T^s|_{\bar{K}_1}$ ha un punto fisso, cioè esiste $x \in \bar{K}_1 \subseteq J_{p(1)}$ tale che $T^s(x) = x$.

Per concludere basta osservare che per costruzione $T^i(x) \in \bar{K}_{i+1} \subseteq J_{p(i+1)}$. \square

Osservazione 11.9.

È possibile che il punto fisso di periodo s trovato abbia periodo minimo che divide strettamente s .

¹i numeri sulle frecce indicano quante volte un intervallo ricopre un altro

Osservazione 11.10 (Criterio di esistenza per periodi minimi).

Se il cammino NON è della forma

$$\underbrace{(J_{p(1)} J_{p(2)} \cdots J_{p(k)})}_{s/k \text{ volte}} \cdots \underbrace{(J_{p(1)} J_{p(2)} \cdots J_{p(k)})}_{s/k \text{ volte}} J_{p(1)}$$

allora il punto x trovato nel teorema ha periodo *minimo s*.

In particolare se il cammino attraversa sempre indici diversi prima di tornare a $J_{p(1)}$ allora x ha periodo minimo s .

Osservazione 11.11.

Se T è continua eccetto in un numero finito di punti possiamo provare a infittire la partizione e stando attenti al comportamento sul bordo la proposizione (11.8) continua in genere a valere.

11.2 Teorema di Sharkovsky

11.2.1 Ordinamento e teorema

Definizione 11.12 (Ordinamento di Sharokovsky).

Definiamo l'**ordinamento di Sharokovsky** su \mathbb{N}^+ (che indichiamo (\mathbb{N}^+, \prec)) come segue:

Siano a, b dispari e $p, q \in \mathbb{N}$. Poniamo

$$2^p a \prec 2^q b \iff \begin{cases} a \neq 1 \neq b, p > q \text{ oppure} \\ a \neq 1 \neq b, p = q, a > b \text{ oppure} \\ a = 1, b \neq 1 \text{ oppure} \\ a = b = 1, p < q. \end{cases}$$

Più graficamente:

$$\begin{aligned} 1 &\prec 2^2 \prec 2^3 \prec \dots \\ &\vdots \\ \dots &\prec 2^2 \cdot 7 \prec 2^2 \cdot 5 \prec 2^2 \cdot 3 \\ \dots &\prec 2 \cdot 7 \prec 2 \cdot 5 \prec 2 \cdot 3 \\ &\dots \prec 7 \prec 5 \prec 3 \end{aligned}$$

Osservazione 11.13.

L'ordine di Sharkovsky è un ordine totale su \mathbb{N}^+ .

Teorema 11.14 (Sharkovsky).

Se $T : [a, b] \rightarrow [a, b]$ è continua ed esiste un'orbita periodica di periodo minimo m allora esiste un'orbita periodica di periodo minimo n per ogni $n \prec m$.

Dimostrazione (in programma solo il caso m dispari).

Se $m = 1$ la tesi è evidente. Consideriamo il caso di m dispari maggiore di 1. In tal caso $n \prec m$ equivale a dire $n = 1, n > m$ oppure $n < m$ e n pari.

Supponiamo senza perdita di generalità che non esista orbita periodica di periodo minimo \tilde{m} per ogni \tilde{m} tale che $\tilde{m} \succ m$, infatti, poiché m è dispari, esistono solo un numero finito di \tilde{m} tali che $\tilde{m} \succ m$, basta considerare il massimo (rispetto a \prec , quindi

il minimo per $<$).

Sia P_1 un punto periodico con periodo minimo m e sia

$$\mathcal{O}(P_1) = \{P_1, P_2, \dots, P_m\},$$

dove ordiniamo $a \leq P_1 < P_2 < \dots < P_m \leq b$. Poniamo

$$\mathcal{J} = \{J_h\}_{h \in \{1, \dots, m-1\}} \cup \{[a, P_1], [P_m, b]\},$$

dove $J_h = [P_h, P_{h+1}]$. Seguiamo alcuni passi:

- Notiamo che necessariamente $T(P_1) > P_1$ e $T(P_m) < P_m$. Sia allora \bar{h} l'indice tale che $T(P_r) < P_r$ per ogni $r > \bar{h}$ e $T(P_{\bar{h}}) > P_{\bar{h}}$ ².

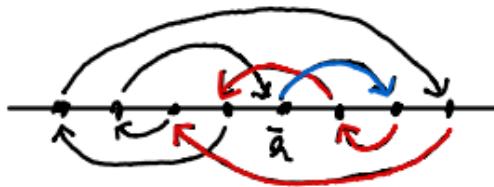


Figura 11.2: Rappresentazione grafica della definizione di \bar{h} .

Osserviamo che $T(P_{\bar{h}}) \geq P_{\bar{h}+1}$ e $T(P_{\bar{h}+1}) \leq P_{\bar{h}-1}$, quindi $J_{\bar{h}}$ ricopre se stesso. Segue dunque che $J_{\bar{h}} J_{\bar{h}}$ è un cammino ammissibile e quindi per la proposizione (11.8) esiste un punto fisso in $J_{\bar{h}}$, quindi abbiamo verificato l'esistenza di un'orbita di *periodo minimo 1*.

- Claim: se J_h ricopre se stesso allora per ogni $\ell \in \{1, \dots, m-1\}$ esiste un cammino ammissibile da J_h a J_ℓ :

Poniamo $V_1 = \{h\}$ e per ogni $k \geq 1$ poniamo

$$V_{k+1} = \{v \in \{1, \dots, m-1\} \mid \exists w \in V_k \text{ t.c. } J_w \text{ ricopre } J_v\}.$$

Poiché J_h ricopre se stesso si ha che $V_k \subseteq V_{k+1}$ per ogni $k \geq 1$, quindi esiste \bar{k} tale che $V_{\bar{k}} = V_{\bar{k}+1} = V_r$ per ogni $r \geq \bar{k} + 1$. Si presentano due possibilità:

- $V_{\bar{k}} = \{1, \dots, m-1\}$ e abbiamo completato il passo,
- $V_{\bar{k}}$ è un sottoinsieme stretto di $\{1, \dots, m-1\}$.

Mostriamo che la seconda non può verificarsi:

Per assurdo supponiamo $V_{\bar{k}} \subsetneq \{1, \dots, m-1\}$, allora partendo da h esiste un intervallo che non viene ricoperto (per esempio J_a). Notiamo che $\bigcup_{I \in V_{\bar{k}}} I = T^{\bar{k}}(J_h)$ è un intervallo, infatti l'immagine tramite una mappa continua di uno spazio connesso è connessa. Poiché $J_h \subseteq T^k(J_h)$ per ogni k si ha che se J_a non viene ricoperto allora P_a o P_{a+1} non può mai essere immagine di P_h , ma questo è assurdo perché $P_a, P_{a+1} \in \mathcal{O}(P_1) = \mathcal{O}(P_h)$.

- Claim: Esiste $J_{\bar{\ell}}$ con $\bar{\ell} \neq \bar{h}$ che ricopre $J_{\bar{h}}$.

Per assurdo supponiamo che non esista un tale $\bar{\ell}$. Sotto questa ipotesi mostriamo che $T(\{P_{\bar{h}+1}, \dots, P_m\}) \subseteq \{P_1, \dots, P_{\bar{h}}\}$ e $T(\{P_1, \dots, P_{\bar{h}}\}) \subseteq \{P_{\bar{h}+1}, \dots, P_m\}$:

²esiste per il principio del minimo

Poiché $T(P_{\bar{h}+1}) \leq P_{\bar{h}}$ necessariamente questo è il caso anche per $T(P_{\bar{h}+2})$, altrimenti $J_{\bar{h}+1}$ ricoprirebbe $J_{\bar{h}}$. Procedendo per induzione andando verso P_m abbiamo mostrato la prima inclusione. L'altra segue in modo analogo notando che $T(P_{\bar{h}}) \geq P_{\bar{h}+1}$ e procedendo per induzione verso P_1 .

Abbiamo quindi diviso i punti esattamente a metà, ma questo è assurdo perché m dispari.

4. Unendo i due punti precedenti esiste un cammino ammissibile della forma

$$J_{\bar{h}} J_{p(2)} \cdots J_{p(s)} J_{\bar{h}}$$

tale che $p(i) \neq \bar{h}$ per qualche $i \in \{2, \dots, s\}$.

Mostriamo che un cammino ammissibile di lunghezza minima di questa forma è tale che $s = m - 1$:

$s \geq m - 1$ Per assurdo supponiamo $s < m - 1$. Se s è dispari allora per la proposizione (11.8) esiste $x \in J_{\bar{h}}$ tale che $T^s(x) = x$, ma questo è assurdo perché, poiché $s < m$ è dispari, $s \leq m - 2$ e quindi T ammetterebbe un'orbita con periodo minimo dispari³ minore di m .

Se s è pari allora il cammino

$$J_{\bar{h}} J_{p(2)} \cdots J_{p(s)} J_{\bar{h}} J_{\bar{h}}$$

è ammissibile e quindi troviamo $x \in J_{\bar{h}}$ tale che $T^{s+1}(x) = x$, ma questo è assurdo perché $s < m - 1$ e $m - 1$ pari implica che $s \leq m - 3$ e quindi $s + 1 \leq m - 2$ e abbiamo lo stesso assurdo di prima.

$s = m - 1$ Visto il punto precedente basta mostrare che il cammino contiene ogni J_ℓ per $\ell \in \{1, \dots, m - 1\}$ al massimo una volta (escluso l'ultimo $J_{\bar{h}}$). Se J_ℓ apparisse più volte potremmo eliminare il tratto tra la prima e l'ultima manifestazione di J_ℓ ⁴ e trovare un cammino ammissibile più breve, negando la minimalità del cammino di partenza.

5. Claim: Esiste un unico $\ell \in \{1, \dots, m - 1\} \setminus \{\bar{h}\}$ tale che J_ℓ ricopre $J_{\bar{h}}$.

Abbiamo già mostrato l'esistenza quindi supponiamo per assurdo che esistano $k_1 \neq k_2$ diversi da \bar{h} tali che J_{k_1} e J_{k_2} ricoprono $J_{\bar{h}}$. In tal caso, preso un cammino ammissibile come nel punto precedente si avrebbe che se due indici distinti coprono $J_{\bar{h}}$ allora esisterebbe un cammino ammissibile più breve, contraddicendo il punto precedente.

6. Combinando i due punti precedenti ricaviamo che se $V_1 = \{\bar{h}\}$ e costruiamo gli insiemi di indici come al punto 2, ad ogni applicazione successiva di T viene aggiunto esattamente un indice fino a raggiungere $\{1, \dots, m - 1\}$.

Imponiamo allora come notazione $I_1 = J_{\bar{h}}$, $I_2 = J_{p(2)}$ dove $\{p(2)\} = V_2 \setminus V_1$ e procedendo iterativamente. In questa notazione si ha che il cammino⁵ più breve ammissibile che parte da $J_{\bar{h}}$ e torna a $J_{\bar{h}}$ passando per un altro intervallo è dato da

$$I_1 I_2 \cdots I_{m-1} I_1.$$

7. Osserviamo che, affinché $I_1 \cdots I_{m-1} I_1$ abbia la proprietà di lunghezza minima mostrata, I_1 copre solo I_1 e I_2 . Similmente I_2 può coprire al massimo I_1 , I_2 e I_3 eccetera.

³potenzialmente un divisore di s

⁴per esempio per $\ell = 1$ e $\bar{h} = 1$ si avrebbe $J_1 J_2 J_3 J_4 J_2 J_3 J_3 J_1 \rightsquigarrow J_1 J_2 J_3 J_3 J_1$

⁵siamo giustificati nel chiamarlo “il cammino” per l’osservazione appena fatta.

Osserviamo dunque che $I_2 = J_{\bar{h}+1}$ oppure $J_{\bar{h}-1}$, senza perdita di generalità supponiamo $I_2 = J_{\bar{h}-1}$ ⁶. Si deve dunque avere che $T(P_{\bar{h}+1}) = P_{\bar{h}-1}$ e $T(P_{\bar{h}}) = P_{\bar{h}+1}$. Imponendo iterativamente le condizioni sopra ricaviamo che I_2 copre solo I_3 , I_3 copre solo I_4 e così procedendo fino a raggiungere $I_{m-1} = J_1$, la cui immagine forzata ad essere $[P_{\bar{h}}, P_m]$ cioè, sempre per la corrispondenza esplicita trovata, $I_1 \cup I_3 \cup \dots \cup I_{m-2}$.

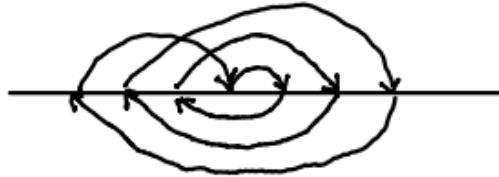


Figura 11.3: Rappresentazione di come i punti dell'orbita sono organizzati. Il punto centrale è \bar{h} . La figura rappresenta il caso di $I_2 = J_{\bar{h}-1}$, l'altro caso è dato riflettendo l'immagine attraverso un asse verticale.

8. Mostriamo che esiste un'orbita periodica di *periodo minimo n per ogni n > m*:
Notiamo che il cammino

$$\underbrace{I_1 \cdots I_{m-1}}_{m-1} \underbrace{I_1 \cdots I_1}_{n-m+2}$$

è ammissibile per il punto precedente e quindi per (11.10) esiste x tale che $T^n(x) = x$ dove n è il periodo minimo.

9. Mostriamo che esiste un'orbita periodica di *periodo minimo n per ogni n < m pari*. È sufficiente mostrare che I_{m-1} ricopre I_k per ogni k dispari, infatti in tal caso basterà applicare (11.10) ai cammini ammissibili della forma

$$I_{m-1} I_k I_{k+1} \cdots I_{m-2} I_{m-1}$$

per ogni k dispari.

Consideriamo ora il caso m pari⁷. Senza perdita di generalità supponiamo che T abbia un'orbita di periodo minimo m e non di periodo k per ogni $k \succ m$. Scriviamo $m = 2^p \tilde{m}$.

Seguendo quanto fatto per il caso dispari mostriamo anche in questo caso che $J_{\bar{h}}$ ricopre se stesso e che iterando T ricopre ogni intervallo. Applicando il caso dispari a T^{2^p} e \tilde{m} troviamo per ogni $k \prec \tilde{m}$ un valore x tale che x abbia periodo minimo k per T^{2^p} , e quindi ha periodo $2^p k$ per T . Per mostrare che questo periodo è minimo è necessario studiare più approfonditamente l'equivalente dei punti 3, 4 e 5. \square

Il teorema di Sharkovsky segna una netta distinzione qualitativa tra mappe su intervalli e mappe su circonferenze:

Proposizione 11.15 (Punti periodici su S^1).

Sia $T : S^1 \rightarrow S^1$ un omeomorfismo, allora se esiste un punto di periodo minimo p ogni punto periodico è di periodo minimo p.

Dimostrazione.

NON DATA DURANTE IL CORSO

\square

⁶il ragionamento procede in modo simile per l'altro caso

⁷Da qui in poi è una curiosità che non fa parte del programma.

Capitolo 12

Dinamica topologica Caotica

Supponiamo che X sia uno spazio metrico compatto e che $T : X \rightarrow X$ sia continua.

12.1 Caos di Devaney

Definizione 12.1 (Mappa topologicamente transitiva).

Sia N spazio topologico e siano $T : N \rightarrow N$ si dice **topologicamente transitiva** se per ogni coppia U, V si aperti non vuoti esiste n tale che $T^n(U) \cap V \neq \emptyset$.

Definizione 12.2 (Dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali).

Sia N uno spazio metrico e $T : N \rightarrow N$ continua. T ha **dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali** su N se esiste $c > 0$ tale che per ogni $x \in N$ e per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $y \in B_\varepsilon(x)$ per cui esiste n tale che $d(T^n(x), T^n(y)) > c$.

Definizione 12.3 (Caos di Devaney).

Affermiamo che T è **caotica (nel senso di Devaney)** se esiste un sottoinsieme $\Lambda \subseteq X$ compatto e positivamente invariante tale che

1. l'insieme dei punti periodici è denso in Λ ,
2. T è topologicamente transitiva su Λ
3. T ha dipendenza sensibile dalle condizioni iniziali su Λ .

12.2 Entropia topologica

Definizione 12.4 (Spazio (n, ε) -separato).

Sia $T : X \rightarrow X$ continua con X metrico compatto. Dati $n \in \mathbb{N}$ e $\varepsilon > 0$, un insieme $S \subseteq X$ è **(n, ε) -separato** se per ogni $x, y \in S$ distinti esiste $k \in \mathbb{N}$ con $k < n$ tale che $d(T^k(x), T^k(y)) > \varepsilon$.

Definizione 12.5 (Entropia topologica).

Sia $T : X \rightarrow X$ continua con X metrico compatto. Definiamo l'**entropia topologica** di T come

$$h_{top}(T) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \log (\max \{\#S \mid S \text{ è } (n, \varepsilon)\text{-separato}\}).$$

Definizione 12.6 (Caos per entropia topologica).

Affermiamo che T è **caotica (nel senso dell'entropia topologica)** se $h_{top}(T) > 0$.

Proposizione 12.7 (L'entropia topologica è invariante).
L'entropia topologica è invariante per coniugio topologico.

Dimostrazione.

NON DATA DURANTE IL CORSO □

Proposizione 12.8 (Entropia topologica e partizioni).

Sia $T : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ tale che esiste $\mathcal{J} = \{J_1, \dots, J_k\}$ partizione finita in intervalli tale che per ogni i abbiamo $T(J_i) = [0, 1]$ e $T|_{J_i}$ è invertibile e continua. Allora

$$h_{top}(T) = \log k = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \log(\# \{Fix T^n\}).$$

Dimostrazione.

NON DATA DURANTE IL CORSO. □

Proposizione 12.9 (Entropia di una rotazione).

Sia $T_\alpha : S^1 \rightarrow S^1$ dato da $T_\alpha(x) = x + \alpha \pmod{1}$. Allora $h_{top}(T_\alpha) = 0$

Dimostrazione. (Esercizio).

Notiamo che T_α è una isometria, quindi $d(T_\alpha^k(x), T_\alpha^k(y)) > \varepsilon$ se e solo se $d(x, y) > \varepsilon$. Segue che un insieme è (n, ε) -separato se e solo se è $(0, \varepsilon)$ -separato. La massima cardinalità di un tale insieme è $\lfloor \varepsilon^{-1} \rfloor$, che in particolare è un valore costante in n . Segue dunque che

$$h_{top}(T) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \log(\lfloor \varepsilon^{-1} \rfloor) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} 0 = 0.$$

□

12.3 Ferro di cavallo

Definizione 12.10 (Ferro di cavallo).

Una funzione continua $T : [a, b] \rightarrow [a, b]$ ha un **ferro di cavallo** se esiste $J \subseteq [a, b]$ intervallo chiuso che ricopre se stesso almeno due volte.

Proposizione 12.11 (Relazione tra ferro di cavallo e periodi minimi).

Sia $T : [a, b] \rightarrow [a, b]$ continua.

1. *Se T ha un ferro di cavallo allora ammette orbite per ogni periodo minimo.*

2. *Se T ammette un'orbita di periodo minimo m dispari allora T^2 ha un ferro di cavallo.*

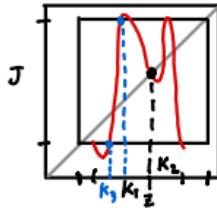
Dimostrazione.

Mostriamo i due punti

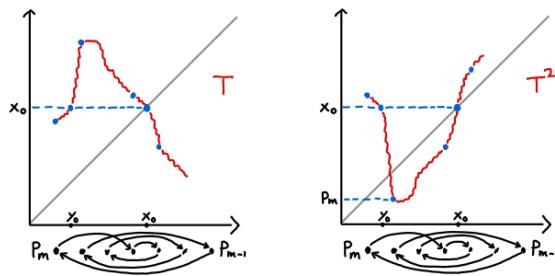
1. Per il teorema di Sharkovsky (11.14) basta il periodo minimo 3.

Per definizione di ferro di cavallo esistono K_1 e K_2 intervalli aperti disgiunti tali che $T(\overline{K}_i) = J$ per un opportuno intervallo J di $[a, b]$. Se $\overline{K}_1 \cap \overline{K}_2 = \{z\}$ con z punto fisso allora osserviamo graficamente che esiste $\overline{K}_3 \subseteq \overline{K}_1$ tale che $\overline{K}_3 \cap \overline{K}_2 = \emptyset$ e K_2 e K_3 coprono J . Quindi sostituiamo K_1 con K_3 .

Definiamo una partizione di $[a, b]$ che contenga \overline{K}_1 e \overline{K}_2 . Così facendo avremo un T -grafo dove $\overline{K}_1 \overline{K}_2 \overline{K}_2 \overline{K}_1$ è ammissibile. Per il teorema (11.8) esiste $x \in K_1$ tale che $T^3(x) = x$ e $T(x) \in \overline{K}_2$. Chiaramente x ha periodo minimo 1 o 3, ma se $T(x) = x$ allora $\overline{K}_1 \cap \overline{K}_2 = \{x\}$ sarebbe un punto fisso, contraddicendo le ipotesi.



2. Supponiamo senza perdita di generalità che m sia minimo. Fissiamo un'orbita con periodo minimo m e ordiniamo i vertici secondo la configurazione trovata dimostrando (11.14)¹. Notiamo che esiste x_0 fisso in $[P_1, P_2]$ e $y_0 \in [P_m, P_{m-2}]$ tale che $T(y_0) = x_0$. Applicando un po' di volte il teorema del valore intermedio come in figura



osserviamo che $J = [P_m, x_0]$ copre se stesso almeno due volte per T^2 ².

□

Equivalenza tra le definizioni

Teorema 12.12 (Caratterizzazione del Caos).

Sia $T : [a, b] \rightarrow [a, b]$ continua. Allora le seguenti sono affermazioni sono equivalenti:

1. T è caotica nel senso di Devaney
2. $h_{top}(T) > 0$
3. Esiste $n \in \mathbb{N}$ per cui T^n ha un ferro di cavallo
4. esiste orbita periodica per T di periodo minimo m non potenza di 2.

Dimostrazione.

L'equivalenza tra le ultime due è la proposizione (12.11). Per il resto la dimostrazione non è stata data durante il corso. □

¹Figura 11.3. In questa configurazione $J_h^- = I_1 = [P_1, P_2]$. Se la configurazione fosse la simmetrica rispetto a quella in figura nella notazione seguente vanno scambiati gli estremi degli intervalli
²infatti $[P_m, x_0] \subseteq T([y_0, P_{m-2}]) \cap T([P_{m-2}, x_0])$.

Capitolo 13

Sistemi discreti principali

13.1 Dinamica simbolica

Sia \mathcal{A} un alfabeto finito e sia $\Omega = \mathcal{A}^{\mathbb{N}}$. Imponiamo la topologia discreta su \mathcal{A} e la topologia prodotto su Ω . Per il teorema di Tychonoff segue dalla compattezza di \mathcal{A} che Ω è compatto.

Lo spazio Ω è anche uno spazio metrico con distanza definita come segue:

$$d(\omega, \tilde{\omega}) = \sum_{i=0}^{\infty} 2^{-i-1} \delta(\omega_i, \tilde{\omega}_i),$$

$$\text{dove } \delta(a, b) = \begin{cases} 1 & a \neq b \\ 0 & a = b \end{cases}.$$

Definizione 13.1 (Shift).

Definiamo la mappa di **shift** come

$$\sigma : \begin{array}{ccc} \Omega & \longrightarrow & \Omega \\ (\omega_i)_{i \in \mathbb{N}} & \longmapsto & (\omega_{i+1})_{i \in \mathbb{N}} \end{array}.$$

Osservazione 13.2.

La mappa di shift è continua perché 2-lipschitziana.

Uno dei motivi principali per cui studiamo la mappa di shift è il seguente

Proposizione 13.3 (Lo shift è caotico).

Consideriamo $\mathcal{A} = \{1, \dots, N\}$, $\Omega = \mathcal{A}^{\mathbb{N}}$ con la metrika definita prima e $\sigma : \Omega \rightarrow \Omega$ lo shift, allora σ è caotica su Ω .

Dimostrazione. (Caotica per Devaney).

Verifichiamo le tre condizioni:

1. Vogliamo mostrare che per ogni $\tilde{\omega}$ e per ogni $\varepsilon > 0$ esiste ω parola periodica¹ tale che $d(\omega, \tilde{\omega}) < \varepsilon$. Fissati $\tilde{\omega}$ e ε basta prendere s un opportuno troncamento di $\tilde{\omega}$ (tanto la distanza è pesata molto sui simboli iniziali).
2. Gli aperti di Ω hanno come prebase i cilindri della forma

$$C(\omega, h, n) = \{\tilde{\omega} \in \Omega \mid \forall i \in \{0, \dots, n-1\}, \omega_{h+i} = \tilde{\omega}_{h+i}\}.$$

¹ $\omega = sssss \dots$ con $s \in \mathcal{A}^*$, cioè s è una parola finita formata dai simboli in \mathcal{A} .

Vogliamo dunque mostrare che ogni $\omega^1, \omega^2 \in \Omega$ e per ogni $h^1, h^2, n^1, n^2 \geq 0$ esiste $m \in \mathbb{N}$ tale che

$$\sigma^m(C(\omega^1, h^1, n^1)) \cap C(\omega^2, h^2, n^2) \neq \emptyset,$$

cerchiamo cioè $\tilde{\omega} \in C(\omega^1, h^1, n^1)$ tale che $\sigma^m(\tilde{\omega}) \in C(\omega^2, h^2, n^2)$. Basta porre che

$$\tilde{\omega}|_{h^1+n^1-1}^{h^1} = \omega^1|_{h^1+n^1-1}^{h^1} \quad \text{e} \quad \tilde{\omega}|_{m+h^2+n^2-1}^{m+h^2} = \omega^2|_{h^2+n^2-1}^{h^2}$$

per un $m \gg h^1$.

3. Fissiamo $c \in (0, 1)$. Fissati $\omega \in \Omega$ e $\varepsilon > 0$ cerchiamo $\tilde{\omega} \in B_\varepsilon(\omega)$ tale che esiste $m \in \mathbb{N}$ tale che $d(\sigma^m(\omega), \sigma^m(\tilde{\omega})) > c$. Osserviamo che esiste $k_\varepsilon \in \mathbb{N}$ tale che se $\omega_i = \tilde{\omega}_i$ per ogni $i \leq k_\varepsilon$ allora $d(\omega, \tilde{\omega}) < \varepsilon$. Costruiamo allora $\tilde{\omega}$ facendo sì che almeno i primi k_ε simboli coincidano con quelli di ω e tale che tutti i successivi a un certo indice m siano diversi tra le due successioni. Osserviamo allora che $d(\sigma^m(\omega), \sigma^m(\tilde{\omega})) = \sum_{i \geq 0} 2^{-i-1} \cdot 1 = 1 > c$.

□

Dimostrazione. (Caotica per Entropia).

Fissati n, ε osserviamo che per ogni $\omega \neq \tilde{\omega}$ esiste $k < n$ tale che $d(\sigma^k(\omega), \sigma^k(\tilde{\omega})) > \varepsilon$ se e solo se esiste $i \in \{0, \dots, k_\varepsilon\}$ tale che $\omega_{k+i} \neq \tilde{\omega}_{k+i}$. Segue che se S è (n, ε) -separato, la mappa di troncamento

$$\begin{aligned} S &\longrightarrow \{1, \dots, N\}^{n+k_\varepsilon+1} \\ s &\longmapsto s|_{\{0, \dots, n+k_\varepsilon\}} \end{aligned}$$

è iniettiva. Poiché possiamo facilmente costruire un S tale che la mappa sopra è bigettiva², si ha che

$$\max \{\#S \mid S \text{ è } (n, \varepsilon)\text{-separato}\} \sim \#\{1, \dots, N\}^{n+k_\varepsilon+1} \sim N^{n+k_\varepsilon},$$

da cui

$$h_{top}(\sigma) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \frac{n+k_\varepsilon}{n} \log N = \log N.$$

□

13.2 Mappe di Poincaré

Proviamo a capire quando un sistema di equazioni differenziali porta un'orbita a tornare vicino a se stessa.

Definizione 13.4 (Mappa di Poincaré).

Sia M una varietà e sia Σ una sua sottovarietà di codimensione 1 tale che esiste $U \subseteq \Sigma$ con la seguente proprietà:

se $P \in U$ allora esiste $\bar{t} > 0$ tale che $t \in (0, \bar{t}) \implies \phi_t(P) \notin U$ e $\phi_{\bar{t}}(P) \in U$ ³.

Definiamo la **mappa di Poincaré** come

$$P_U : \begin{array}{ccc} U & \longrightarrow & U \\ (x, y) & \longmapsto & \phi_{\bar{t}}(x, y) \end{array} .$$

²Basta estendere arbitrariamente le stringhe dopo l' $(n+k_\varepsilon+1)$ -esimo simbolo

³ \bar{t} è l'istante del "primo ritorno"

Osservazione 13.5.

Ponendo $P_\Sigma^0 = \text{id}$ e

$$P_\Sigma^n = \underbrace{P_\Sigma \circ \cdots \circ P_\Sigma}_{n \text{ volte}}$$

stiamo definendo un sistema discreto $(\Sigma, P_\Sigma, \mathbb{Z})$ ⁴.

Esempio 13.6 (Moto sul toro piatto).

Sia $T^2 = \mathbb{R}^2 / \mathbb{Z}^2$. Un moto geodetico sul toro (piatto) si può pensare come

$$t \mapsto \phi_t(x, y) = (x, y) + t(v_x, v_y) \pmod{\mathbb{Z}^2}.$$

Sia $\Sigma = U = S^1 = [0, 1] \times \{0\} / (0, 0) \sim (1, 0)$. Per la geometria del toro questa sottovarietà di T^2 ha le proprietà richieste per definire la mappa di Poincaré (addirittura sappiamo che $\bar{t} = 1/v_y$).

Esplcitamente troviamo che

$$\begin{aligned} P_\Sigma : \quad & S^1 \longrightarrow S^1 \\ & t \longmapsto t + \alpha \pmod{1} \end{aligned}$$

dove $\alpha = v_x/v_y$. Osserviamo che a meno di traslare modulo 1, tutte le orbite sono determinate dall'orbita di 0.

$\alpha \in \mathbb{Q}$ Se $\alpha = \frac{p}{q}$ ridotta ai minimi termini allora $P_\Sigma^q(0) = 0 + p = 0 \pmod{1}$ e le orbite sono periodiche.

$\alpha \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ Evidentemente non troviamo un'orbita periodica. È possibile mostrare che in realtà l'orbita è densa.

Definizione 13.7 (Semipiano di Poincaré).

Consideriamo la regione $[-1, 1] \times [0, +\infty] \setminus D^1$ e identifichiamo i lati come in figura

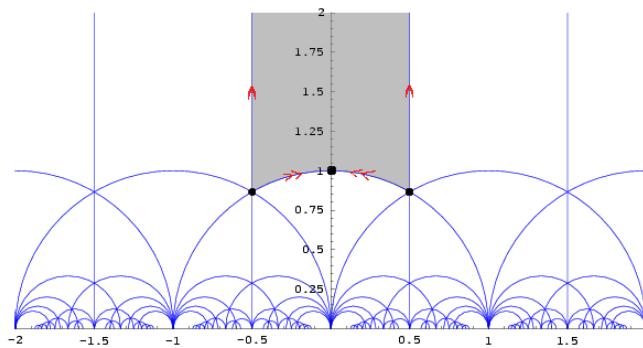


Figura 13.1: Dominio fondamentale e qualche geodetica.

Le geodetiche sono le intersezioni dell'oggetto con rette verticali o semicirconferenze perpendicolari all'asse x . Chiamiamo \mathcal{M} questo spazio.

Esempio 13.8 (Geodetiche sul piano di Poincaré).

A parte le geodetiche corrispondenti a rette verticali, ogni geodetica che incontra la regione lo fa passando per l'asse y (e quindi lo fa ad un certo angolo). Possiamo

⁴ P_Σ^{-1} è definita perché sono partito da un flusso e posso prendere tempi negativi in un flusso

associare ad ogni coppia punto di \mathcal{M} e angolo una geodetica di \mathcal{M} (quella passante per il punto che incontra la verticale a quell'angolo)

$$\mathcal{M} \times S^1 \ni ((x, y), \theta) \mapsto g_t((x, y), \theta).$$

Sia $\Sigma = \{x = 0, y > 1\} \times S^1$. È possibile definire P_Σ e si da il caso che questa mappa di Poincaré è più facile da studiare rispetto al sistema originale.

13.2.1 Sistemi continui caotici

Le uniche nozioni di caos che abbiamo trattato i sistemi discreti, quindi se vogliamo studiare quando un sistema continuo manifesta un comportamento caotico con gli strumenti che abbiamo il procedimento standard è:

- Cercare Σ di codimensione 1 in X che ammette $P : \Sigma \rightarrow \Sigma$ mappa di Poincaré.
- Cercare $\Lambda \subseteq \Sigma$ positivamente invariante per P su cui P è topologicamente coniugata a (Ω, σ) dove σ è lo shift.
- Per la proposizione (13.3) questo mostra che la mappa di Poincaré è caotica.

13.3 Endomorfismi del cerchio e mappa di Bernoulli

Definizione 13.9 (Endomorfismi lineari del cerchio).

Sia $m \in \mathbb{R}$, gli endomorfismi lineari del cerchio sono quelli della forma⁵

$$T_m : \begin{array}{ccc} S^1 & \longrightarrow & S^1 \\ x & \longmapsto & mx \mod 1 \end{array}.$$

Esempio 13.10 (Punti fissi della mappa di Bernoulli).

Cerchiamo graficamente punti fissi e periodici di $T_2 = T$

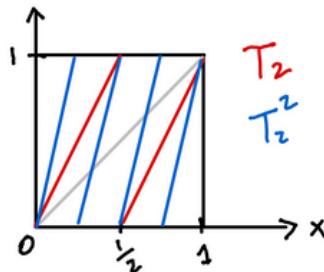


Figura 13.2: Un tipo di grafico utile la mappa di Bernoulli. In grigio troviamo l'identità, in rosso T_2 e in blu T_2^2 .

Evidentemente l'unico punto fisso è 0 (dal disegno sarebbero 0 e 1, ma $0 \equiv 1 \mod 1$). Cerchiamo ora punti con periodo minimo 2, cioè

$$T^2(x) = x, \quad T(x) \neq x.$$

⁵Il caso $m = 2$ restituisce la **mappa di Bernoulli**.

Ricordiamo che

$$T(x) = \begin{cases} 2x & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ 2x - 1 & \frac{1}{2} \leq x < 1 \end{cases} \implies T^2 = \begin{cases} 4x & 0 \leq x < \frac{1}{4} \\ 2(2x) - 1 = 4x - 1 & \frac{1}{4} \leq x < \frac{1}{2} \\ 2(2x - 1) = 4x - 2 & \frac{1}{2} \leq x < \frac{3}{4} \\ 2(2x - 1) - 1 = 4x - 3 & \frac{3}{4} \leq x < 1 \end{cases}$$

Graficamente vediamo che ci sono due punti di periodo 2, e questi sono $\frac{1}{3}$ e $\frac{2}{3}$. Osserviamo che i numeri della forma $3^{-1} \cdot 2^{-k}$ sono definitivamente periodici.

Cerchiamo i punti di periodo minimo 3. Graficamente notiamo che sono 6

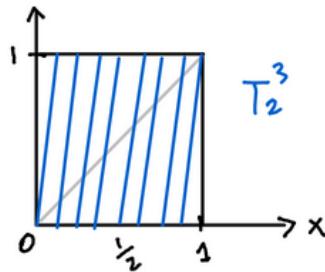


Figura 13.3: Rappresentazione grafica di T_2^3 .

In generale per come funzionano le iterate di T_2 si ha che il numero di punti di periodo (eventualmente non minimo) n è $2^n - 1$.

Esempio 13.11.

Consideriamo la mappa

$$T : \begin{array}{ccc} S^1 & \longrightarrow & S^1 \\ x & \mapsto & 10x \mod 1 \end{array}.$$

Poniamo $\mathcal{A} = \{0, \dots, 9\}$ e $\mathcal{A}_n = (\frac{n}{10}, \frac{n+1}{10})$ per $n \in \mathcal{A}$.
Sia $x \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ e diamo la seguente mappa

$$\varphi : x \mapsto (\omega_0, \omega_1, \dots) \in \mathcal{A}^{\mathbb{N}}$$

dove $\omega_n = k \iff T^n(x) \in \mathcal{A}_k \iff \lfloor 10T^n(x) \rfloor = k$ e per ricorsione vediamo che ω_n è la n -esima cifra decimale di x , cioè

$$x = 0.\omega_0\omega_1\omega_2\dots$$

Per rispondere ad una domanda del tipo “ $T^{1000}(x) \in \mathcal{A}_i$?” devo sapere la 1000-esima cifra di x . Se ora considero $y \in B_{\varepsilon}(x)$ al posto di x , le informazioni che avevamo su x non dicono più nulla sul comportamento di y oltre un certo passo⁶.

Osservazione 13.12 (Piccola parentesi statistica).

Sia $x = 0.x_1x_2\dots$ potremmo chiederci, fissata una cifra k se

$$\text{Prob} \left\{ \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{\#\{i \in \{0, \dots, N-1\} \mid x_i = k\}}{N} = \frac{1}{10} \right\} = 1$$

⁶ se $n > -\log_{10} \varepsilon$ la risposta a “ $T^n(x) \in \mathcal{A}_i$?” e quella a “ $T^n(y) \in \mathcal{A}_i$?” sono indipendenti.

ed effettivamente è vero. Segue dunque che

$$Prob \left\{ \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{\#\{i \in \{0, \dots, N-1\} \mid x_i = k\}}{N} = \frac{1}{9} \right\} = 0$$

anche se non è un insieme vuoto⁷.

Esempio 13.13 (Espansione binaria tramite la mappa di Bernoulli).

Sia $T_2 : S^1 \rightarrow S^1$, $T_2(x) = 2x \bmod 1$.

Sia $I_0 = [0, \frac{1}{2})$, $I_1 = [\frac{1}{2}, 1)$ e $\Omega = \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$. Consideriamo la mappa $\varphi : S^1 \rightarrow \Omega$ data da:

$$x \mapsto (\omega_0(x), \omega_1(x), \dots), \quad \omega_i(x) = \begin{cases} 0 & T^i(x) \leq \frac{1}{2} \\ 1 & T^i(x) \geq \frac{1}{2} \end{cases}$$

Osserviamo che $\sigma \circ \varphi = \varphi \circ T_2$ ma φ non è un omeomorfismo (o ben definita⁸), infatti

$$\varphi^{-1}(1, 0, 0, 0, \dots) = \left\{ \frac{1}{2} \right\} = \varphi^{-1}(0, 1, 1, 1, \dots).$$

Quello che sta succedendo che abbiamo trovato due serie della seguente forma che convergono allo stesso valore

$$x = \sum_{i \geq 0} \frac{\omega_i(x)}{2^{i+1}}.$$

Esempio 13.14.

La mappa $T(x) = 2x \bmod 1$ è caotica nel senso di Devaney.

1. Le classi dei numeri razionali che ridotti ai minimi termini hanno denominatore dispari corrispondono a orbite periodiche⁹, e queste sono dense in $[0, 1]$
2. suddividiamo $S^1 = [0, 1]/0 \sim 1$ in intervalli lungo i razionali con denominatore pari ad una potenza di 2 (per esempio $\mathcal{J}_2 = \{[0, 1/4], [1/4, 1/2], [1/2, 3/4], [3, 4, 1]\}$). Dopo un opportuno numero di suddivisioni, esisterà un n per il quale un intervallo di \mathcal{J}_n è interamente contenuto in U . Allora $T^n(U) = S^1$ e quindi in particolare $T^n(U) \cap V \neq \emptyset$, cioè T è topologicamente transitiva.
3. Sia $x \in S^1$. Fissiamo $\varepsilon > 0$ e sia k un intero tale che $2^{-1} < \varepsilon$. Notiamo che in $B_\varepsilon(x)$ esiste un y che coincide con x definitivamente, per esempio possiamo considerare x dove nell'espansione in base 2 abbiamo invertito la $(k+1)$ -esima cifra. In tal caso $T^k(x)$ e $T^k(y)$ differiscono nella prima cifra ma coincidono nella seconda, quindi $d(T^k(x), T^k(y)) = 1/2 > 1/4$, quindi se scegliamo $c = 1/4$ abbiamo la dipendenza sensibile dai dati iniziali.

13.4 Mappa Logistica e Tenda

13.4.1 Mappa logistica

Definizione 13.15 (Mappa logistica).

Una funzione continua $T_\lambda : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ si dice **logistica** se è della forma¹⁰

$$T_\lambda(x) = \lambda x(1 - x), \quad 0 \leq \lambda \leq 4.$$

⁷per esempio posso fissare ogni nona cifra a k e completare le altre con cifre a caso diverse da k .

⁸potremmo imporre di considerare solo i rappresentanti in $[0, 1)$ e definire $\omega_i(x) = 1$ se $T^i(x) = 1/2$, ma queste scelte andrebbero a violare la surgettività di φ e la continuità in generale.

⁹se d è il denominatore, le orbite citate hanno periodo minimo pari all'ordine di 2 modulo d

¹⁰Le restrizioni $0 \leq \lambda \leq 4$ servono per garantire che effettivamente $[0, 1]$ sia il codominio.

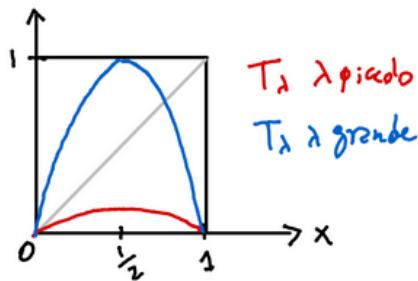


Figura 13.4: Rappresentazione di due mappe logistiche.

Derivata

La derivata di $T_\lambda(x) = \lambda x(1 - x)$ è

$$T'_\lambda(x) = \lambda - 2\lambda x.$$

Segue che T_λ ha massimo in $1/2$.

Punti fissi

I punti fissi di T_λ sono le soluzioni di

$$\lambda x(1 - x) = x \iff x((\lambda - 1) - \lambda x) = 0,$$

cioè 0 e $1 - \lambda^{-1}$. Notiamo però che il secondo punto fisso è rilevante solo se $1 - \lambda^{-1} \in [0, 1]$, cioè solo se $\lambda \geq 1$.

Calcoliamo quando questi punti fissi sono iperbolici:

$$T'_\lambda(0) = \lambda.$$

Per $\lambda < 1$ si ha che 0 è iperbolico attrattivo e che per $\lambda > 1$ è iperbolico repulsivo.

Se $\lambda = 1$ allora i due punti fissi coincidono e sono non iperbolici.

$$T'_\lambda(1 - \lambda^{-1}) = 2 - \lambda.$$

Segue che $1 - \lambda^{-1}$ è iperbolico attrattivo se $\lambda \in (1, 3)$, iperbolico repulsivo se $\lambda \in (3, 4]$ e non iperbolico per $\lambda \in \{1, 3\}$. Studiamo ora i casi di $\lambda = 1$ e $\lambda = 3$:

$\lambda = 1$ Calcoliamo che $T''_\lambda(x) = -2\lambda < 1$, quindi, poiché $T'_\lambda(0) = \lambda = 1$ per il criterio per punti non iperbolici (10.7) si ha che 0 è attrattivo.

$\lambda = 3$ Il questo caso $1 - \lambda^{-1} = 2/3$, inoltre $T'(x) = 3 - 6x$, $T''(x) = -6$ e $T'''(x) = 0$. Segue che $ST(x) = 0 - \frac{3}{2}(6/(3 - 6x))^2 < 0$, in particolare $ST(2/3) < 0$ e quindi è un punto fisso attrattivo per il criterio per punti non iperbolici con derivata -1 (10.9).

Diagramma di biforcazione

Osserviamo che

$$T_\lambda^2(x) = \lambda(\lambda x(1 - x))(1 - \lambda x(1 - x)) = \lambda^2 x(1 - x)(1 - \lambda x(1 - x)).$$

Notiamo graficamente (Figura 13.5) che in corrispondenza di $\lambda = 3$ passiamo da una soluzione a due:

$$\begin{aligned} \lambda^2 x(1-x)(1-\lambda x(1-x)) - x &= 0 \\ x(\lambda^2(1-x)(1-\lambda x(1-x)) - 1) &= 0 \\ -x(x - (1 - \lambda^{-1}))(\lambda^2 x^2 - \lambda(\lambda + 1)x + \lambda + 1) &= 0 \\ x \left(x - \frac{\lambda - 1}{\lambda} \right) \left(x - \underbrace{\frac{(\lambda + 1) + \sqrt{\lambda^2 - 2\lambda - 3}}{2\lambda}}_{x_+(\lambda)} \right) \left(x - \underbrace{\frac{(\lambda + 1) - \sqrt{\lambda^2 - 2\lambda - 3}}{2\lambda}}_{x_-(\lambda)} \right) &= 0 \end{aligned}$$

dove $x_{\pm}(\lambda)$ esiste se $\sqrt{\lambda^2 - 2\lambda - 3}$ è ben definita, cioè se $\lambda \geq 3$. Poiché le prime due soluzioni sono soluzioni di $T_\lambda(x) = x$, si ha che $x_{\pm}(\lambda)$ sono l'unica orbita periodica di periodo minimo 2 (quando le soluzioni sono distinte, cioè per $\lambda > 3$).

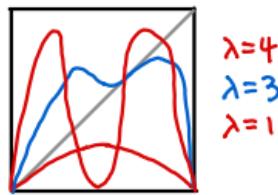


Figura 13.5: Grafico di T_λ^2 al variare di λ .

Cerchiamo di capire se $\mathcal{O} = \{x_{\pm}(\lambda)\}$ è un'orbita attrattiva:

$$(T_\lambda^2(x))' = T'_\lambda(T_\lambda(x))T'_\lambda(x),$$

da cui dopo dei conti

$$|(T_\lambda^2)'(x_{\pm}(\lambda))| = |4 + 2\lambda - \lambda^2|,$$

quindi \mathcal{O} è attrattiva se $\lambda \in [3, 1 + \sqrt{6}]$ e repulsiva se $\lambda \in (1 + \sqrt{6}, 4)$.

Possiamo graficare al variare di $\lambda \in [0, 4]$ le orbite stabili (fattibile al computer in quanto stabili). Osserviamo dai risultati ottenuti che per $\lambda < 1$ ci aspettiamo solo l'unico punto fisso 0, poi per $\lambda \in (1, 3)$ l'unico punto fisso attrattivo è $1 - \lambda^{-1}$, poi per $\lambda \in (3, 1 + \sqrt{6})$ troviamo una orbita periodica attrattiva di periodo 2 e possiamo immaginarci di trovare ulteriori suddivisioni dell'intervallo rimanente dove l'orbita graficata ha periodo minimo variabile.

Per ogni λ fino ad un certo valore possiamo trovare Ω^λ invariante dato da un'orbita periodica ma per $\lambda \uparrow$ convergiamo verso un Ω^∞ invariante che non è un'orbita periodica. Ω^∞ è uno **strange attractor**¹¹.

13.4.2 Mappa Tenda

Definizione 13.16 (Mappa tenda).

Una funzione continua $T_a : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ si dice **tenda** se è della forma

$$T_a(x) = \begin{cases} ax & 0 \leq x < \frac{1}{2} \\ a(1-x) & \frac{1}{2} \leq x \leq 1 \end{cases}, \quad 0 \leq a \leq 2.$$

¹¹Questo tipo di fenomeni dimostra che in genere lo studio delle orbite non è sufficiente. Per capire meglio questi sistemi dinamici è spesso utile definire misure.

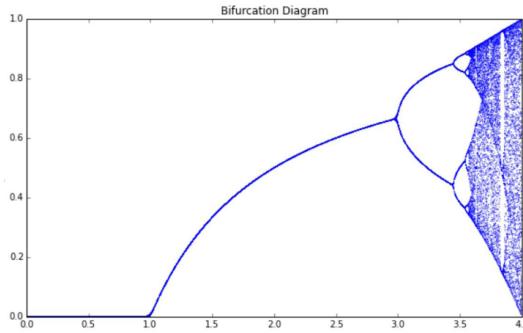


Figura 13.6: Diagramma di biforcazione della mappa logistica. Sulle ascisse si succedono i valori di λ .

Esempio 13.17 (Insiemi invarianti per mappa tenda e mappa lineare).

Sia T_a la mappa tenda come sopra e $T_b : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ la mappa lineare $T_b(x) = bx$ (poniamo $b \in [0, 1]$). Graficamente osserviamo che $T_a([0, 1]) = [0, \frac{a}{2}]$, quindi $[0, \frac{a}{2}]$ è

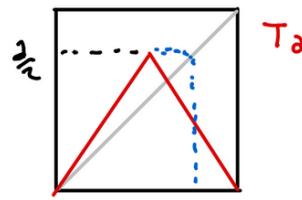


Figura 13.7: Grafico di una mappa tenda

positivamente invariante, ma è invariante¹² solo se $a \geq 1$. Osserviamo che $T_b([0, 1]) =$

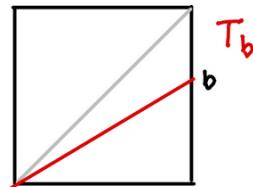


Figura 13.8: Grafico di una mappa lineare

$[0, b]$, quindi $[0, b]$ è positivamente invariante, ma è invariante solo per $b = 1$.

Esempio 13.18 (Dinamica della mappa tenda).

Sia $T = T_a$ la mappa tenda di parametro a .

Osserviamo graficamente che

$$\text{Punti fissi} = \begin{cases} \{0\} & a \in (0, 1) \\ \left[0, \frac{1}{2}\right] & a = 1 \\ \left\{0, \frac{a}{1+a}\right\} & a > 1 \end{cases}$$

¹²ricordiamo che X è positivamente invariante per T se $T(X) \subseteq X$ mentre è invariante se $T(X) = X$

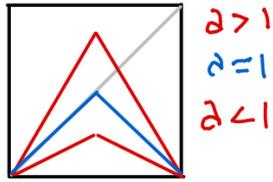


Figura 13.9: Grafico della mappa tenda per tre valori di a .

Studiamo il comportamento di 0 e $\frac{a}{1+a}$ (il secondo solo nel caso di $a \geq 1$)

0 Osserviamo che

$$|T'(0)| = a,$$

quindi 0 è iperbolico per $a \neq 1$. L’attrattività dipende dal segno di $a - 1$.

$\frac{a}{1+a}$, $a \geq 1$ Anche in questo caso

$$\left| T' \left(\frac{a}{1+a} \right) \right| = a,$$

quindi questo punto è repulsivo per $a > 1$ mentre per $a = 1$ il punto non è iperbolico.

Studiamo la dinamica al variare di a

a = 1 Per $x \in [0, \frac{1}{2}]$ si ha che x è un punto fisso. Se $x \in (\frac{1}{2}, 1]$ allora $T(x) \in [0, \frac{1}{2}]$, quindi i punti sono “definitivamente fissi”.

a < 1 L’unico punto fisso è 0 e $\omega(x) = \{0\}$ per ogni x .

a > 1 Abbiamo due punti fissi, ma sono entrambi repulsivi. Proviamo a studiare l’iterata seconda

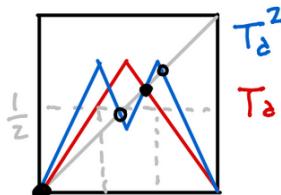


Figura 13.10: Grafico della mappa tenda e della sua seconda iterata per $a > 1$. In nero sono evidenziati i punti fissi di T mentre con un cerchio sono evidenziati i punti di periodo minimo 2 (visti come punti fissi di T^2).

Notiamo che se x_1 è uno dei punti fissi di T allora $|(T^2)'(x_1)| = a^2 > 1$, quindi continuano ad essere repulsivi anche per T^2 (non esistono dunque orbite attrattive di periodo 2).

Osservazione 13.19 (Esempio di coniugio topologico).

La mappa logistica T_4 è coniugata topologicamente alla mappa tenda T_2 .

Dimostrazione.

Basta considerare $\varphi : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ data da

$$\varphi(x) = \sin^2\left(\frac{\pi}{2}x\right)$$

e notare che $\varphi \circ T_2 = T_4 \circ \varphi$ ¹³.

□

13.5 Miscellanea

Esempio 13.20 (Oscillatore armonico perturbato).

Sia $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione 1-periodica. Immaginiamo una palla che rimbalza su un piatto la cui altezza varia come f . Per semplificarcici la vita possiamo immaginare che l'urto avvenga sempre in $x = 0$, tanto l'unica cosa che conta è \dot{f} (l'impulso). Siano t_0, t_1, \dots, t_n i tempi di urto ($t_0 = 0$) e siano v_0, \dots, v_n le velocità dopo l'urto. Conoscendo questi dati possiamo ricostruire tutta la dinamica.

$$T : \begin{aligned} [0, +\infty) \times (0, +\infty) &\longrightarrow [0, +\infty) \times (0, +\infty) \\ (t_n, v_n) &\longmapsto (t_{n+1}, v_{n+1}) \end{aligned} .$$

Calcoliamo

$$\begin{cases} t_{n+1} = t_n + h(v_n) \\ v_{n+1} = v_n + 2\dot{f}(t_{n+1}) \end{cases} , \quad h(v_n) = \frac{2}{g}v_n$$

Osserviamo inoltre che

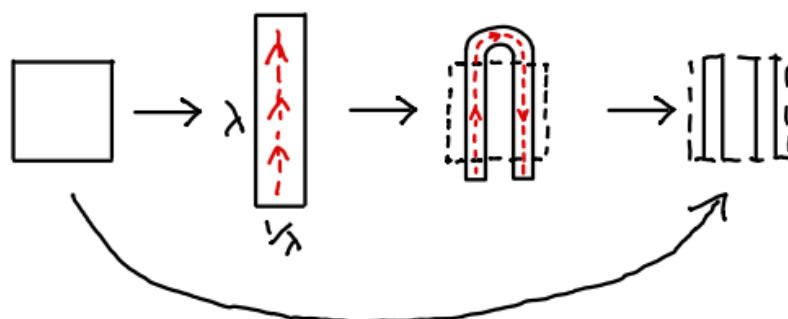
$$T(t_n + 1, v_n) = (t_n + 1 + h(v_n), v_n + 2\dot{f}(t_n + 1 + h(v_n))) \stackrel{\dot{f}(t+1)=\dot{f}(t)}{=} T(t_n, v_n) + (1, 0),$$

quindi in realtà possiamo considerare S^1 al posto di $[0, +\infty)$ per i tempi.

Questo sistema è difficile da trattare e presenta molti problemi aperti.

Definizione 13.21 (Ferro di cavallo di Smale).

Sia $\lambda > 2$. Una trasformazione del tipo **Ferro di cavallo di Smale** è definita intuitivamente come segue



¹³entrambe le composizioni assumono il valore $\sin^2(\pi x)$. Ricordiamo che $2 \sin(\theta) \cos(\theta) = \sin(2\theta)$.

Appendice A

Riconoscimenti e risorse

Riconoscimenti

Ringrazio i seguenti colleghi per aver segnalato ambiguità e/o errori:

Poletti Leonardo.

Ringrazio anche il Prof. Bonanno per aver offerto consigli e alcune correzioni.

Risorse

Per realizzare le immagini di sistemi bidimensionali ho usato il sito <https://paolini.github.io/funplot/>.

Fonti delle immagini

Crediti per le immagini non realizzate da me:

- Figura 13.1:
Fropuff, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons con alcune modifiche del sottoscritto.
La pagina di Wikipedia Commons rilevante è <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ModularGroup-FundamentalDomain-01.png>.
- Figura 13.6:
Figura messa a disposizione dal prof. Castorrini senza ulteriori crediti.