



UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Facultat de Matemàtiques
i Informàtica

GRAU DE MATEMÀTIQUES

Treball final de grau

Aproximació del moviment Brownià

Autor: Pau López Gil-Pérez

Director: David Márquez Carreras

Realitzat a: Facultat de Matemàtiques i Informàtica

Barcelona, 10 de novembre de 2025

Índex

Introducció	i
1 El moviment brownià	1
1.1 Elements aleatòris	1
1.2 Definició i propietats bàsiques	2
2 Convergència cap al moviment Brownià	4
2.1 Modes de convergència	4
2.2 Ajustament i Teorema de Prohorov	5
2.3 El principi d'invariància de Donsker	6
2.4 Convergència del passeig aleatori cap al moviment brownià	10

Introducció

En el primer capítol, introduirem el concepte d'element aleatori i donarem la definició del moviment Brownià, juntament amb algunes de les seves propietats fonamentals. Després, en el segon capítol, donarem les principals definicions i resultats que ens permetran estudiar la convergència de certs processos estocàstics cap al moviment Brownià. Finalment, al tercer capítol discutirem diferents mètodes per simular el moviment Brownià.

Capítol 1

El moviment brownià

El moviment brownià és un procés estocàstic fonamental en la teoria de la probabilitat i les seves aplicacions. Observat per primer cop pel botànic Robert Brown el 1828, el moviment brownià modelitza el moviment irregular del pol·len suspès en aigua.

El primer treball quantitatius es deu a Bachelier, qui l'any 1900 es va interessar en les fluctuacions dels preus de les accions. L'any 1905, Einstein va derivar la densitat de transició a partir de la teoria molecular-cinètica de la calor. Posteriorment N. Wiener va dur a terme un tractament matemàtic rigorós durant els anys 1923 - 1924, proporcionant la primera demostració d'existència. L'obra més profunda d'aquest període és la de P. Lévy, qui durant els anys 1939-1948 va introduir la construcció per interpolació i va estudiar els temps de pas, les trajectòries mostrals i el temps local.

Actualment, l'abast d'aplicació del moviment brownià va molt més enllà de l'estudi de partícules microscòpiques en suspensió i inclou la modelització de preus d'accions, soroll tèrmic en circuits elèctrics, i pertorbacions aleatòries en sistemes físics, biològics i econòmics. Concretament, en el camp de les probabilitats, el moviment brownià és un exemple fonamental de procés estocàstic amb trajectòries contínues. Entre les seves principals aplicacions en aquest àmbit destaquen, per exemple, el teorema de Donsker i el càlcul estocàstic en l'estudi d'equacions diferencials estocàstiques.

1.1 Elements aleatòris

Comencem donant un parell de definicions que ens seran útils al llarg d'aquest treball, ja que generalitzen la noció de *variable aleatòria* i la de la seva *leï* a contextos més amplis.

Definició 1.1.1. Considerem un espai de probabilitat $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, un espai mesurable (S, \mathcal{S}) i una funció $X : \Omega \rightarrow S$. Diem que X és un element aleatori si és $(\mathcal{F}/\mathcal{S})$ -mesurable, és a dir, si $X^{-1}(B) \in \mathcal{F}$ per a tot $B \in \mathcal{S}$. En particular,

- Diem que X és una variable aleatòria si $S = \mathbb{R}$.
- Diem que X és un vector aleatori si $S = \mathbb{R}^k$, $k > 1$.
- Diem que X és una funció aleatòria si $S = C[0, \infty]$ o algun altre espai de funcions.

Observació 1.1.2. Considerem un procés estocàstic continu $\{X_t : t \in T\}$ amb valors a \mathbb{R} , definit en un espai de probabilitat $(\Omega, \mathbb{F}, \mathbb{P})$. Aplicant les definicions anteriors,

- Fixat $t \in T$, la funció $X_t : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ és una variable aleatòria.
- Fixats $t_1, t_2, \dots, t_n \in T$, la funció $(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n}) : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^n$ definida per

$$(X_{t_1}, X_{t_2}, \dots, X_{t_n})(\omega) = (X_{t_1}(\omega), X_{t_2}(\omega), \dots, X_{t_n}(\omega)) \quad \forall \omega \in \Omega$$

és un vector aleatori (que s'anomena *vector aleatori de dimensió finita*).

- Fixat $\omega \in \Omega$, la funció $X_\cdot(\omega) : T \rightarrow \mathbb{R}$ definida per

$$X_\cdot(\omega)(t) = X_t(\omega) \quad \forall t \in T$$

és una funció contínua amb valors reals.

- En conseqüència, la funció $X : \Omega \rightarrow C[0, \infty]$ definida per

$$X(\omega) = X_\cdot(\omega) \quad \forall \omega \in \Omega$$

és una funció aleatòria.

Definició 1.1.3. Sigui X un element aleatori en un espai de probabilitats $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, amb valors a un espai mesurable (S, \mathcal{S}) . La llei de X , que denotem per $\mathcal{L}(X)$, és la mesura de probabilitat a \mathcal{S} definida per

$$\mathcal{L}(X)(B) := (\mathbb{P} \circ X^{-1})(B) = \mathbb{P}(X \in B) \quad \forall B \in \mathcal{S}.$$

1.2 Definició i propietats bàsiques

Comencem aquesta secció recordant algunes definicions i propietats bàsiques sobre variables aleatòries i distribucions normals. Recordem que una variable aleatòria X s'anomena *gaussiana* si existeixen $\mu \in \mathbb{R}$ i $\sigma^2 \geq 0$ tals que per a tot $B \in \mathcal{B}(\mathbb{R})$,

$$\mathbb{P}(X \in B) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_B \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) dx.$$

En aquest cas, escrivim $X \sim N(\mu, \sigma^2)$. Per altra banda, recordem que la funció característica d'una variable aleatòria X és la funció $\varphi_X : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ definida per

$$\varphi_X(u) := \mathbb{E}[e^{iuX}], \quad t \in \mathbb{R}.$$

Aquesta funció permet caracteritzar completament la distribució de X .

Observació 1.2.1. Si $X \sim N(0, t)$, la seva funció característica és

$$\varphi_X(u) = \mathbb{E}[e^{iuX}] = \frac{1}{\sqrt{2\pi t}} \int_{\mathbb{R}} e^{iux} e^{-\frac{x^2}{2t}} dx = \frac{e^{-u^2 t/2}}{\sqrt{2\pi t}} \int_{\mathbb{R}} e^{-\frac{(x-iut)^2}{2t}} dx = e^{-\frac{u^2 t}{2}}.$$

Després de donar aquests resultats i definicions, ja estem en condicions d'introduir la definició de moviment brownià estàndard.

Definició 1.2.2. Un moviment brownià estàndard és un procés estocàstic $\{B_t : t \geq 0\}$ amb valors a \mathbb{R} , definit en un espai de probabilitat $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, tal que compleix les següents propietats:

1. $B_0 = 0$, quasi segurament.
2. $B_{t_n} - B_{t_{n-1}}, B_{t_{n-1}} - B_{t_{n-2}}, \dots, B_{t_2} - B_{t_1}$ són variables aleatòries independents, per a tot $0 \leq t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_n$ (increments independents).
3. Per a tot $0 \leq s < t$, $B_t - B_s \sim N(0, t - s)$
4. La funció $t \mapsto B_t$ és contínua quasi segurament.

Capítol 2

Convergència cap al moviment Brownià

En aquest capítol estudiarem les condicions sota les quals certes successions de processos estocàstics convergeixen cap al moviment brownià. El resultat principal que desenvoluparem és l'anomenat *principi d'invariància de Donsker*, també conegut com a *teorema de Donsker* o *teorema central del límit funcional*.

D'ara endavant, treballarem en un espai mètric (S, ρ) separable i complet, junt amb la seva σ -àlgebra de Borel $\mathcal{B}(S)$, i denotarem per $\mathcal{P}(S)$ l'espai de mesures de probabilitat en $(S, \mathcal{B}(S))$. En el cas particular del moviment brownià, és útil treballar amb l'espai $S = C[0, \infty]$ de funcions contínues definides a l'interval $[0, \infty]$ i amb valors reals, en el qual és possible definir una mètrica¹, junt amb la seva σ -àlgebra de Borel $\mathcal{B}(C[0, \infty])$.²

2.1 Modes de convergència

Existeixen 4 modes principals de convergència per a elements aleatoris³:

1. La convergència en llei
2. La convergència en probabilitat
3. La convergència quasi segura
4. La convergència en mitjana d'ordre p

En aquesta secció introduïm dos d'aquests modes de convergència: la convergència en llei i la convergència en probabilitat, així com la convergència feble de mesures de probabilitat.

¹Vegeu [5] - pàg 60.

²A més, és habitual dotar $\mathcal{P}(S)$ amb l'anomenada *topologia feble* i metritzar-la mitjançant la *mètrica de Prokhorov*, per la qual la convergència de mesures de probabilitat és equivalent a la convergència feble que veurem a continuació. Si més no, aquests resultats no seran necessaris per al treball que desenvoluparem.

³És un fet ben conegut que tant la convergència quasi segura com la convergència en mitjana d'ordre p impliquen la convergència en probabilitat, i que aquesta última implica la convergència en llei. No obstant això, les implicacions inverses no es compleixen en general.

Definició 2.1.1. Sigui $\{\mathbb{P}_n\}_n \subset \mathcal{P}(S)$ una successió de mesures de probabilitat i $\mathbb{P} \in \mathcal{P}(S)$ una altra mesura de probabilitat. Diem que $\{\mathbb{P}_n\}_n$ convergeix feblement cap a \mathbb{P} , i escrivim $\mathbb{P}_n \xrightarrow{w} \mathbb{P}$, si per a tota funció $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ contínua i acotada es compleix que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_S f(s) d\mathbb{P}_n(s) = \int_S f(s) d\mathbb{P}(s).$$

Observació 2.1.2. En particular, el límit feble \mathbb{P} és una mesura de probabilitat, ja que si prenem $f \equiv 1$ obtenim que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_S 1 d\mathbb{P}_n(s) = \int_S 1 d\mathbb{P}(s) \implies \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}_n(S) = \mathbb{P}(S) \implies \mathbb{P}(S) = 1.$$

Definició 2.1.3. Sigui $\{X_n\}_n$ una successió d'elements aleatoris amb valors a $(S, \mathcal{B}(S))$. Sigui X un altre element aleatori amb valors a $(S, \mathcal{B}(S))$. Diem que $\{X_n\}_n$ convergeix en llei cap X , i escrivim $X_n \xrightarrow{\mathcal{L}} X$, si les lleis dels elements aleatoris X_n convergeixen feblement cap a la llei de X . És a dir, si

$$\mathcal{L}(X_n) \xrightarrow{w} \mathcal{L}(X).$$

Observació 2.1.4. Aquesta condició és equivalent a demanar que per a tota funció $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ contínua i acotada es compleixi que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[f(X_n)] = \mathbb{E}[f(X)],$$

ja que mitjançant un canvi de variable i recordant que $\mathcal{L}(X_n) := \mathbb{P}_n \circ X_n^{-1}$, tenim que

$$\mathbb{E}[f(X_n)] = \int_{\Omega_n} f(X_n(\omega)) d\mathbb{P}_n(\omega) = \int_S f(s) d\mathcal{L}(X_n)(s),$$

i de manera anàloga,

$$\mathbb{E}[f(X)] = \int_{\Omega} f(X(\omega)) d\mathbb{P}(\omega) = \int_S f(s) d\mathcal{L}(X)(s).$$

Definició 2.1.5. Sigui $\{X_n\}_n$ una successió d'elements aleatoris en un mateix espai de probabilitat $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ i amb valors a $(S, \mathcal{B}(S))$. Sigui X un element aleatori en el mateix espai de probabilitat i amb valors a $(S, \mathcal{B}(S))$. Diem que $\{X_n\}_n$ convergeix en probabilitat cap a X , i escrivим $X_n \xrightarrow{P} X$, si per a tot $\varepsilon > 0$ es compleix que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}(\rho(X_n, X) > \varepsilon) = 0.$$

Com a cas particular, diem que $\{X_n\}_n$ convergeix en probabilitat cap a $s \in S$, i escrivим $X_n \xrightarrow{P} s$, si $\{X_n\}_n$ convergeix en probabilitat cap a l'element aleatori constant $X \equiv s$. És a dir, si per a tot $\varepsilon > 0$ es compleix que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{P}(\rho(X_n, s) > \varepsilon) = 0.$$

2.2 Ajustament i Teorema de Prohorov

En aquesta secció introduïm els conceptes d'ajustament i compactat relativa per a famílies de mesures de probabilitat, així com el teorema de Prohorov, que estableix l'equivalència entre aquests dos conceptes en espais mètrics separables complets. Aquest últim resultat és una eina fonamental per demostrar la convergència en llei del passeig aleatori escalat.

Definició 2.2.1. Diem que una família $\Pi \subset \mathcal{P}(S)$ de mesures de probabilitat és relativament compacte si tota successió d'elements de Π admet una subsuccessió feblement convergent. És a dir, si donada $\{\mathbb{P}_n\}_n \subset \Pi$, existeixen una subsuccessió $\{\mathbb{P}_{n_k}\}_k \subset \{\mathbb{P}_n\}_n$ i una mesura de probabilitat $\mathbb{P} \in \mathcal{P}(S)$ tals que $\mathbb{P}_{n_k} \xrightarrow{w} \mathbb{P}$. D'igual manera, diem que una successió d'elements aleatoris $\{X_n\}_n$ és relativament compacta si la família de les seves lleis $\{\mathcal{L}(X_n)\}_n$ ho és.

Observació 2.2.2. Si una successió $\{\mathbb{P}_n\}_n \subset \mathcal{P}(S)$ de mesures de probabilitat convergeix feblement cap a una mesura de probabilitat \mathbb{P} , aleshores és relativament compacta. Per tant, si una successió d'elements aleatoris $\{X_n\}_n$ convergeix en llei cap a un element aleatori X , aleshores és relativament compacta.

Definició 2.2.3. Diem que una família $\Pi \subset \mathcal{P}(S)$ de mesures de probabilitat és ajustada si $\forall \varepsilon > 0$ existeix un conjunt compacte $K_\varepsilon \subset S$ tal que $\mathbb{P}(K_\varepsilon) \geq 1 - \varepsilon$, $\forall \mathbb{P} \in \Pi$. D'igual manera, diem que una successió d'elements aleatoris $\{X_n\}_n$ amb valors en S és ajustada si la família de les seves lleis $\{\mathcal{L}(X_n)\}_n$ ho és. És a dir, si $\forall \varepsilon > 0$ existeix un conjunt compacte $K_\varepsilon \subset S$ tal que $\mathbb{P}_n(X_n \in K_\varepsilon) \geq 1 - \varepsilon$, $\forall n \geq 1$.

Teorema 2.2.4 (Teorema de Prohorov). *Sigui (S, ρ) un espai mètric separable i complet. Una família $\Pi \subset \mathcal{P}(S)$ de mesures de probabilitat és relativament compacte si i només si és ajustada.*

Prova. M'agradaria comentar si podem evitar aquesta demostració.

□

2.3 El principi d'invariància de Donsker

Sigui $\{\xi_n\}_n$ una seqüència de variables aleatòries independents i idènticament distribuïdes amb esperança 0 i variància σ^2 , $0 < \sigma < \infty$. Considerem la successió de sumes parcials $S_0 = 0$ i $S_n = \sum_{i=1}^n \xi_i$ per a $n \geq 1$. Per a cada $n \in \mathbb{N}$, considerem el procés de sumes parcials

$$\frac{1}{\sigma\sqrt{n}} S_{[nt]}, \quad t \in [0, \infty],$$

i la corresponent interpolació lineal d'aquest procés,

$$X_t^{(n)} = \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} (S_{[nt]} + (nt - [nt])\xi_{[nt]+1}), \quad t \in [0, \infty]. \quad (2.1)$$

En aquesta secció, veurem que la successió de processos $\{X^{(n)}\}_n$ convergeix en llei cap al moviment Brownià estàndard B . Per a demostrar això, necessitarem dos lemes tècnics que ens permetran establir la convergència en llei de certs vectors aleatoris cap al moviment brownià.

Lema 2.3.1. *Siguin $\{X^{(n)}\}_n$, $\{Y^{(n)}\}_n$ i X elements aleatoris amb valors a (S, ρ) , tals que per a tot $n \geq 1$, $X^{(n)}$ i $Y^{(n)}$ estan definides en el mateix espai de probabilitats. Suposem que $X^n \xrightarrow{\mathcal{L}} X$ i que $\rho(X^n, Y^n) \xrightarrow{P} 0$. Aleshores, $Y^n \xrightarrow{\mathcal{L}} X$. [5], pàg 120*

Prova. Siguin $\{(\Omega_n, \mathcal{F}_n, \mathbb{P}_n)\}_n$ els espais de probabilitat on estan definits els elements aleatoris $X^{(n)}$ i $Y^{(n)}$. Sigui $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ un altre espai de probabilitat on està definit l'element

aleatori X . Sigui $f : S \rightarrow \mathbb{R}$ una funció contínua i acotada. Per l'observació 2.1.4, és suficient demostrar que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}_n[f(X^{(n)}) - f(Y^{(n)})] = 0.$$

Sigui $M = \sup_{s \in S} |f(s)| < \infty$. Per l'observació 2.2.2, com $X^{(n)} \xrightarrow{\mathcal{L}} X$, aleshores $\{X^{(n)}\}_n$ és relativament compacta. Pel teorema de Prohorov, aleshores $\{X^{(n)}\}_n$ és ajustada. Per tant, per a tot $\varepsilon > 0$, existeix un conjunt compacte $K_\varepsilon \subset S$ tal que

$$\mathbb{P}_n(X^{(n)} \in K_\varepsilon) \geq 1 - \frac{\varepsilon}{6M}, \quad \forall n \in \mathbb{N}.$$

Com f és continua, existeix $0 < \delta < 1$ tal que $|f(x) - f(y)| < \varepsilon/3$ per a qualssevol $x, y \in K_\varepsilon$ tals que $\rho(x, y) < \delta$. Per altra banda, per hipòtesi $\rho(X^n, Y^n) \xrightarrow{P} 0$. Per tant, existeix $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que

$$\mathbb{P}_n\left(\left|\rho(X^{(n)}, Y^{(n)}) - 0\right| > \delta\right) < \frac{\varepsilon}{6M}, \quad \forall n \geq n_0.$$

Per tant, per a tot $n \geq n_0$,

$$\begin{aligned} \left| \int_{\Omega_n} f(X^{(n)}) - f(Y^{(n)}) d\mathbb{P}_n \right| &\leq \frac{\varepsilon}{3} \mathbb{P}_n\left(X^{(n)} \in K, \rho(X^{(n)}, Y^{(n)}) < \delta\right) \\ &\quad + 2M \mathbb{P}_n\left(X^{(n)} \notin K\right) \\ &\quad + 2M \mathbb{P}_n\left(\rho(X^{(n)}, Y^{(n)}) > \delta\right) \leq \varepsilon. \end{aligned}$$

□

Lema 2.3.2. Siguin $\{X^{(n)}\}_n$ i X elements aleatoris amb valors a $(S, \mathcal{B}(S))$. Siguin $(S', \mathcal{B}(S'))$ un altre espai mètric i sigui $\varphi : S \rightarrow S'$ una funció contínua. Si $X^{(n)} \xrightarrow{\mathcal{L}} X$, aleshores $\varphi(X^{(n)}) \xrightarrow{\mathcal{L}} \varphi(X)$. [3], pàg 20

Prova. Sigui $f : S' \rightarrow \mathbb{R}$ una funció contínua i acotada. Aleshores, $f \circ \varphi : S \rightarrow \mathbb{R}$ és també contínua i acotada. Per l'observació 2.1.4, com $X^{(n)} \xrightarrow{\mathcal{L}} X$, aleshores

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[f(\varphi(X^{(n)})]] = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}[(f \circ \varphi)(X^{(n)})] = \mathbb{E}[(f \circ \varphi)(X)] = \mathbb{E}[f(\varphi(X))].$$

Novament per l'observació 2.1.4, això equival a $\varphi(X^{(n)}) \xrightarrow{\mathcal{L}} \varphi(X)$.

□

Teorema 2.3.3. Siguin $\{X^{(n)}\}_n$ la successió de processos definits a l'equació (2.1). Siguin $0 \leq t_1 < t_2 < \dots < t_d < \infty$. Aleshores,

$$(X_{t_1}^{(n)}, X_{t_2}^{(n)}, \dots, X_{t_d}^{(n)}) \xrightarrow{\mathcal{L}} (B_{t_1}, B_{t_2}, \dots, B_{t_d}) \quad \text{quan } n \rightarrow \infty,$$

on $\{B_t : t \geq 0\}$ és un moviment Brownià estàndard. [5], teorema 4.15, pàg 67

Prova. Considerarem el cas $d = 2$. El cas general és anàleg però la notació és més feixuga. Siguin $s = t_1$ i $t = t_2$. Volem veure que

$$(X_s^{(n)}, X_t^{(n)}) \xrightarrow{\mathcal{L}} (B_s, B_t).$$

Per la definició d'interpolació lineal (2.1), per a tot $u \geq 0$ tenim

$$\left| X_u^{(n)} - \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} S_{\lfloor nu \rfloor} \right| \leq \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} |\xi_{\lfloor nu \rfloor + 1}|.$$

Ara, sigui $\varepsilon > 0$. Aplicant la desigualtat de Txebixev,

$$\mathbb{P}\left(\left| X_u^{(n)} - \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} S_{\lfloor nu \rfloor} \right| > \varepsilon\right) \leq \mathbb{P}\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{n}} |\xi_{\lfloor nu \rfloor + 1}| > \varepsilon\right) \leq \frac{\sigma^2}{\varepsilon^2 \sigma^2 n} = \frac{1}{\varepsilon^2 n} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

En particular, això val per $u = s$ i $u = t$, i per tant

$$\left\| (X_s^{(n)}, X_t^{(n)}) - \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} (S_{\lfloor ns \rfloor}, S_{\lfloor nt \rfloor}) \right\| \xrightarrow{P} 0. \quad (2.2)$$

Per altra banda, siguin $u, v \in \mathbb{R}$. Aleshores, com les variables aleatòries $\{\xi_n\}_n$ són independents per construcció,

$$\begin{aligned} \lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left[\exp \left\{ \frac{iu}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j + \frac{iv}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=\lfloor ns \rfloor + 1}^{\lfloor nt \rfloor} \xi_j \right\} \right] &= \\ &= \mathbb{E} \left[\exp \left\{ \frac{iu}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j \right\} \right] \cdot \mathbb{E} \left[\exp \left\{ \frac{iv}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=\lfloor ns \rfloor + 1}^{\lfloor nt \rfloor} \xi_j \right\} \right]. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Fixem-nos en el primer factor (l'altre és idèntic substituint s per $t - s$). Com que

$$\left| \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j - \frac{\sqrt{s}}{\sigma\sqrt{\lfloor ns \rfloor}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j \right| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0,$$

i pel teorema central del límit

$$\frac{\sqrt{s}}{\sigma\sqrt{\lfloor ns \rfloor}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j \xrightarrow{\mathcal{L}} \mathcal{N}(0, s),$$

aleshores obtenim que

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left[\exp \left\{ \frac{iu}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j \right\} \right] = e^{-\frac{u^2 s}{2}}.$$

De manera anàloga,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left[\exp \left\{ \frac{iv}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=\lfloor ns \rfloor + 1}^{\lfloor nt \rfloor} \xi_j \right\} \right] = e^{-\frac{v^2(t-s)}{2}}.$$

Substituïm aquestes expressions a (2.3), obtenim

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mathbb{E} \left[\exp \left\{ \frac{iu}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j + \frac{iv}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=\lfloor ns \rfloor + 1}^{\lfloor nt \rfloor} \xi_j \right\} \right] = e^{-\frac{u^2 s}{2}} e^{-\frac{v^2(t-s)}{2}}.$$

Per tant,

$$\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=1}^{\lfloor ns \rfloor} \xi_j, \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} \sum_{j=\lfloor ns \rfloor+1}^{\lfloor nt \rfloor} \xi_j \right) \xrightarrow{\mathcal{L}} (B_s, B_t - B_s).$$

Considerem l'aplicació contínua $\varphi(x, y) = (x, x + y)$. Pel lemma 2.3.2, la condició anterior implica que

$$\left(\frac{1}{\sigma\sqrt{n}} S_{\lfloor ns \rfloor}, \frac{1}{\sigma\sqrt{n}} S_{\lfloor nt \rfloor} \right) \xrightarrow{\mathcal{L}} (B_s, B_t). \quad (2.4)$$

Per tant, per les condicions (2.2) i (2.4), i pel lemma 2.3.1, tenim que

$$(X_s^{(n)}, X_t^{(n)}) \xrightarrow{\mathcal{L}} (B_s, B_t),$$

com volíem demostrar. \square

De fet, sota la hipòtesi d'ajustament, podem demostrar el següent resultat, que és encara més fort:

Teorema 2.3.4. *Sigui X un procés continu i sigui $\{X^{(n)}\}_n$ una seqüència ajustada de processos continuos tal que per a qualssevol $0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_d < \infty$,*

$$(X_{t_1}^{(n)}, \dots, X_{t_d}^{(n)}) \xrightarrow{\mathcal{L}} (X_{t_1}, \dots, X_{t_d}).$$

Aleshores, $\{X^{(n)}\}_n \xrightarrow{\mathcal{L}} X$. [5], teorema 4.15, pàg 65

Prova. Volem veure que $\{X^{(n)}\}_n \xrightarrow{\mathcal{L}} X$. És a dir, que $\mathcal{L}(X^{(n)}) \xrightarrow{w} \mathcal{L}(X)$, entenent $\{X^{(n)}\}_n$ i X com funcions aleatòries amb valors a $(C[0, \infty], \mathcal{B}(C[0, \infty]))$.

Pel teorema de Prohorov, com $\{X^{(n)}\}_n$ és ajustada, aleshores és relativament compacta. Per tant, tota subsuccessió $\{X^{(n_k)}\}_k \subset \{X^{(n)}\}_n$ té una subsuccessió $\{Y^{(n)}\}_n \subset \{X^{(n_k)}\}_k$ tal que $\mathcal{L}(Y^{(n)}) \xrightarrow{w} \mathbb{P}$, per a alguna $\mathbb{P} \in \mathcal{P}(C[0, \infty])$.

Suposem que una altra subsuccessió $\{Z^{(n)}\}_n$ induceix mesures a $(C[0, \infty], \mathcal{B}(C[0, \infty]))$ que convergeixen feblement a una mesura $\mathbb{Q} \in \mathcal{P}(C[0, \infty])$. Aleshores, \mathbb{P} i \mathbb{Q} han de tenir les mateixes distribucions a dimensió finita. És a dir,

$$\mathbb{P}[w \in C[0, \infty] : (w(t_1), \dots, w(t_d)) \in A] = \mathbb{Q}[w \in C[0, \infty] : (w(t_1), \dots, w(t_d)) \in A]$$

per a tot $0 \leq t_1 < t_2 \dots < t_d < \infty$, $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$, $d \geq 1$. Per tant, $\mathbb{P} = \mathbb{Q}$.

Ara, suposem que la seqüència de mesures $\{\mathcal{L}(X^{(n)})\}_n$ no convergeix feblement a $\mathcal{L}(X)$. Aleshores, existeix una funció $f : C[0, \infty] \rightarrow \mathbb{R}$ contínua i acotada tal que el límit $\lim_{n \rightarrow \infty} \int f(w) \mathcal{L}(X_n)(dw)$ no existeix, o bé és diferent de $\int f(w) \mathcal{L}(X)(dw)$. En qualsevol cas, pel teorema de Prohorov, podem escollir una subseqüència $\{\mathcal{L}(X^{(n_k)})\}_k$ tal que $\lim_{k \rightarrow \infty} \int f(w) \mathcal{L}(X_k)(dw)$ existeix però és diferent de $\int f(w) \mathcal{L}(X)(dw)$. Aquesta subseqüència no conté cap subseqüència $\{\mathcal{L}(X^{(n_{k_l})})\}_l$ tal que $\mathcal{L}(X^{(n_{k_l})}) \xrightarrow{w} \mathcal{L}(X)$, cosa que contradiu la conclusió del paràgraf anterior.

\square

Amb tot això, estem en condicions d'introduir el teorema de Donsker, que estableix la convergència en llei del procés construït a l'equació (2.1) cap al moviment Brownià estàndard.

Teorema 2.3.5 (Teorema de Donsker). *Sigui $\{X^{(n)}\}_n$ la successió de processos definits a l'equació (2.1). Aleshores, $X^{(n)} \xrightarrow{\mathcal{L}} B$, on $\{B_t : t \geq 0\}$ és un moviment Brownià estàndard.*

Prova. Pels teoremes 2.3.3 i 2.3.4 que acabem de veure, només resta demostrar l'ajustament de la successió de processos $\{X^{(n)}\}_n$. El cas general requereix una caracterització de l'ajustament a l'espai $C[0, \infty]$, que es pot trobar detallada a [3] i [5]. En aquest treball, demostrarem l'ajustament per a una família de processos construïts a partir del passeig aleatori com a cas particular.

□

2.4 Convergència del passeig aleatori cap al moviment brownià

Considerem les variables aleatòries $\{\xi_n\}_n$ independents i idènticament distribuïdes amb valors a $\{-1, 1\}$, tals que

$$\mathbb{P}(\xi_n = 1) = \mathbb{P}(\xi_n = -1) = \frac{1}{2} \quad n \geq 1.$$

Diem que $S_n = \sum_{i=1}^n \xi_i$ és un passeig aleatori. Com a cas particular del teorema de Donsker, veurem que la corresponent interpolació línia $\{X^{(n)}\}_n$, definida com a (2.1), convergeix en llei al moviment brownià. Per a això, ens serà útil el següent criteri:

Teorema 2.4.1 (Criteri de Billingsley). *Una successió de processos $\{X^{(n)}\}_n$ és ajustada si se satisfan aquestes dues condicions:*

- a) *La successió $\{X_0^{(n)}\}_n$ és ajustada.*
- b) *Existeixen constants $\gamma \geq 0$ i $\alpha > 1$ i una funció $F \in C[0, \infty]$ no decreixent tal que*

$$\mathbb{P}\{|X_t^{(n)} - X_s^{(n)}| \geq \lambda\} \leq \frac{1}{\lambda^\gamma} |F(t) - F(s)|^\alpha \quad (2.5)$$

per a tot $s, t \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$ i $\lambda > 0$.

Prova. Aquest resultat va ser demostrat per primer cop per P. Billingsley l'any 1968⁴.

□

D'una banda, observem que la condició

$$\mathbb{E}[|X_t^{(n)} - X_s^{(n)}|^\gamma] \leq |F(t) - F(s)|^\alpha \quad (2.6)$$

implica (2.5) per la desigualtat de Txebixev. D'altra banda, en el nostre cas, $X_0^{(n)} = 0$ per a tot $n \in \mathbb{N}$. Per tant, per a demostrar l'ajustament de la successió de processos $\{X^{(n)}\}_n$, és suficient provar que existeixen constants $\gamma \geq 0$ i $\alpha > 1$ i una funció contínua $F \in C[0, \infty]$ no decreixent tal que (2.6) es compleixi.

⁴Vegeu [2]

Proposició 2.4.2. *Siguin $\{X^{(n)}\}_n$ les trajectòries del passeig aleatori convenientment normalitzades com a l'equació (2.1). Aleshores, per a tot $s < t < \infty$,*

$$\mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] \leq C(t-s)^2.$$

Prova. Observem que podem escriure els processos $X_t^{(n)}$ de la següent manera:

$$X_t^{(n)} = \frac{1}{\sqrt{n}} \int_0^{nt} \theta(x) dx, \quad \text{on} \quad \theta(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \xi_k \mathbf{1}_{[k-1,k)}(x).$$

En efecte, partint de la definició (2.1), tenim que

$$\begin{aligned} X_t^{(n)} &= \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\sum_{j=1}^{\lfloor nt \rfloor} \xi_j + (nt - \lfloor nt \rfloor) \xi_{\lfloor nt \rfloor + 1} \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\sum_{j=1}^{\lfloor nt \rfloor} \int_{j-1}^j \xi_j dx + \int_{\lfloor nt \rfloor}^{nt} \xi_{\lfloor nt \rfloor + 1} dx \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{n}} \left(\int_0^{\lfloor nt \rfloor} \sum_{k=1}^{\infty} \xi_k \mathbf{1}_{[k-1,k)}(x) dx + \int_{\lfloor nt \rfloor}^{nt} \sum_{k=1}^{\infty} \xi_k \mathbf{1}_{[k-1,k)}(x) dx \right) \\ &= \frac{1}{\sqrt{n}} \int_0^{nt} \sum_{k=1}^{\infty} \xi_k \mathbf{1}_{[k-1,k)}(x) dx. \end{aligned}$$

Aleshores,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] &= \frac{1}{n^2} \mathbb{E} \left[\left(\int_{ns}^{nt} \theta(x) dx \right)^4 \right] \\ &= \frac{1}{n^2} \mathbb{E} \left[\int_{ns}^{nt} \cdots \int_{ns}^{nt} \theta(x_1) \cdots \theta(x_4) dx_1 \cdots dx_4 \right]. \end{aligned}$$

Com tenim $4! = 24$ possibles combinacions d'ordenar les variables x_1, x_2, x_3, x_4 , aleshores

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] &= \frac{24}{n^2} \mathbb{E} \left[\int_{ns}^{nt} \cdots \int_{ns}^{nt} \theta(x_1) \cdots \theta(x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}} dx_1 \cdots dx_4 \right] \\ &= \frac{24}{n^2} \int_{ns}^{nt} \cdots \int_{ns}^{nt} \mathbb{E}[\theta(x_1) \cdots \theta(x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}}] dx_1 \cdots dx_4. \end{aligned} \tag{2.7}$$

Observem que

$$\begin{aligned} &\mathbb{E}[\theta(x_1) \cdots \theta(x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}}] \\ &= \mathbb{E} \left[\sum_{k_1, k_2, k_3, k_4=1}^{\infty} \xi_{k_1} \xi_{k_2} \xi_{k_3} \xi_{k_4} \mathbf{1}_{[k_1-1, k_1)}(x_1) \cdots \mathbf{1}_{[k_4-1, k_4)}(x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}} \right] \\ &= \sum_{k_1, k_2, k_3, k_4=1}^{\infty} \mathbb{E}[\xi_{k_1} \xi_{k_2} \xi_{k_3} \xi_{k_4}] \mathbf{1}_{[k_1-1, k_1)}(x_1) \cdots \mathbf{1}_{[k_4-1, k_4)}(x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}}. \end{aligned} \tag{2.8}$$

Recordem que en el cas del passeig aleatori, $Im(\xi_k) = \{-1, 1\}$, $\mathbb{E}[\xi_k] = 0$ i $\text{Var}(\xi_k) = 1$ per a tot $k \geq 1$. Per la hipòtesi independència i tenint en compte que $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ estan ordenades, obtenim que

$$\mathbb{E}[\xi_{k_1}\xi_{k_2}\xi_{k_3}\xi_{k_4}] = \begin{cases} 0, & \text{si existeix } j \text{ tal que } k_j \neq k_i \forall i \neq j, \\ 1, & \text{si } k_1 = k_2 \neq k_3 = k_4 \\ 1, & \text{si } k_1 = \dots = k_4. \end{cases}$$

Substituïnt a l'expressió (2.8), obtenim que

$$\mathbb{E}[\theta(x_1) \cdots \theta(x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}}] = \sum_{k,j=1}^{\infty} \mathbf{1}_{[k-1,k)^2}(x_1, x_2) \mathbf{1}_{[j-1,j)^2}(x_3, x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}}.$$

Aplicant això a l'equació (2.7), obtenim la següent expressió:

$$\begin{aligned} & \mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] \\ &= \frac{24}{n^2} \int_{ns}^{nt} \cdots \int_{ns}^{nt} \sum_{k,j=1}^{\infty} \mathbf{1}_{[k-1,k)^2}(x_1, x_2) \mathbf{1}_{[j-1,j)^2}(x_3, x_4) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}} dx_1 \cdots dx_4. \end{aligned}$$

Utilitzant la desigualtat $\mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2 \leq x_3 \leq x_4\}} \leq \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2\}} \mathbf{1}_{\{x_3 \leq x_4\}}$, obtenim que

$$\mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] \leq \frac{24}{n^2} \left(\sum_{k=1}^{\infty} \int_{ns}^{nt} \int_{ns}^{nt} \mathbf{1}_{[k-1,k)}(x_1) \mathbf{1}_{[k-1,k)}(x_2) \mathbf{1}_{\{x_1 \leq x_2\}} dx_1 dx_2 \right)^2.$$

Ara fem el canvi de variables $y_1 = x_1/n$ i $y_2 = x_2/n$:

$$\mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] \leq \frac{24}{n^2} n^4 \left(\int_s^t \int_s^t \sum_{k=1}^{\infty} \mathbf{1}_{[\frac{k-1}{n}, \frac{k}{n})}(y_1) \mathbf{1}_{[\frac{k-1}{n}, \frac{k}{n})}(y_2) \mathbf{1}_{\{y_1 \leq y_2\}} dy_1 dy_2 \right)^2.$$

Observem que

$$\sum_{k=1}^{\infty} \mathbf{1}_{\{\frac{k-1}{n} \leq y_1 < \frac{k}{n}\}} \mathbf{1}_{\{\frac{k-1}{n} \leq y_2 < \frac{k}{n}\}} \leq \mathbf{1}_{\{y_2 - y_1 \leq \frac{1}{n}\}}.$$

Per tant,

$$\mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] \leq 24n^2 \left(\int_s^t \int_s^t \mathbf{1}_{\{y_2 - y_1 \leq \frac{1}{n}\}} \mathbf{1}_{\{y_1 \leq y_2\}} dy_1 dy_2 \right)^2.$$

Calculant l'integral,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[(X_t^{(n)} - X_s^{(n)})^4] &\leq 24n^2 \left(\int_s^t \int_{\max(y_2 - \frac{1}{n}, s)}^{y_2} dy_1 dy_2 \right)^2 \\ &\leq 24n^2 \left(\int_s^t \int_{y_2 - \frac{1}{n}}^{y_2} dy_1 dy_2 \right)^2 \\ &= 24n^2 \left(\int_s^t \frac{1}{n} dy_2 \right)^2 \\ &= 24(t-s)^2. \end{aligned}$$

Prenent $C = 24$, hem provat la desigualtat desitjada. □

Ja hem vist a la secció anterior (concretament, al teorema 2.3.3) que les distribucions finito-dimensionals del procés $\{X^{(n)}\}_n$ convergeixen en llei cap a les del moviment brownià. Per completar la demostració de la convergència en llei del procés, només ens calia verificar la condició d'ajustament de la successió $\{X^{(n)}\}_n$. Mitjançant la proposició 2.4.2 i el criteri de Billingsley, hem provat que aquesta condició es compleix en el cas del passeig aleatori. Per tant, pel teorema 2.3.4, el passeig aleatori convergeix en llei cap al moviment brownià.

Bibliografia

- [1] Xavier Bardina. *Del passeig aleatori al moviment brownià*. Barcelona: Departament de Matemàtiques, Universitat Autònoma de Barcelona, 2015.
- [2] Patrick Billingsley. *Convergence of Probability Measures*. 1a ed. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1968.
- [3] Patrick Billingsley. *Convergence of Probability Measures*. 2a ed. Wiley Series in Probability and Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1999.
- [4] Richard M. Dudley. *Real Analysis and Probability*. 2a ed. Cambridge Studies in Advanced Mathematics. Cambridge University Press, 2002.
- [5] Ioannis Karatzas i Steven E. Shreve. *Brownian Motion and Stochastic Calculus*. 2a ed. Vol. 113. Graduate Texts in Mathematics. New York i Berlin: Springer, 1991.
- [6] Jean-François Le Gall. *Brownian Motion, Martingales, and Stochastic Calculus*. 1a ed. Vol. 274. Graduate Texts in Mathematics. Springer International Publishing, 2016.
- [7] Carles Rovira. *Processos estocàstics: un curs bàsic*. 2020.
- [8] René L. Schilling. *Brownian Motion: A Guide to Random Processes and Stochastic Calculus*. With a Chapter on Simulation by Björn Böttcher. 3a ed. De Gruyter Textbook. Berlin / Boston: Walter de Gruyter, 2021.