Cálculo estocástico.

Asumiremos que nuestras v.a. están definidas en un espacio de prob. $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$.

Vectores Gaussianos:

X es una v.a. $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ $\quad \mu \in \mathbb{R}, \ \sigma \in \mathbb{R}_+$

si

- $$\mathbb{P}[X \in A] = \int_{\mathbb{R}} \mathbb{1}_A(x) f_X(x) dx \qquad A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}).$$

$$f_X(x) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{ -\frac{1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2 \right\}$$

- Alternativamente:

$$\forall \ \lambda \in \mathbb{R}, \quad \mathbb{E}[e^{i\lambda X}] = e^{i\lambda\mu} e^{-\frac{\sigma^2}{2}x^2}$$

Más generalidad:

Si $X_1, \ldots, X_d$ son v.a. decimos que $(X_1, \ldots, X_d)$ es un vector gaussiano si

$\forall \quad \xi_1, \ldots, \xi_d \in \mathbb{R},$

$\xi_1 X_1 + \cdots + \xi_d X_d$ tiene distribución Gaussiana.

Ejemplo:

Si $X_1, \dots, X_d$ son v.a. Gaussianas estandar independientes

¿es $(X_1, \dots, X_d)$ un vector Gaussiano? Si, pues.

Para analizar el problema estudiamos

$Y = \xi_1 X_1 + \cdots + \xi_d X_d$ ← ¿es una v.a. normal?

$$\mathbb{E}[e^{i\lambda Y}] = \mathbb{E}[e^{i\lambda(\xi_1 X_1 + \cdots + \xi_d X_d)}]$$

$$= \mathbb{E}[e^{i\lambda \xi_1 X_1 + \cdots + i\lambda \xi_d X_d}]$$

$$= \mathbb{E}\left[\prod_{j=1}^{d} e^{i\lambda \xi_j X_j}\right]$$

$$= \prod_{j=1}^{d} \mathbb{E}[e^{i\lambda \xi_j X_j}]$$

$$= \prod_{j=1}^{d} e^{-\frac{(\lambda \xi_j)^2}{2}} = e^{-\frac{1}{2}\lambda^2 \left(\sum_{j=1}^{d} \xi_j^2\right)}$$

$\Rightarrow Y \sim$ Normal $\Rightarrow (X_1, \dots, X_d)$ es un vector gaussiano.

Itempool:

Intuición incorrecta:

X, Y Gaussianas.

$$\mathbb{E}[XY] = \mathbb{E}[X]\mathbb{E}[Y] = 0$$

- Si (X,Y) es un vector Gaussiano, entonces si $\mathbb{E}[XY]=0$, X es indep de Y.
- Pero si no es vector conjuntamente Gaussiano, $\mathbb{E}[XY]=0 \not\Rightarrow X \perp Y$

contraejemplo:

$X \sim N(0,1)$ $\quad$ ξ es una v.a con ley

$Y = \xi X$, $\quad$ $\mathbb{P}[\xi=-1] = \mathbb{P}[\xi=1] = \frac{1}{2}$

con $\xi \perp X$.

Tarea: ver que Y es v.a. Gaussiana estándar.

Ley de un vector Gaussiano:

$\vec{X} := (X_1, \ldots, X_d) \leftarrow$ mapeo de $\Omega \to \mathbb{R}^d$

Teorema:

Si $\vec{X}$ es un vector Gaussiano, con matriz de covarianzas no degenerada, entonces

transpuesta de x

$$\mathbb{P}[\vec{X} \in A] = \frac{1}{(2\pi)^{d/2} |\Sigma|^{1/2}} \int_{\mathbb{R}^d} \mathbb{1}_A(x) \exp\left\{ -\frac{1}{2}(x-\mu)^* \Sigma^{-1} (x-\mu) \right\} dx$$

Para $A \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$. donde

$$\Sigma = (\Sigma_{i,j} \; ; \; 1 \leq i,j \leq d). \quad \Sigma_{i,j} := \mathbb{E}[(X_i - \mu_i)(X_j - \mu_j)]$$

$$\mu = (\mu_1, \ldots, \mu_d) = (\mathbb{E}[X_1], \ldots, \mathbb{E}[X_d]).$$

Prueba de la clase:

Lemma: $\vec{X} \overset{\text{ley}}{=} \mu + \Sigma^{1/2} \vec{Z}$ $\qquad \vec{Z} = (Z_1, \ldots, Z_d)$,

$\uparrow$

Como Σ es no degenerada y positiva definida, puedo sacar raíz

con $\{Z_i\}_{i \leq d}$ i.i.d. $Z_1 \sim N(0,1)$.

Entonces, $\vec{X}$ tiene densidad, que por cambio de variable, es

$$f_{\vec{X}}(x_1, \ldots, x_d) = \exp\left\{ -\frac{1}{2}(x-\mu)^* \Sigma^{-1} (x-\mu) \right\}$$

Prueba alternativa:

Por cambio de variable, la función característica asociada

a $$g(x) := \frac{1}{(2\pi)^{d/2}|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-\mu)^* \Sigma^{-1}(x-\mu)\right\}$$ es

$$\vec{\lambda} \mapsto \int_{\mathbb{R}^d} e^{i\vec{\lambda}\cdot x} g(x)\,dx =*$$

$$\left(\Sigma^{-1/2}(x-\mu)\right)^* \left(\Sigma^{-1/2}(x-\mu)\right)$$

$$\downarrow$$

$$= \int_{\mathbb{R}^d} e^{i\vec{\lambda}\cdot x} \frac{1}{(2\pi)^{d/2}|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-\mu)^* \Sigma^{-1}(x-\mu)\right\} dx$$

cambiamos x por $y = \Sigma^{-1/2}(x-\mu)$ y obtenemos

$$* = \exp\{i\vec{\lambda}\cdot\mu\} \exp\left\{-\frac{1}{2}\lambda^t \Sigma \lambda\right\}.$$

Coincide ésta con la función característica de $(X_1, \dots, X_d)$:

$$\vec{\lambda} \longmapsto \mathbb{E}\left[e^{i\lambda_1 X_1 + \dots + i\lambda_d X_d}\right] =*$$

como $Y := \lambda_1 X_1 + \dots + \lambda_d X_d$ es vector Gaussiano

$$* = \mathbb{E}\left[e^{iY}\right] = e^{i\mathbb{E}[Y] - \frac{1}{2}\mathrm{Var}[Y]}$$

$$\mathbb{E}[Y] = \vec{\lambda} \cdot \mu$$

$$\mathrm{Var}[Y] = \mathbb{E}[((\lambda_1 X_1 + \cdots + \lambda_d X_d) - (\lambda_1 \mu_1 + \cdots + \lambda_d \mu_d))^2]$$

$$= \mathbb{E}[(\lambda_1 X_1 + \cdots + \lambda_d X_d)^2] - (\lambda_1 \mu_1 + \cdots + \lambda_d \mu_d)^2$$

$$= \lambda_1^2 \mathbb{E}[X_1^2] + \cdots + \lambda_d^2 \mathbb{E}[X_d^2]$$

$$+ 2 \sum_{i<j} \lambda_i \lambda_j \mathbb{E}[X_i X_j]$$

$$- (\lambda_1^2 \mu_1^2 + \cdots + \lambda_d^2 \mu_d^2)$$

$$- 2 \sum_{i<j} \lambda_i \lambda_j \mu_i \mu_j$$

$$= \lambda_1^2 \mathrm{Var}[X_1] + \cdots + \lambda_d^2 \mathrm{Var}[X_d] = \vec{\lambda}^* \Sigma \vec{\lambda}$$

$$+ 2 \sum_{i<j} \lambda_i \lambda_j \mathrm{Cov}[X_i, X_j]$$

Pregunta itempool:

El contraejemplo

simétrica

$X \sim N(0,1)$.

$Y = \xi X$, $\quad \xi \sim \mathrm{Ber}\left(\frac{1}{2}, \{-1, 1\}\right)$.

funciona; pues

$$X + Y = (1+\xi) X$$ y

$$\mathbb{P}[X+Y=0] \geq \mathbb{P}[\xi = -1] = \frac{1}{2}$$

Ruido blanco

Lemma:

Si X es un vector Gaussiano, su ley está determinada por su media $\mu = \mathbb{E}[X] = (\mathbb{E}[X_1], \dots, \mathbb{E}[X_d])$

$(X = (X_1, \dots, X_d))$

y su matriz de covarianza $\Sigma = [\Sigma_{ij}]$

con $\Sigma_{i,j} := \mathrm{Cov}[X_i, X_j]$.

Nota "curiosa"

Si $\ell: \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$ es un funcional lineal la forma general para ℓ es

$\ell(x) = (\lambda_1, \dots, \lambda_d) \cdot x$

$x = (x_1, \dots, x_d)$ Para ciertos $\lambda_1, \dots, \lambda_d \in \mathbb{R}$

En este contexto, X es un vector en $\mathbb{R}^d$ es gaussiano si $\ell(X)$ es v.a. gaussiana

Ruido blanco:

Consideremos el espacio $H = L^2([0,1]; \mathbb{R})$, es decir $f \in H$ si $f: [0,1] \to \mathbb{R}$ t.q.

$\int_0^1 |f(x)|^2 \, dx < \infty$

Definición:

Un mapeo $G: H \to L^2(\Omega)$ es un ruido blanco si

- $G(f)$ es una v.a. Gaussiana centrada $\forall f \in H$
- $\mathbb{E}[G(f)\, G(h)] = \langle f, h \rangle_H := \int_0^1 f(x)\, h(x)\, dx$

Recordar que si X es un vector gaussiano con media cero y covarianza I_d

y $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_d)$, $\eta = (\eta_1, \dots, \eta_d)$

$\mathbb{E}[(\lambda \cdot X) \times (\eta \cdot X)] = \lambda \cdot \eta$ $= \lambda^* \Sigma \eta$

Nota:

Esta construcción se puede generalizar

1.) $L^2([0,1];\mathbb{R})$ puede reemplazarse

por $\mathcal{H} := L^2(E;\mathbb{R})$

$(E, \mathcal{B}(E), \mu) \leftarrow$ un espacio de medida

E es un métrico separable.

El ruido blanco se define como

- $G(f)$ es gaussiano centrado $\forall f \in \mathcal{H}$

- $\mathbb{E}[G(f)G(h)] = \langle f,h \rangle_{\mathcal{H}} = \int_E f(x)h(x)\mu(dx)$.

Otra generalización:

"Definir $\mathcal{H}^0$ como un espacio de funciones escalonadas

$$\mathcal{H}^0 = \left\{ \sum_{k=1}^{n} a_k \mathbb{1}_{I_k} \quad a_k \in \mathbb{R},\ I_k \leftarrow \text{intervalos} \right\}$$

Definimos $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\mathcal{H}^0}$ mediante

$$\langle \mathbb{1}_{[0,s]}, \mathbb{1}_{[0,t]} \rangle_{\mathcal{H}^0} := R(s,t) \leftarrow \text{"función de covarianza"}$$

$\mathcal{H} :=$ cerradura de $\mathcal{H}^0$ respecto a $\langle \cdot,\cdot \rangle_{\mathcal{H}^0}$

(ver libro libro de Peccati - Nourdin).

De regreso al ruido blanco.

Pregunta natural: ¿existe un ruido blanco?

ingredientes que tenemos

1.) $\mathcal{H} = L^2([0,1];\mathbb{R})$

2.) $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$

3.) $G: \mathcal{H} \to L^2(\Omega) \leftarrow G: \mathcal{H} \to L^2(\Omega)$.

$$\Updownarrow$$

$$G = \{G_h\}_{h \in \mathcal{H}}$$

Recordar que si X es un vector gaussiano en $\mathbb{R}^d$ con entradas i.i.d $\sim N(0,1)$.

$\{X_i\}_{1 \le i \le d} \leftarrow$ v.a.i.i.d $\sim N(0,1)$

$$X = \sum_{i=1}^{d} e_i X_i \qquad e_i = (0,..0,\overset{\overset{\text{componente } i}{\downarrow}}{1},0,...)$$

Pregunta natural: ¿existe un ruido blanco?

Respuesta: sí! pues se puede construir G de la siguiente manera

1:) Sea $\{f_i\}_{i=1}^{\infty}$ una base ortonormal de $L^2([0,1];\mathbb{R})$. ← • Usar base de Fourier

• Usar funciones de Haar.

2:) $\exists$ una elección de v.a. $\{X_i\}_{i=1}^{\infty}$ i.i.d $\sim N(0,1)$.

3:) Si $h \in H = L^2([0,1];\mathbb{R})$.

$$\Rightarrow \quad h = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i f_i \qquad \left(\alpha_j = \langle h, f_j \rangle = \int_0^1 h(x) f_j(x)\,dx\right)$$

$$G(h) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i X_i$$

↑ juegan el rol de $G(f_i)$.

(las cuales tienen propiedades análogas a las X_i).

Necesitamos ver que

$$G(h) := \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i X_i \quad \text{converge}$$

en $L^2(\Omega)$. Para esto basta ver que $\sum_{i=1}^{n} \alpha_i X_i$ es de Cauchy

Prueba (sketch): si $n,m \in \mathbb{N}$

$$\left\| \sum_{i=1}^{n} \alpha_i X_i - \sum_{i=1}^{m} \alpha_i X_i \right\|_{L^2(\Omega)}^2$$

$$= \left\| \sum_{i=n\wedge m}^{n\vee m} \alpha_i X_i \right\|_{L^2(\Omega)}^2 \leftarrow \text{se puede calcular fácil}$$

$$= \sum_{i=n\wedge m}^{n\vee m} \alpha_i^2 \leq \sum_{i=n\wedge m}^{\infty} \alpha_i^2 \xrightarrow{n\wedge m \to \infty} 0$$

pues $\sum_{i\in\mathbb{N}} \alpha_i^2 < \infty$

La covarianza es lo correcto?

$\mathbb{E}[G(f)G(h)]$

$= \mathbb{E}[G(\sum_{i=1}^{\infty}\langle f,f_i\rangle_{\mathcal{H}} f_i)\,G(\sum_{j=1}^{\infty}\langle h,f_j\rangle_{\mathcal{H}} f_j)]$

$= \sum_{i=1}^{\infty}\sum_{j=1}^{\infty}\langle f,f_i\rangle_{\mathcal{H}}\langle h,f_j\rangle_{\mathcal{H}}\underbrace{\mathbb{E}[G(f_i)G(f_j)]}_{=\langle f_i,f_j\rangle=\delta_{i,j}}$

checar

$= \sum_{i=1}^{\infty}\langle f,f_i\rangle_{\mathcal{H}}\langle h,f_i\rangle_{\mathcal{H}}$

$\mathbb{E}[G(f_i)G(f_j)] = \delta_{i,j}$

$= \langle \sum_{i=1}^{\infty}\langle f,f_i\rangle_{\mathcal{H}} f_i, \sum_{j=1}^{\infty}\langle h,f_j\rangle_{\mathcal{H}} f_j\rangle_{\mathcal{H}}$

$= \langle f,h\rangle_{\mathcal{H}}$

Evidentemente $\mathbb{E}[G(f)]=0 \quad \forall\, f\in\mathcal{H}$

$\blacksquare$

Movimiento Browniano

Definiremos un proceso $B=\{B_t\}_{t\in[0,1]}$ a partir del ruido blanco.

Si G es un ruido blanco y $A\in\mathcal{B}([0,1])$, $G(\mathbb{1}_A)$ es una v.a. Gaussiana centrada.

Más aún, si $A,B\in\mathcal{B}([0,1])$ y A,B son ajenos (pensar en $A=[0,s]$, $B=[s+\varepsilon, s+\varepsilon+\delta]$)

$G(\mathbb{1}_A)$ y $G(\mathbb{1}_B)$ son independientes:

$\mathbb{E}[G(\mathbb{1}_A)G(\mathbb{1}_B)] = \langle \mathbb{1}_A,\mathbb{1}_B\rangle_{\mathcal{H}} = \int_0^1 \mathbb{1}_A(x)\mathbb{1}_B(x)\,dx = 0$

Definimos, para $s \in [0,1]$,

$B_s := G(\mathbb{1}_{[0,s]})$.

Diremos que $B = \{B_s ; s \in [0,1]\}$ es un movimiento pre-Browniano.

Propiedades

- $\forall$ $s_1, \dots, s_d \in \mathbb{R}_+$, y $\lambda_1, \dots, \lambda_d \in \mathbb{R}$,

  $\lambda_1 B_{s_1} + \dots + \lambda_d B_{s_d}$ es una varia Gaussiano centrado. (i.e. $(B_{s_1}, \dots, B_{s_d})$ es un vector Gaussiano).

  (justificación:

  $$\lambda_1 B_{s_1} + \dots + \lambda_d B_{s_d} = \lambda_1 G(\mathbb{1}_{[0,s_1]}) + \dots + \lambda_d G(\mathbb{1}_{[0,s_d]})$$
  $$= G(\lambda_1 \mathbb{1}_{[0,s_1]} + \dots + \lambda_d \mathbb{1}_{[0,s_d]}) \sim \text{Normal}$$
)

- $\forall$ $0 \leq s < t \leq 1$,

  $B_t - B_s \sim N(0, t-s)$

  (justificación:

  $$B_t - B_s = G(\mathbb{1}_{[0,t]}) - G(\mathbb{1}_{[0,s]})$$
  $$= G(\mathbb{1}_{(s,t]}) \sim N(0, \|\mathbb{1}_{(s,t]}\|^2_{L^2([0,1];\mathbb{R})})$$
  $$= N(0, \underbrace{\int_0^1 \mathbb{1}_{(s,t]}(u)\, du}_{t-s})$$

- $0 \leq s_0 < s_1 < \dots < s_d$, entonces

  $B_{s_0}, B_{s_1} - B_{s_0}, B_{s_2} - B_{s_1}, \dots, B_{s_d} - B_{s_{d-1}}$ son v.a. independientes

$H \leftarrow$ Hilbert. Con producto interno $\langle \cdot, \cdot \rangle_H$

$X : \Omega \to H$

Ingrediente extra: $Q : H \to H$ no negativa definida.

$\langle f, h \rangle_Q := \langle f, Qh \rangle_H$

$\mu \leftarrow$ medida en H es una medida Q-Gaussiana centrada si

$(H, \mu) \longrightarrow \mathbb{R}$

$h \to l(h)$ es una v.a. gaussiana centrada $\forall \; l : H \to \mathbb{R}$ func. lineal.

Ver libro de Da-Prato.

Teorema:

Si Q satisface cierta condición; entonces $\exists$ una medida Q-Gaussiana

---

Nota:

Si $X \sim F_X(dx) \leftarrow F_X(x) = \mathbb{P}[X \leq x]$.

$F^{-1}(y) := \inf\{ u \in \mathbb{R} \text{ t.q. } F(u) \geq y \}$,

entonces

si $U \sim \mathrm{Unif}(0,1)$,

$F^{-1}(U) \sim$ Distribución F:

$\mathbb{P}[F^{-1}(U) \leq x] = \mathbb{P}[U \leq F(x)] = F(x)$

Kallenberg & Pawitan

Ruido blanco:

$$G: \mathcal{H} \longrightarrow L^2(\Omega) \qquad \mathcal{H} = L^2[[0,1]; \mathbb{R}]$$

Usamos muchas veces que G era lineal.

$$\mathbb{E}[G(h)G(f)] = \langle h, f \rangle_{\mathcal{H}}$$

Lemma:

G es lineal

prueba (sketch)

Queremos ver que si $\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}$, $h, f \in \mathcal{H}$

$$G(\lambda_1 h + \lambda_2 f) - \lambda_1 G(h) - \lambda_2 G(f) = 0 \text{ ? } \circledast$$

Pra probar $\circledast$ sacamos

$$\| G(\lambda_1 h + \lambda_2 f) - \lambda_1 G(h) - \lambda_2 G(f) \|^2_{L^2(\Omega)}$$

$$= -2\mathbb{E}[G(\lambda_1 h + \lambda_2 f)\lambda_1 G(h)] + \mathbb{E}[G(\lambda_1 h + \lambda_2 f)^2]$$

$$-2\mathbb{E}[G(\lambda_1 h + \lambda_2 f)\lambda_2 G(f)] + \lambda_1^2 \mathbb{E}[G(h)^2]$$

$$+ 2\mathbb{E}[\lambda_1 G(h)\lambda_2 G(f)] + \lambda_2^2 \mathbb{E}[G(f)^2] = \dots = 0$$

Pre-mov Browniano

$$B_t := G(\mathbb{1}_{[0,t]}) \quad (*) \qquad \mathbb{1}_{[0,t]} \in L^2([0,1];\mathbb{R})$$

Propiedades:

B_t definido como en $(*)$ es un proceso Gaussiano con media cero y covarianza

$$R(s,t) := \mathbb{E}[B_s B_t] = s \wedge t.$$

prueba:

$$\mathbb{E}[B_s B_t] \underset{t>s}{=} \mathbb{E}\left[G(\mathbb{1}_{[0,s]})\, G(\mathbb{1}_{[0,t]})\right]$$

$$= \langle \mathbb{1}_{[0,s]}, \mathbb{1}_{[0,t]} \rangle_H \overset{\text{checar}}{=} s \wedge t \quad \blacksquare$$

Teorema:

Un proceso $X = \{X_t\}_{t\in[0,1]}$ tiene la misma ley que B (i.e. $\forall\ t_1,\dots,t_d \in [0,1]$, $(X_{t_1},\dots,X_{t_d}) \overset{ley}{=} (B_{t_1},\dots,B_{t_d})$. sii alguna de las siguientes condiciones se cumple

i) X es un proceso Gaussiano centrado y $\mathbb{E}[X_s X_t] =: R(s,t) = s\wedge t$.

ii) $X_0 = 0$ c.s. y $\forall\ s<t$, $X_t - X_s \sim N(0, t-s)$ y $X_t - X_s$ es independiente de $\sigma(X_u \,;\, u\leq s)$.

iii) $X_0 = 0$ c.s. y $\forall\ 0 = t_0 < t_1 < \dots < t_d$, las variables $X_{t_0}, X_{t_1} - X_{t_0}, X_{t_2} - X_{t_1}, \dots, X_{t_d} - X_{t_{d-1}}$ son indepentes con ley $X_t - X_s \sim N(0, t-s)$, $s<t$.

Probar esto de tarea

Pequeño hint para el inciso ii).

Suponer que X es un proceso Gaussiano centrado, con covarianza $R(s,t) = t \wedge s$.

Queremos probar que:

$\forall \quad A \in \sigma(B_u ; u \leq s)$ y $\forall \quad \Psi : \mathbb{R} \to \mathbb{R}$ continua y acotada (recordar que $s < t$)

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A \Psi(B_t - B_s)] = \mathbb{P}[A] \mathbb{E}[\Psi(B_t - B_s)] \quad (*)$$

Basta probar $(*)$ para el caso en que $A \in \mathcal{C} \subset \sigma(B_u ; u \leq s)$, con $\sigma(\mathcal{C}) = \sigma(B_u ; u \leq s)$, y t.q. $\mathcal{C}$ es cerrado bajo intersecciones. Candidato para $\mathcal{C}$:

$$\mathcal{C} = \left\{ \{B_{u_1} \leq x_1\} \cap \dots \cap \{B_{u_d} \leq x_d\} \; ; \; \begin{matrix} u_i \in [0,1] \\ x \in \mathbb{R} \end{matrix} \right\}.$$

Si $\quad A = \{B_{u_1} \le x_1\} \cap \dots \cap \{B_{u_d} \le x_d\}$,

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A \Psi(B_t - B_s)] = \mathbb{E}[\mathbb{E}[\mathbb{1}_A \Psi(B_t - B_s) \mid B_{u_1}, \dots, B_{u_d}]]$$

$$= \mathbb{E}[\mathbb{1}_A \mathbb{E}[\Psi(B_t - B_s) \mid B_{u_1}, \dots, B_{u_d}]]$$

Sabemos que B_u es un proceso Gaussiano

$\Rightarrow$ $B_t - B_s$ es indep. de $B_{u_1}, \dots, B_{u_d}$

$\uparrow$

- $(B_{u_1}, \dots, B_{u_d}, B_t - B_s) \leftarrow$ vector Gaussiano.
- Usaríamos que si (V, W) es un vector Gaussiano centrado,

  $\mathbb{E}[WV] = 0 \Rightarrow V$ es indep. de W.

El resto queda de tarea.

Nota: Suponer que $0=t_0<t_1<\dots<t_d$.

$(B_{t_1},\dots,B_{t_d})$ es un vector Gaussiano centrado. (se puede ver que es no degenerado)

¿Cuál es la densidad de dicho vector?

la densidad

$p(x_1,\dots,x_d) \leftarrow$ densidad de $(B_{t_1},\dots,B_{t_d})$

se determina mediante las covarianzas. La fórmula es

$$p(x_1,\dots,x_n) = \frac{1}{(2\pi)^{d/2}\sqrt{t_1(t_2-t_1)\cdots(t_d-t_{d-1})}} \exp\left\{ -\sum_{i=1}^{d} \frac{(x_i-x_{i-1})^2}{2(t_i-t_{i-1})} \right\}$$

Propiedades adicionales:

Si $X \overset{ley}{=} B$. Entonces se cumple que

i) $-X \overset{ley}{=} X$ (simetría)

ii) $\forall\ \lambda>0$, el proceso $X^\lambda = \{X_t^\lambda\}_{t\in[0,1]}$

$X_t^\lambda := \frac{1}{\lambda} X_{\lambda^2 t}$ satisface $X^\lambda \overset{ley}{=} X$

(autosimilitud)

iii) $\forall \; s \geq 0, \quad B_t^{(s)} := B_{t+s} - B_s$

es un movimiento Browniano es independiente de $\sigma(B_u ; u \leq s)$ (Propiedad de Markov simple)

Propiedades de las trayectorias

Definición:

El mapeo

$$\begin{aligned} [0,1] &\longrightarrow \mathbb{R} \\ t &\longmapsto X_t(\omega) \end{aligned}$$

se conoce como la "trayectoria del proceso X.

para $\omega \in \Omega$ dada

hasta el momento, no sabemos mucho de la "trayectoria" de un mov. pre-browniano.

Definición: $I \subset \mathbb{R}_+$ un intervalo

Considerar procesos $X = \{X_t ; t \in I\}$ y $\tilde{X} = \{\tilde{X}_t ; t \in I\}$

Decimos que X es una modificación de $\hat{X}$ si $\forall$ $t \in I$, $\mathbb{P}[X_t = \tilde{X}_t] = 1$.

Pregunta de Itempool.

Problema: la igualdad

$\mathbb{P}[X_t = \tilde{X}_t] = 1$ se cumple para t dado.

sii $X_t(w) = \tilde{X}_t(w)$ para $w \in \Omega_t$ t.q. $\mathbb{P}[\Omega_t] = 1$.

Contraejemplo:

$X_t = 0$ $\forall$ $t \in [0,1]$.

$$Y_t = \begin{cases} X_t & \text{si } t \neq U \\ 1 & \text{si } t = U \end{cases}$$

$U \sim \text{Unif}(0,1)$. Ahora, $\forall$ t $[0,1]$,

$$\mathbb{P}[X_t \neq Y_t] = \mathbb{P}[U = t] = 0$$

Definición:

$X = \{X_t\}_{t\in I}$ y $\hat{X} = \{\hat{X}_t\}_{t\in I}$ son procesos indistinguibles si $\exists\ N \subset \Omega$ t.g. $\mathbb{P}[N] = 0$ t.g. $\forall\ \omega \in \Omega \setminus N$, y $\forall\ t \in I$,

$$X_t(\omega) = \hat{X}_t(\omega)$$

$$\Updownarrow$$

$$\mathbb{P}[X_t = \hat{X}_t \quad \forall\ t \in I] = 1$$

Nota: Las definiciones tienen sentido cuando los procesos toman valores en un espacio métrico separable (E, d).

Propiedades trayectoriales

$X \leftarrow \quad X = \{X_t\}_{t \in I}$ es un proceso estocástico

Hipótesis:

- $I \subset \mathbb{R}$ es un intervalo acotado
- X toma valores en un espacio métrico completo y separable
- $\exists$ constantes $q, \varepsilon, C > 0$, t.q.

$$\mathbb{E}\left[d(X_s, X_t)^q \right] \leq C\,|t-s|^{1+\varepsilon}.$$

Entonces $\exists$ $\tilde{X} = \{\tilde{X}_t\}_{t \in I}$ t.q. $\tilde{X}$ es una modificación de X, definido en

$(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$, t.q. $\forall\ \alpha \in \left(0, \frac{\varepsilon}{q}\right)$,

$\exists\ \Omega_\alpha \in \mathcal{F}$ $\mathbb{P}[\Omega_\alpha] = 1$

$$|\tilde{X}_t(\omega) - \tilde{X}_s(\omega)| \leq C(\omega)\,|t-s|^{\alpha} \qquad \forall \quad \omega \in \Omega_\alpha.$$

$\uparrow$

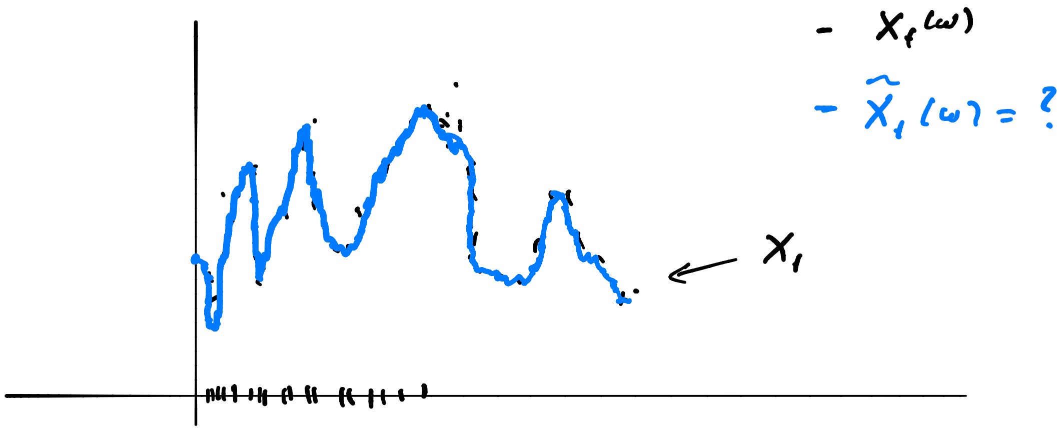
Hölder continuidad de orden α.

Este resultado se conoce como teorema de continuidad de Kolmogorov.

prueba:

Intuición: $\circ \circ \circ \circ$

$\tilde{X}_1(\omega) \overset{?}{=} X_t(\omega)$ para "muchos" valores de t



Heurística:

Sea D un conjunto "grande" $D \subset I$ que definiremos más tarde: Queremos definir $\tilde{X}$ de la siguiente manera:

$$\tilde{X}_t = \begin{cases} X_t & \text{si } t \in D \\ \lim\limits_{\substack{s \to t \\ s \in D}} X_s & \text{si } s \notin D \end{cases}$$

← ésto es sólo heurístico

Problema de ésto definición:

$\lim\limits_{\substack{s \to t \\ s \in D}} X_s$ sólo está bien definido en un conjunto de probabilidad 1.

Formalización:

Paso 1: Considerar el proceso $t \to X_t$, pero restringido a $t \in D$

$D = \{\text{diádicos en } I\} = \{s \in I \,;\, s = i \cdot 2^{-n},\ i \in N,\ n \in \mathbb{N}\}$

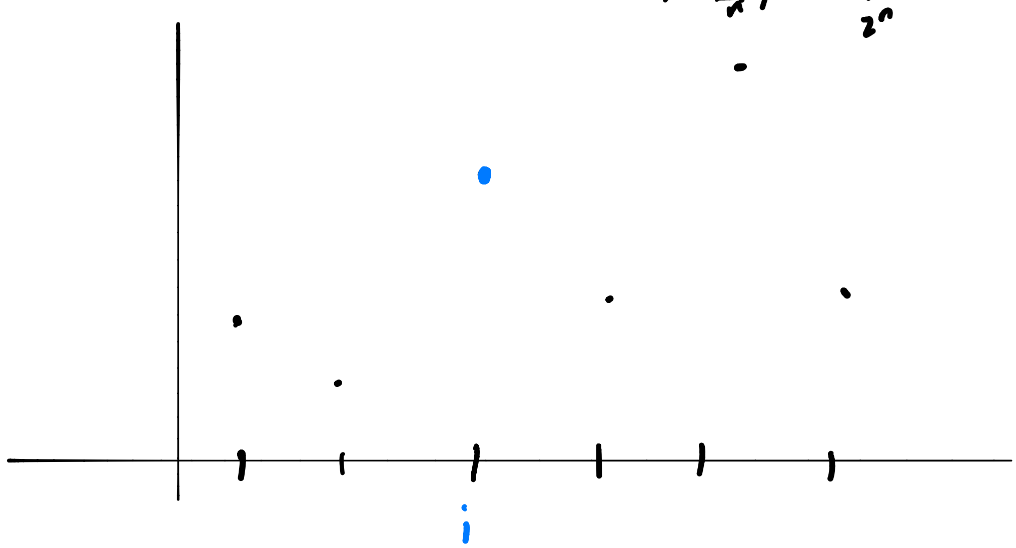
Veremos que $\begin{array}{l} D \to \mathbb{R} \\ t \mapsto f \end{array}$ es Hölder continuo

de orden $\alpha \in (0, \frac{\varepsilon}{q})$ con probabilidad 1, es decir, $\exists\ \Omega_\alpha \in \mathcal{F}$ t.q. $\forall\ \omega \in \Omega_\alpha$

$$|X_t(\omega) - X_s(\omega)| \leq C(\omega)\, |t-s|^{\alpha} \quad \text{p.a. } C(\omega) \in \mathbb{R}$$

Considerar los eventos

$$\{d(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}) \geq 2^{-n\alpha}\} \underset{\substack{\uparrow \\ s = \frac{i-1}{2^n},\ t = \frac{i}{2^n}}}{=} \{d(X_t, X_s) \geq |t-s|^{\alpha}\}$$



$$\leq C\, 2^{nq\alpha}\, 2^{-(1+\varepsilon)n}$$

Probaremos que

$$\mathbb{P}\left[d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right]$$

$$= \mathbb{P}\left[d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right)^q \geq 2^{-n\alpha q} \right]$$

$$\leq 2^{n\alpha q}\, \mathbb{E}\left[d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right)^q \right] \leq C\, 2^{n\alpha q} \left(2^{-n}\right)^{1+\varepsilon}$$

$$= C\, 2^{nq\alpha}\, 2^{-(1+\varepsilon)n}$$

Ahora, vamos a controlar:

$$\mathbb{P}\left[\bigcup_{i=1}^{2^n} \left\{ \delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right\} \right]$$

$$\leq \sum_{i=1}^{2^n} \mathbb{P}\left[\delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right]$$

$$\leq C \sum_{i=1}^{2^n} 2^{n\alpha q} \left(2^{-n}\right)^{1+\varepsilon} = C\, 2^{n\alpha q - n\varepsilon}$$

$$= C\, 2^{-n\left(\varepsilon - \frac{\alpha}{q}\right)}$$

Ahora voy a analizar

$$\overline{\lim_n} \bigcup_{i=1}^{2^n} \left\{ \delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right\}$$

$$= \bigcap_{K=1}^{\infty} \bigcup_{n=K}^{\infty} \left(\bigcup_{i=1}^{2^n} \left\{ \delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right\} \right).$$

Vamos a probar que

$$\mathbb{P}\left[\overline{\lim_n} \bigcup_{i=1}^{2^n} \left\{ \delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right\} \right] = 0. \quad \circledast$$

$$\uparrow$$

$$\{ d(X_t, Y_s) \geq |t-s|^\alpha \} \leftarrow s = \frac{i-1}{n}, \quad t = \frac{i}{n}$$

Supongamos que $\circledast$ pasa. Entonces

si $\omega \in \left(\overline{\lim_n} \bigcup_{i=1}^{2^n} \left\{ \delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right\} \right)^c$

$$\Rightarrow \#\left\{ n \in \mathbb{N} \mid d\Big(\underbrace{X_{\frac{i-1}{2^n}}}_{s}, \underbrace{X_{\frac{i}{2^n}}}_{t} \Big) \geq \underbrace{2^{-n\alpha}}_{|t-s|^\alpha} \text{ p.a. } i \leq 2^n \right\} < \infty$$

$\Rightarrow \exists\ N \in \mathbb{N}$ t.q. $\forall\ n \geq N$,

$$\left(\text{tomar } N = \max \# \left\{ n \in \mathbb{N} \mid d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \text{ p.a. } i \leq 2^n \right\} \right)$$

$$d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \leq 2^{-n\alpha} \quad \forall \quad i \leq 2^n$$

$$\Rightarrow \quad K_\alpha(\omega) := \sup_{n \geq 1} \ \sup_{i \leq 2^n} \underbrace{\frac{d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right)}{2^{-n\alpha}}}_{} < \infty \quad \text{c.s.}$$

$$\frac{X_t - X_s}{|t-s|^\alpha}$$

s y t son de cierta manera

Hasta ahora, tenemos que para

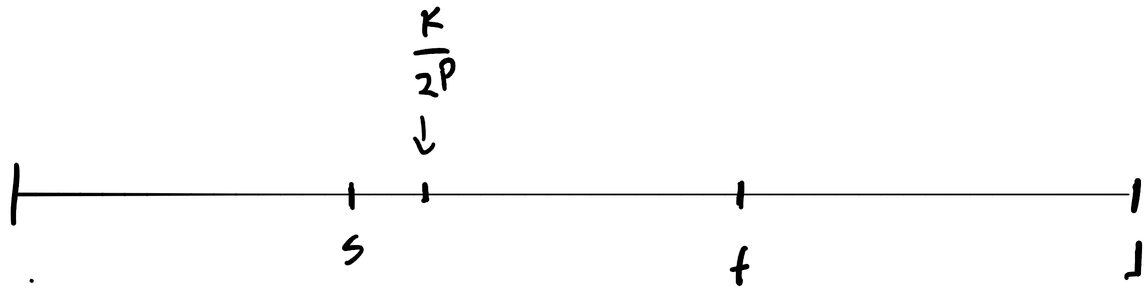
$$\omega \in \Omega_a := \left(\overline{\lim_n} \bigcup_{i=1}^{2^n} \left\{ \delta\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}, X_{\frac{i}{2^n}}\right) \geq 2^{-n\alpha} \right\} \right)^c$$

$$d\left(X_{\frac{i-1}{2^n}}(\omega), X_{\frac{i}{2^n}}(\omega)\right) \leq K_\alpha\, 2^{-n\alpha} \quad (**)$$

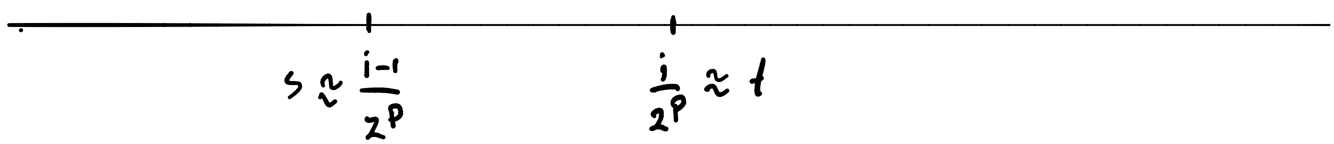
Falta analizar $d(X_s(\omega), X_t(\omega))$ para s y t generales.

Probaremos que si $s<t$, $s,t \in D$

$$d(X_s(\omega), X_t(\omega)) \leq \frac{2K_\alpha(\omega)}{1-2^{-\alpha}} |t-s|^\alpha$$ ← casi lo que queremos probar.



comparar con



Tomar $p \in \mathbb{N}$ como $p = \min\{n \in \mathbb{N} ; 2^{-n} \leq |t-s|\}$

y definimos a K como el menor entero t.q. $\frac{K}{2^p} \geq s$. Entonce

$$\left.\begin{array}{l} s = \frac{K}{2^p} - \varepsilon_1 2^{-p-1} - \varepsilon_2 2^{-p-2} - \dots - \varepsilon_l 2^{-p-l} \\ \\ t = \frac{K}{2^p} + \tilde{\varepsilon}_1 2^{-p-1} + \tilde{\varepsilon}_2 2^{-p-2} + \dots + \tilde{\varepsilon}_l 2^{-p-m} \end{array}\right\} \varepsilon_i, \tilde{\varepsilon}_i \in \{0,1\}$$

Finalmente,

$$s_i = K 2^{-p} - \varepsilon_1 2^{-p-1} - \dots - \varepsilon_i 2^{-p-i}$$

$$t_j = K 2^{-p} + \tilde{\varepsilon}_1 2^{-p-1} + \dots + \tilde{\varepsilon}_j 2^{-p-j}.$$

Entonces, como $s = s_\ell$ y $t = t_m$, de manera que podemos escribir (omitiendo la dependencia en ω).

$$d(X_s, X_t) = d(X_{s_\ell}, X_{t_m})$$

$$\leq d(X_{s_0}, X_{t_0}) + \sum_{i=1}^{\ell} d(X_{s_{i-1}}, X_{s_i}) + \sum_{j=1}^{m} d(X_{t_{j-1}}, X_{t_j})$$

$$\leq K_\alpha(\omega) 2^{-p\alpha} + \sum_{i=1}^{\ell} K_\alpha(\omega) 2^{-(p+i)\alpha} + \sum_{j=1}^{m} K_\alpha(\omega) 2^{-(p+j)\alpha}$$

de $(*)$

$= \dots$ ← usar la suma geométrica

$$= 2K_\alpha(\omega)(1-2^{-\alpha}) 2^{-p\alpha} \leq 2K_\alpha(\omega)(1-2^{-\alpha})|t-s|^\alpha$$

Propuesta de Luis: usar

$$s = \frac{i}{2^p} \qquad t = \frac{j}{2^p}$$

Finalmente, definimos

$$\tilde{X}_t(\omega) := \begin{cases} \lim\limits_{\substack{s \to t \\ s \in D}} X_s(\omega) & \text{si } \omega \in \Omega_\alpha \\ 0 & \text{si } \omega \in \Omega_\alpha^c \end{cases}$$

(El límite existe por lo probado antes)

La Hölder continuidad de $\widehat{X}_t(\omega)$ se sigue de la Hölder continuidad en D (sobre el conjunto Ω_α).

Tarea:

Ver que existe una modificación de $B_t = G(\mathbb{1}_{[0,t]})$ que tiene trayectorias Hölder continuas de índice a $\forall$ $a \in (0, \frac{1}{2})$.

En lo sucesivo, siempre consideraremos la versión de B con trayectorias continuas.

Definición:

Un proceso $\{W_t\}_{t \geq 0}$ es un movimiento Browniano si

- Es un proceso Gaussiano, centrado
- $\mathbb{E}[W_s W_t] = s \wedge t$
- W tiene trayectorias continuas.

En lo sucesivo, supondremos que $B = \{B_t\}_{t \geq 0}$ está definido en todos los reales positivos.

Medida de Wiener:

Lo que tenemos hasta el momento es $(\Omega, \mathcal{F}, \mathbb{P})$ y $B = \{B_t\}_{t \geq 0}$, de manera que

$$B : \Omega \longrightarrow C(\mathbb{R}_+; \mathbb{R}) \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}_+}$$

con $C(\mathbb{R}_+; \mathbb{R}) = \{ f : \mathbb{R}_+ \to \mathbb{R} \mid f \text{ es continua} \}$

Recordar que si $N = (N_1, \dots, N_d)$ era un vector aleatorio Gaussiano.

$N : \Omega \to \mathbb{R}^{\{1, \dots, d\}}$ $\leftarrow$ esto induce una medida en $\mathbb{R}^{\{1, \dots, d\}}$.

Esto motiva definir una medida W en $C(\mathbb{R}_+; \mathbb{R})$ con la σ-álgebra de la topología de los abiertos de $C(\mathbb{R}_+; \mathbb{R})$

$$d(f, g) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left(\sup_{x \in [0,n]} |f(x) - g(x)| \right) \wedge 1 \qquad f, g \in C(\mathbb{R}_+; \mathbb{R})$$

llamada "medida de Wiener, mediante

$$W(A) := \mathbb{P}[B \in A] \qquad A \in \mathcal{B}(C(\mathbb{R}_+;\mathbb{R}))$$

Nota:

En algunas circunstancias es más fácil estudiar "trayectorias" en $C(\mathbb{R}_+;\mathbb{R})$.

Nota 2:

Si $w \in C(\mathbb{R}_+;\mathbb{R})$, podemos definir, para $t_1,\dots,t_d \in \mathbb{R}_+$, el mapeo

$$\pi_{t_1,\dots,t_d}(w) = (w_{t_1},\dots,w_{t_d}) \in \mathbb{R}^d$$

Resumen

$$(C(\mathbb{R}_+;\mathbb{R}), \mathcal{B}(C(\mathbb{R}_+,\mathbb{R})), W) \longrightarrow (\mathbb{R}^d; \mathcal{B}(\mathbb{R}^d), W \circ \pi^{-1}_{t_1,\dots,t_d})$$

$$W \circ \pi^{-1}_{t_1,\dots,t_d}(C) = W(\pi^{-1}_{t_1,\dots,t_d}(C)) \qquad C \in \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$$

$$= W(\{(w(t_1),\dots,w(t_d)) \in C\})$$

$$= \mathbb{P}[(B_{t_1},\dots,B_{t_d}) \in C]$$

Corolario: Si $\Omega = C(\mathbb{R}_+;\mathbb{R})$ y $X = \{X_t\}_{t\geq 0}$ es

$$X_t(w) := w(t) \qquad w \in C(\mathbb{R}_+;\mathbb{R})$$

es un movimento Browniano.

Más propiedades trayectoriales:

Definimos $\{\mathcal{F}_s ; s \geq 0\}$ como la filtración

$$\mathcal{F}_s := \sigma (B_u ; u \leq s).$$

y la filtración

$$\mathcal{F}_{0+} := \bigcap_{s>0} \mathcal{F}_s$$

Teorema: (ley 0-1 de Blumental)

$\forall \; A \in \mathcal{F}_{0+}, \quad \mathbb{P}[A] \in \{0,1\}$

prueba:

Veremos que A es independiente de $\mathcal{F}$

Es decir, $\forall$ v.a. $Y \in \mathcal{F}$ (i.e. Y es $\mathcal{F}$-medible)

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A Y] = \mathbb{P}[A]\,\mathbb{E}[Y] \quad \leftarrow \text{¿Cómo se prueba?}$$

Es suficiente considerar el caso

$Y = g(B_{t_1}, \dots, B_{t_k})$. con g continua. y acotada

gracias al teorema de Dynkin

(teorema de clases monótonas).

Objetivo nuevo: Analizar

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A g(B_{t_1},\dots,B_{t_k})] \underset{\uparrow}{=} \lim_{\varepsilon\downarrow 0} \mathbb{E}[\mathbb{1}_A g(B_{t_1}-B_\varepsilon,\dots,B_{t_k}-B_\varepsilon)]$$

tma. de conv. dominada

Notar que si $0<\varepsilon<t_1$, debido a que

$A \in \tilde{\mathcal{F}}_{0+} \subset \mathcal{F}_\varepsilon$

$\Rightarrow$

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A g(B_{t_1}-B_\varepsilon,\dots,B_{t_k}-B_\varepsilon)]$$

$$= \mathbb{P}[A]\,\mathbb{E}[g(B_{t_1}-B_\varepsilon,\dots,B_{t}-B_\varepsilon)]$$

prop. de incrementos indep.
ó
prop. de Markov simple

Sacando límite obtenemos

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A g(B_{t_1},\dots,B_{t_k})] = \lim_{\varepsilon\downarrow 0} \mathbb{E}[\mathbb{1}_A g(B_{t_1}-B_\varepsilon,\dots,B_{t_k}-B_\varepsilon)]$$

$$= \lim_{\varepsilon\downarrow 0} \mathbb{P}[A]\,\mathbb{E}[g(B_{t_1}-B_\varepsilon,\dots,B_{t_k}-B_\varepsilon)] = \mathbb{P}[A]\,\mathbb{E}[g(B_{t_1},\dots,B_{t_k})]$$

$\Rightarrow \quad \mathbb{E}[\mathbb{1}_A Y] = \mathbb{P}[A]\,\mathbb{E}[Y] \quad \forall\ Y\ \mathcal{F}$-medible,

Dynkin

puedo tomar $Y = \mathbb{1}_A$, y obtengo

$$\mathbb{P}[A] = \mathbb{E}[\mathbb{1}_A^2] = \mathbb{P}[A]^2 \Rightarrow \mathbb{P}[A] \in \{0,1\}.$$

Proposición:

i) Se tiene que c.s. $\forall\ \varepsilon > 0$,

$$\sup_{0\leq s\leq \varepsilon} B_s > 0 \qquad \inf_{0\leq s\leq \varepsilon} B_s < 0$$

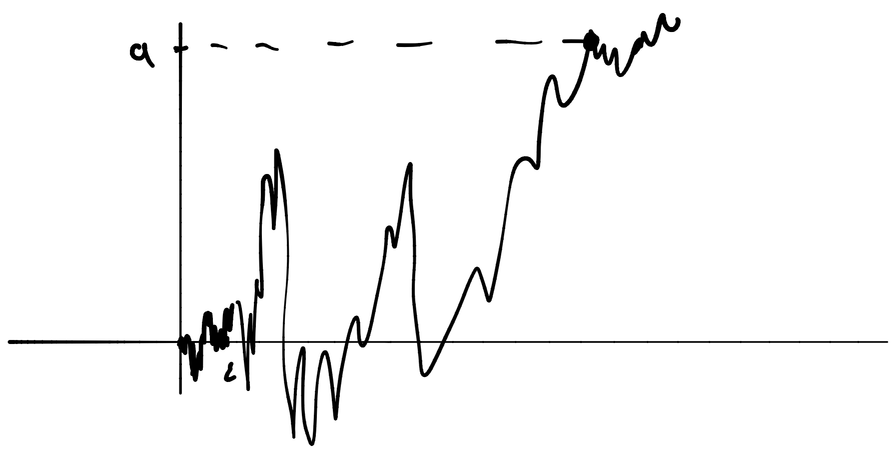
ii) $\forall\ a \in \mathbb{R}$, $T_a = \inf\{t \geq 0 \,;\, B_t = a\}$. Entonces

c.s. $\forall\ a \in \mathbb{R}$, $T_a < \infty$.

En particular,

$$\limsup_{t\to\infty} B_t = \infty \qquad \text{y} \qquad \liminf_{t\to\infty} B_t = -\infty.$$

La gráfica se ve entonces como



Pruebas:

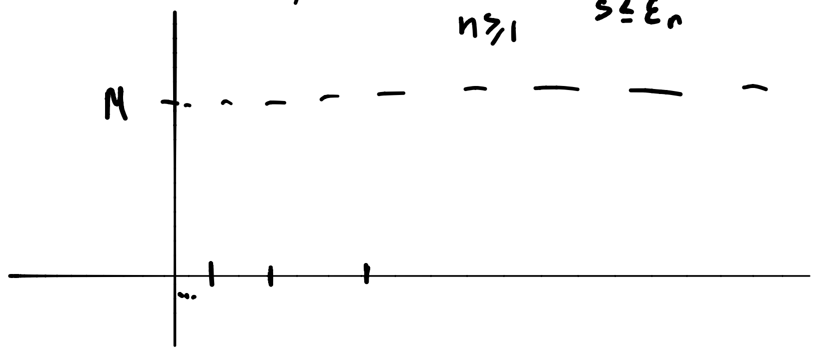
i) Observación 1:

Sea $\{\varepsilon_n\}_{n\geq 1}$ $\varepsilon_n > 0$ $\varepsilon_n \downarrow 0$, entonces

$$\mathbb{P}\left[\sup_{0\leq s\leq \varepsilon_n} B_s > 0\right] \geq \mathbb{P}\left[B_{\varepsilon_n} > 0\right] = \frac{1}{2}$$

$$\Rightarrow \mathbb{P}\Big[\bigcap_{n\geq 1}\{\sup_{s\leq \varepsilon_n} B_s > 0\}\Big] = \lim_{n} \mathbb{P}\Big[\sup_{s\leq \varepsilon_n} B_s > 0\Big] \geq \frac{1}{2}$$

Notar que $\bigcap_{n\geq 1}\{\sup_{s\leq \varepsilon_n} B_s > 0\} \in \mathcal{F}_{0+}$



$\Rightarrow$ Por ley 0-1 de Blumenthal,

$$\mathbb{P}\Big[\bigcap_{n\geq 1}\{\sup_{s\leq \varepsilon_n} B_s > 0\}\Big] = 1$$

$$\Rightarrow \mathbb{P}\Big[\bigcap_{\varepsilon>0}\{\sup_{s<\varepsilon} B_s > 0\}\Big] = 1$$

$$\Rightarrow \quad \forall\ \varepsilon>0, \quad \sup_{0\leq s\leq \varepsilon} B_s > 0 \quad \text{c.s.}$$

Analogamente, $\forall\ \varepsilon>0, \quad \inf_{0\leq s\leq \varepsilon} B_s < 0 \quad$ c.s.

Prueba de ii)

Notar que $\{T_M < \infty\} \supset \{\sup_{s>0} B_s > M\}$

Objetivo nuevo: estudiar

$$\mathbb{P}\left[\sup_{s>0} B_s > M\right]$$

Comenzaremos con

$$1 = \mathbb{P}\left[\sup_{0\le s\le 1} B_s > 0\right] = \lim_{\delta\downarrow 0} \mathbb{P}\left[\sup_{0\le s\le 1} B_s > \delta\right]$$

Notemos que

$$\mathbb{P}\left[\sup_{0\le s\le 1} B_s > \delta\right] = \mathbb{P}\left[\sup_{0\le s\le 1} \frac{B_s}{\delta} > 1\right]$$

$$\overset{\text{autosimilitud}}{=} \mathbb{P}\left[\sup_{0\le s\le 1} B_{\underbrace{\frac{s}{\delta^2}}_{t}} > 1\right]$$

Usamos $\{B_s\} \overset{\text{ley}}{=} \{\delta B_{\frac{s}{\delta^2}}\}$

$$= \mathbb{P}\left[\sup_{0\le t\le \frac{1}{\delta^2}} B_t > 1\right]$$

$$\xrightarrow{\delta\to\infty} \mathbb{P}\left[\sup_{t>0} B_t > 1\right]$$

$$\Rightarrow \quad 1 = \mathbb{P}\left[\sup_{t>0} B_t > 1\right] = \mathbb{P}\left[\sup_{t>0} M B_t > M\right]$$

$$= \mathbb{P}\left[\sup_{t>0} M B_{\underbrace{(tM^2)}_{u}/M^2} > M\right] = \mathbb{P}\left[\sup_{u>0} B_u > M\right]$$

$\{M B_{\frac{u}{M^2}}\} \overset{\text{ley}}{=} B_u$

Analogumente,

$$1 = \mathbb{P}[\inf_{u>0} B_u < -M].$$

El resultado (ii) se obtiene haciendo $M \to \infty$.

Corolario:

Casi seguramente,
Las trayectorias de B no son monótonas en ningún intervalo

prueba:

Sea $q \in \mathbb{Q}$ y $\varepsilon > 0$, $\varepsilon \in \mathbb{Q}$. Probaremos que

$$\sup_{t\in[q,q+\varepsilon]} B_t > B_q \quad \oplus \qquad \text{y} \qquad \inf_{t\in[q,q+\varepsilon]} B_t < B_q$$

en un conjunto $\Omega_{q,\varepsilon} \in \mathcal{F}$ con $\mathbb{P}[\Omega_{q,\varepsilon}] = 1$.

$$\Rightarrow \bigcap_{\substack{q\in\mathbb{Q} \\ \varepsilon>0 \\ \varepsilon\in\mathbb{Q}}} \left\{ \sup_{t\in[q,q+\varepsilon]} B_t > B_q \right\} \cap \left\{ \inf_{t\in[q,q+\varepsilon]} B_t < B_q \right\}$$

tiene proba $= 1$.

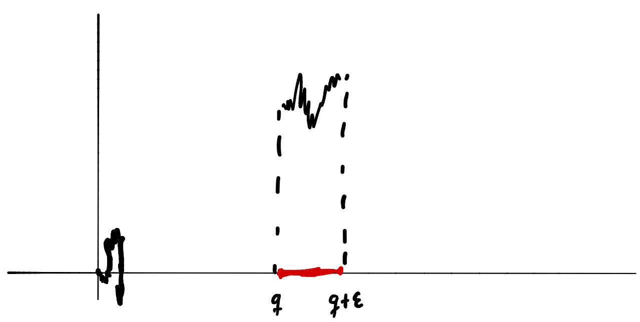
¿Cómo Probar $\oplus$?

Recordemos que $\{ \tilde{B}_s := B_{q+s} - B_q \,;\, s \geq 0 \}$ es un mov. Browniano. Por lo probado antes

$$\sup_{t\in[q,q+\varepsilon]}(B_t - B_q) = \sup_{s\in[0,\varepsilon]} B_{q+s} - B_q = \sup_{s\in[0,\varepsilon]} \tilde{B}_s > 0 \quad \text{c.s.}$$

Analogamente,

$$\inf_{t\in[q,q+\varepsilon]}(B_t - B_q) < 0.$$



Observación:

Las trayectorias del browniano son no derivable c.s.

Si existiera $\frac{d}{dt}B_t$ en $t=q$, entonces

$$\lim_{h\to 0} \frac{B_{q+h} - B_q}{h} \quad \text{existe.}$$

Por el resultado anterior $\exists \{h_n^1\}_{n\in\mathbb{N}}, \{h_n^2\}_{n\in\mathbb{N}} \subset \mathbb{R}_+$

t.q. $\frac{B_{q+h_n^1} - B_q}{h_n^1} > 0$ & $\frac{B_{q+h_n^2} - B_q}{h_n^2} < 0$

$$\Rightarrow \frac{d}{dt}B_t = 0 \quad \text{en} \quad t=q$$

$\Rightarrow$ B tiene un

- máximo (siempre existen puntos en los que B decrece)
- mínimo (siempre existen puntos en los que B crece)
- punto de inflexión (siempre existen puntos en los que B decrece)

. $\frac{d}{dt} B_t$ no existe

. Vamos a ver ahora que si considero un intervalo $[0,t]$ y una sucesión de particiones $\{t_k^n\}_{k=0}^{m_n}$, con $t_0^n = 0$ y $t_{m_n}^n = t$, la variación de B, definida por

$$\lim_{n\to\infty} \sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|, \quad \text{si} \quad \sup_{k\leq n} |t_k^n - t_{k-1}^n| \longrightarrow 0$$

es infinita.

$\Rightarrow$ Integral de Lebesgue-Stieltjes podría fallar.

justificación:

Veremos que

$$\sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2 \xrightarrow{L^2(\Omega)} t \quad (**)$$

Nota: se puede probar que

$$\sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2 \xrightarrow{c.s.} t$$

si las particiones $\{t_k^n\}_{k \leq m_n}$ están anidadas

prueba de (**)

Sea $X_n := \sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2$

Notar que

$$\mathbb{E}[X_n] = \sum_{k=1}^{m_n} \mathbb{E}\left[|B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2\right] = \sum_{k=1}^{m_n} (t_k^n - t_{k-1}^n) = t$$

Veamos ahora que

$$\mathbb{E}[|X_n - t|^2] \longrightarrow 0 \iff Var[X_n] \xrightarrow{n\to\infty} 0.$$

Ahora,

$$Var[X_n] = Var\left[\sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2\right]$$

$$= \sum_{k=1}^{m_n} Var\left[|B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2\right]$$

$$= \sum_{k=1}^{m_n} \left[\mathbb{E}\left[|\underbrace{B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}}_{\overset{ley}{=} N(0,\, t_k^n - t_{k-1}^n) \,=\, (t_k^n - t_{k-1}^n)^{1/2} N(0,1)}|^4 \right] - \mathbb{E}\left[|B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2 \right] \right]^2$$

$$\leq \sum_{k=1}^{m_n} (t_k^n - t_{k-1}^n)^2 \, 3 \leq \sup_{k \leq n} (t_k^n - t_{k-1}^n) \sum_{k=1}^{m_n} (t_k^n - t_{k-1}^n) \cdot 3$$

$$= 3t \sup_{k \leq n} (t_k^n - t_{k-1}^n) \xrightarrow{n \to \infty} 0$$

Hasta el momento probamos que

$$\sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2 \xrightarrow{L^2(\Omega)} t$$

Consecuencia: $\exists$ una sucesion de $\{t_k^n\}$ t.q.

$$\sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2 \xrightarrow{n \to \infty} t > 0 \quad \text{c.s.} \quad \Rightarrow \quad \text{dado que}$$

$$\sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|^2 \leq \sup_{k \leq m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}| \sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|$$

entonces, para n grande

$$0 < \frac{t}{2} \leq \sup_{k \leq m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}| \sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}|$$

$$\Rightarrow \sum_{k=1}^{m_n} |B_{t_k^n} - B_{t_{k-1}^n}| \xrightarrow{n\to\infty} \infty$$

$\Rightarrow$ la variación de B no existe.

Warning: en algunos libros de análisis no piden que la partición sea anidada para definir variación.

Propiedad de Markov fuerte:

Recordar que $\mathcal{F}_t := \sigma(B_u;\ u \leq t)$.

Definición:

Un tiempo de paro T es una v.a. $T \geq 0$, t.q. T puede tomar el valor infinito y t.q.

$$\{T \leq t\} \in \mathcal{F}_t$$

Utilidad:

Observaremos procesos estocásticos X_t en tiempos de paro (es decir, considerar X_T).

Definición:

la σ- algebra $\tilde{\mathcal{F}}_T$ (filtración antes de T)

está definida como

$$\mathcal{F}_T = \{ A \in \mathcal{F} \; ; \; \forall \; t \geq 0, \quad A \cap \{T \leq t\} \in \mathcal{F}_t \}$$

Se puede ver que $\mathcal{F}_T$ es una σ- algebra

si T es tiempo de paro.

Ejemplo:

$\mathbb{1}_{\{T < \infty\}} B_T$ es $\tilde{\mathcal{F}}_T$ medible.

Para probar este tipo de propiedades es

importante usar la continuidad de B.

(Probar ésto será tarea)

Teorema (Propiedad de Markov fuerte).

Si T es un tiempo de paro y $\mathbb{P}[T<\infty]>0$,

definimos

$$B_t^{(T)} := \mathbb{1}_{\{T<\infty\}} (B_{T+t} - B_T)$$

Entonces, bajo la medida de probabilidad

$\mathbb{P}[\,\cdot\,|\,T<\infty]$, el proceso $B_t^{(T)}$ es un mov. Brown.

independiente de $\tilde{\mathcal{F}}_T$.

Nosotros nos enfocaremos principalmente en

el caso $T<\infty$ c.s, de manera que

$$B_t^{(T)} = B_{T+t} - B_T$$

Prueba:

Suponer que $T<\infty$ c.s. y considerar $A \in \tilde{\mathcal{F}}_T$

y $g: \mathbb{R}^d \to \mathbb{R}$ continua y acotada.

Determinaremos el valor de

$$\mathbb{E}[\mathbb{1}_A\, g(B_{t_1}^{(T)}, \dots, B_{t_d}^{(T)})] \overset{?}{=} \mathbb{P}[A]\, \mathbb{E}[g(B_{t_1}, \dots, B_{t_d})] \quad (\#)$$

Ésto bastaría para ver que las leyes finito dimensionales de $\{B_t^{(T)}\}_{t\geq 0}$ son las mismas que las de $\{B_t\}_{t\geq 0}$ y son indep. de A. La continuidad de las trayectorias de $B_t^{(T)}$ se sigue de la definición.

Idea de la prueba de ⊛

$$\sum_{k=0}^{\infty} \mathbb{E}\left[\mathbb{1}_A \, g\left(B^{(T)}_{t_1}, \dots, B^{(T)}_{t_d}\right) \mathbb{1}_{\{T \in J_k\}} \right]$$

con $J_k := \left[\frac{(k-1)}{2^n}, \frac{k}{2^n}\right)$

aquí $T \approx \frac{k}{2^n}$

La idea es sustituir $T = \frac{k}{2^n}$ y controlar el error por la continuidad del Browniano (tarea).

$\mathbb{P}[$ Racha de r soles en n lanzamientos $] =*$
antes de s águilas

X = 1° racha de r soles

$* = \mathbb{P}[\, X \leq n$ no hay rachas de s soles antes de $X\,]$

Ahora $\{X \leq n\} = \{X = r\} \cap \cdots \cap \{X = n\}$ $\qquad r \leq n.$

y

$\{X = i\} \cap \{$no hay rachas de s soles antes de $i\}$

r soles

i

Posibilidades para los primeros $i-r-1$ intentos?

n

Maximo del movimiento Browniano

Tma:

$$S_t = \sup_{0 \le s \le t} B_s$$

Si $a \geq 0$, y $b \in (-\infty, a]$, entonces

$$\mathbb{P}[S_t \geq a, B_t \leq b] = \mathbb{P}[B_t \geq 2a - b]$$

En particular, si tomamos $b = a$, vemos que

$$\mathbb{P}[S_t \geq a] = \mathbb{P}[|B_t| \geq a] \qquad \left(\Rightarrow S_t \overset{ley}{=} |B_t| \right)$$

Prueba:

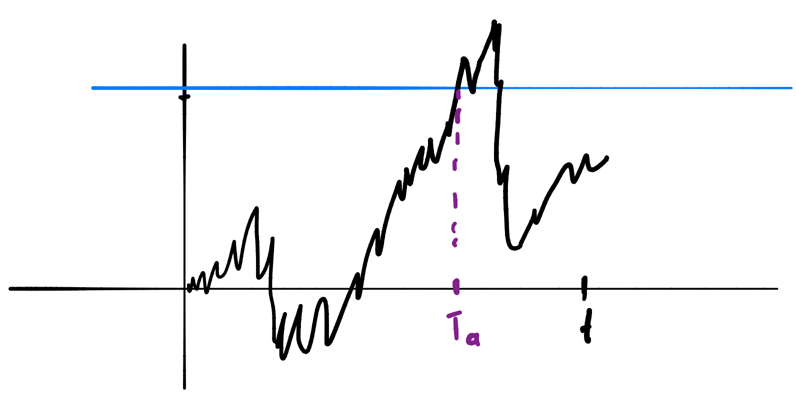
Sea

$T_a = \inf\{t \geq 0 : B_t = a\}$. Vimos con anterioridad

que $T_a < \infty$ c.s. &

$$\mathbb{P}[S_t \geq a, B_t \leq b] \underset{\uparrow}{=} \mathbb{P}[T_a \leq t, B_t \leq b] = *$$

$$\{S_t \geq a\} = \{T_a \leq t\}$$



$$* = \mathbb{P}[T_a \leq t, B_t \leq b] \underset{\substack{\uparrow \\ t \geq T_a}}{=} \mathbb{P}[T_a \leq t,\ B_t - B_{T_a} \leq b - B_{T_a}]$$

$$= \mathbb{P}[T_a \leq t,\ \widetilde{B}_{t-T_a} \leq b - a] = *$$

donde

$$\widetilde{B}_s := B_{s+T_a} - B_{T_a}$$

Nota: $\{T_a \leq t\} \in \mathcal{F}_t$, y por Markov fuerte

$$* = \mathbb{P}[T_a \leq t, -\widetilde{B}_{t-T_a} \leq b - a]$$

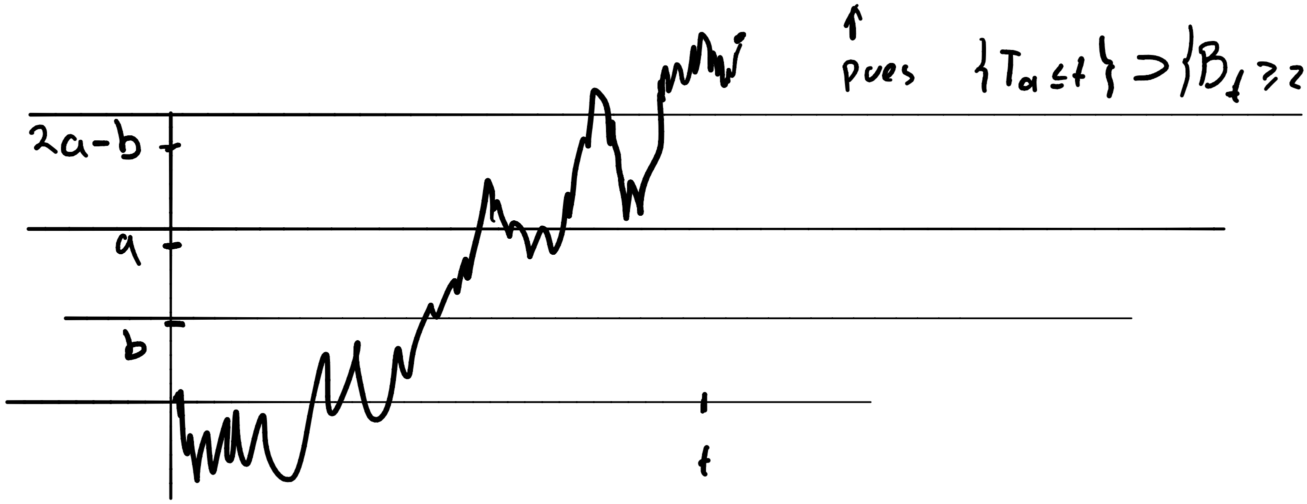
Ahora,

$$\widetilde{B}_{t-T_a} = B_t - B_{T_a} = B_t - a,$$

$$\Rightarrow \quad * = \mathbb{P}[T_a \leq t, -B_t \leq b - 2a]$$

$$= \mathbb{P}[T_a \leq t, B_t \geq 2a - b] \underset{\uparrow}{=} \mathbb{P}[B_t \geq 2a - b]$$

pues $\{T_a \leq t\} \supset \{B_t \geq 2a - b\}$



Ya probamos

$$\mathbb{P}[S_t \geq a,\ B_t \leq b] = \mathbb{P}[B_t \geq 2a-b]$$

En particular, si tomamos $b = a \geq 0$, vemos que

$$\mathbb{P}[S_t \geq a] = \mathbb{P}[S_t \geq a,\ B_t \geq a] + \mathbb{P}[S_t \geq a,\ B_t \leq a]$$

$$= \mathbb{P}[B_t \geq a] + \mathbb{P}[B_t \geq a] = 2\,\mathbb{P}[B_t \geq a]$$

Derivando, se obtiene que (S_t, B_t) tiene densidad

$$f_{(S_t,B_t)}(a,b) = \mathbb{1}_{\{a>0,\ b<a\}} \frac{2(2a-b)}{\sqrt{2\pi t^3}} \exp\left\{-\frac{(2a-b)^2}{2t}\right\}$$

Corolario:

como

$$\mathbb{P}[T_a \leq t] = \mathbb{P}[S_t \geq a] = \mathbb{P}[|B_t| \geq a]$$

$$= \mathbb{P}[B_t^2 \geq a^2] = \mathbb{P}[t B_1^2 \geq a^2] = \mathbb{P}\Big[\overbrace{\frac{a^2}{B_1^2} \leq t}^{(\#)}\Big]$$

En particular, escribiendo explícitamente (#) y derivando respecto a t, obtenemos que T_a tiene densidad

$$f_{T_a}(t) = \frac{a}{\sqrt{2\pi t^3}} \exp\left\{-\frac{a^2}{2t}\right\} \mathbb{1}_{\{t>0\}}$$

Integración estocástica respecto al mov. Browniano

(ver "Malliavin calculus and related topics" de David Nualart, pag 15)

Recordar que si queremos definir

$$\int_0^T \square_t \, B(dt) \leftarrow$$

$$= \int_0^T \square_t \, \dot{B}(t) \, dt$$

No funciona el approach de Lebesgue-Stieltjes pues Variacion de B es infinita

(Paréntesis: approach que no funciona

$$B(dt) = dB_t = d\, G(\mathbb{1}_{[0,t]})$$

$$= G\left(\frac{d}{\partial t} \mathbb{1}_{[0,t]}\right) \partial t = G(\delta_0(\cdot - t))\,\delta t = \dot{B}(t)\, dt \,)$$

Approch 1 para resolver el problema:

$$\int_0^T U_t \, B(dt),$$ con U_t es suave

$$:= U(t) B(t) - \int_0^T B_t \, U(dt) \leftarrow$$ está bien definido.

1º caso en que no funciona este approach:

$$\int_0^T B_t B(dt) \leftarrow \text{No funciona}$$

Approach general: supongamos que

$$U_t = \sum_{i=0}^{m} F_i \mathbb{1}_{(t_i, t_{i+1})}(t), \quad \leftarrow \quad t_0 = 0 < t_1 < \cdots < t_m$$

Cómo definimos

$$\int_0^T U_t B(dt) := \sum_{i=0}^{m} \int_0^T F_i \mathbb{1}_{(t_i, t_{i+1}]}(t) B(dt)$$

$$= \sum_{i=1}^{m} F_i (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}).$$

¿Es razonable? Sí

Se puede usar la definición? No siempre.

Se necesita saber de qué manera se relacionan F_i y $B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$ (lo cual no es trivial).

Si queremos calcular

$$\mathbb{E}[F_i(B_{t_{i+1}} - B_{t_i})] = \mathbb{E}[F_i]\,\mathbb{E}[B_{t_{i+1}} - B_{t_i}] = 0$$

suponer que

$$F_i \perp B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$$

¿Cómo le hago para tener $F_i \perp B_{t_{i+1}} - B_{t_i}$?

Una manera, es pedir que

$$F_i \in \sigma(B_u ; u \leq t_i) = \mathcal{F}_{t_i}$$

Resumen: si

$F_i \in \tilde{\mathcal{F}}_{t_i}$, con $F_i \in L^2(\Omega)$, podemos definir

$$\int_0^T U_t \, B(dt) := \sum_{i=1}^{n} F_i \, (B_{t_{i+1}} - B_{t_i}).$$

Queremos ahora extender esta definición

Pregunta natural:

Si U es más general, (si no fuera de la forma

$$U(t) = \sum_{i=0}^{n} F_i \, \mathbb{1}_{(t_i, t_{i+1}]} \quad \text{con } F_i \in \tilde{\mathcal{F}}_{t_i} \,)$$

Consideraremos procesos $U(t)$ adaptados o no-anticipantes, que por definición son aquellos que satisfacen $U(t) \in \mathcal{F}_t$

Para seguir, ocuparemos

- $\mathcal{F}_t = \sigma(B_s ; s \leq t) \cup \mathcal{N}$, $\mathcal{N} \leftarrow$ cjtos nulos del Browniano.

- U_t lo tomaremos "un poquito más que adaptado"

pedirémos que U_t sea progresivamente medible;

Def:

$U : [0,T] \times \Omega \longrightarrow \mathbb{R}$ es progresivamente medible si $\forall\ t \leq T$, la restricción de U al cjto $[0,t] \times \Omega$. es $\mathcal{B}([0,t]) \otimes \mathcal{F}_t$ - medible $\forall\ t \leq T$

¿Por qué lo necesito?

¿Como calculamos la ley de expresiones como

$\int_0^t U(s)ds$? Necesitamos medibilidad

de $\int_0^t U(s)ds$