

La física del ping-pong

Ricard Alert Zenón

`ricard.alert.zenon@gmail.com`

Institut Pere Vives Vich, Igualada
Facultat de Física de la Universitat de Barcelona

Treball de recerca de Batxillerat
Dirigit per Ernest Fabregat Soler
Cursos 2005-2007

Índex general

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Capítol

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Objectius i motivació. Què fer i per què

Objectius

- Descripció física del joc

Motivació

- Combinació de dues de les meves aficions
- Originalitat (avui ja s'ha tractat el tema almenys en dos treballs de recerca més, al seu dia era inèdit)
- Especial incidència de la física en el ping-pong:
 - ▶ mida i massa de la pilota $\implies$ grans velocitats (translació) i efectes (rotació)
 - ▶ quantitat, diversitat i complexitat dels materials involucrats
 - ▶ diuen que és l'esport no motoritzat més ràpid del món

Objectius i motivació. Què fer i per què

Objectius

- Descripció física del joc

Motivació

- Combinació de dues de les meves aficions
- Originalitat (avui ja s'ha tractat el tema almenys en dos treballs de recerca més, al seu dia era inèdit)
- Especial incidència de la física en el ping-pong:
 - ▶ mida i massa de la pilota $\Rightarrow$ grans velocitats (translació) i efectes (rotació)
 - ▶ quantitat, diversitat i complexitat dels materials involucrats
 - ▶ diuen que és l'esport no motoritzat més ràpid del món

Metodologia. Com fer-ho

Reduccionisme

- 1 Detecció dels mecanismes bàsics i senzills que governen un fenomen físic complex
- 2 Descripció d'aquests mecanismes bàsics
- 3 Integració dels mecanismes bàsics per explicar el fenomen complex

En el cas de la física del ping-pong, els mecanismes bàsics són tan sols dos: el rebot i l'efecte.

Mètode d'investigació

- 1 Experiment o fet empíric a explicar
- 2 Teoria (diversos aspectes de la mecànica clàssica newtoniana)
- 3 Conclusions

Metodologia. Com fer-ho

Reduccionisme

- 1 Detecció dels mecanismes bàsics i senzills que governen un fenomen físic complex
- 2 Descripció d'aquests mecanismes bàsics
- 3 Integració dels mecanismes bàsics per explicar el fenomen complex

En el cas de la física del ping-pong, els mecanismes bàsics són tan sols dos: el rebot i l'efecte.

Mètode d'investigació

- 1 Experiment o fet empíric a explicar
- 2 Teoria (diversos aspectes de la mecànica clàssica newtoniana)
- 3 Conclusions

Capítol

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Secció

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Experiment

Procediment

Mesura de l'alçada de la pilota en funció del temps en rebots verticals successius en caiguda lliure (pilota *Nittaku**** sobre una superfície de cautxú sintètic)

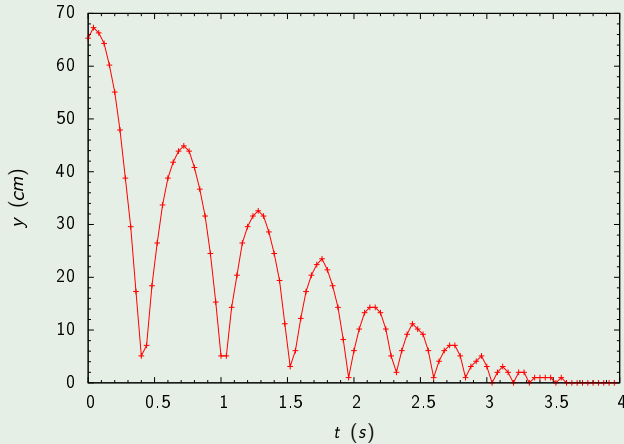
Instrumentació

- Sensor de posició *MultiLog Pro* (25 Hz)
- Programari *MultiLab*



Experiment

Resultats



Teoria

Dissipació d'energia en el rebot

- Fricció de l'aire negligible (es comprova que és una molt bona aproximació)
- Dissipació energètica associada quasi totalment al xoc inelàstic
- Proposta d'un model simple

$$zE_i = E_f; \quad z \equiv \text{factor de conservació energètic} \quad (1)$$

$$z(U_i + T_i) = U_f + T_f \quad (2)$$

$$zmgh_i = mgh_f \implies z = \frac{h_f}{h_i} \quad (3)$$

- Limitacions del model: s'observa una dependència $z = z(E_i)$

Teoria

Coeficient de restitució

Reformulació en termes del coeficient de restitució d'un xoc (ε)

$$\varepsilon \equiv \frac{|\vec{p}_{s,CM}|}{|\vec{p}_{e,CM}|} \quad (\text{Newton}) \quad (4)$$

$$\text{Xoc unidimensional pilota-Terra} \implies \varepsilon = \frac{v_s}{v_e} \quad (5)$$

Conservació de l'energia mecànica en l'aire

$$\frac{mv_e^2}{2} = mgh_i, \quad \frac{mv_s^2}{2} = mgh_f \implies \frac{v_e^2}{v_s^2} = \frac{h_i}{h_f} \implies \varepsilon = \sqrt{z} \quad (6)$$

ε i z aporten la mateixa informació

Conclusions

Característiques de la pilota. Model elàstic

- Major pèrdua d'energia a major diàmetre (justificació de l'augment de mida per l'alentiment del joc)

Model elàstic del xoc pilota-superfície (lleï de Hooke)

$$F = \frac{dp}{dt} = YS \frac{\delta L}{L} \equiv k\delta L \quad (7)$$

$Y \equiv$ mòdul de Young (propietat intrínseca dels materials)

Considerem:

- ▶ Dues pilotes de mida diferent que cauen des de la mateixa alçada (igual Δp)
- ▶ Temps d'aturada en el xoc (Δt) independent de la mida de la pilota (L)
- ▶ Superfície de contacte S independent de la mida de la pilota

Conclusions

Característiques de la pilota. Model elàstic

- Major pèrdua d'energia a major diàmetre (justificació de l'augment de mida per l'alentiment del joc)

$$F = \frac{dp}{dt} \approx \frac{\Delta p}{\Delta t} \quad \text{independent de la mida} \quad (8)$$

$$\frac{\delta L_{\text{gran}}}{L_{\text{gran}}} = \frac{\delta L_{\text{petita}}}{L_{\text{petita}}} \implies \delta L_{\text{gran}} > \delta L_{\text{petita}} \quad (9)$$

$$E_e = E_i - E_f = mg(h_i - h_f) = \frac{k(\delta L)^2}{2} = \frac{F}{2}\delta L \quad (10)$$

$$E_{e,\text{gran}} > E_{e,\text{petita}} \quad (11)$$

Conclusions

Característiques de la pala. Model elàstic

- Major pèrdua d'energia a major gruix de l'esponja: augment de L
- Menor pèrdua d'energia amb les antigues coles ràpides: augment de Y
- Major pèrdua d'energia a major flexibilitat de la goma: disminució de Y (sistemes com el *High Tension* de *Butterfly* intenten minimitzar aquest efecte)
- Major control a major flexibilitat de la goma i/o major gruix de l'esponja: proporcionat per la major deformació δL

Cal un balanç entre els diversos aspectes

Secció

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

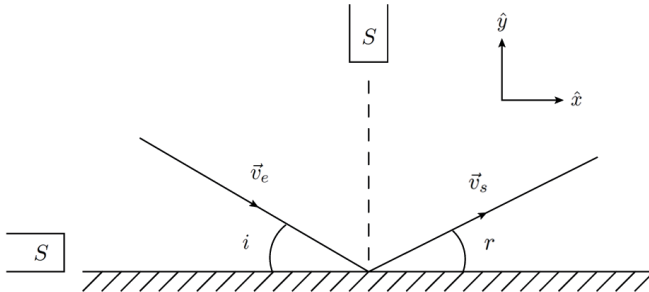
- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Experiment

Procediment

Mesura de la velocitat abans i després del xoc assumint moviment rectilini uniforme en la dècima de segon anterior i posterior al xoc



Experiment

Instrumentació

- Sensor de posició *MultiLog Pro*
- Programari *MultiLab*

Resultats

$$v_{e,x} = 0.21 \pm 0.07 \text{ m/s}, \quad v_{e,y} = -1.63 \pm 0.07 \text{ m/s} \quad (12)$$

$$v_{s,x} = 0.20 \pm 0.07 \text{ m/s}, \quad v_{s,y} = 0.92 \pm 0.07 \text{ m/s} \quad (13)$$

$$\varepsilon = 0.57 \pm 0.04 \quad (14)$$

$$i = \arctan \frac{|v_{e,y}|}{|v_{e,x}|} = 83 \pm 2^\circ, \quad r = \arctan \frac{|v_{s,y}|}{|v_{s,x}|} = 78 \pm 4^\circ \quad (15)$$

Teoria

Angles d'incidència i de reflexió

L'angle de reflexió no coincideix amb el d'incidència ($r \neq i$) a causa de la inelasticitat del xoc

La relació $v_{e,x} \approx v_{s,x}$ trobada experimentalment fa pensar en determinar r a partir de ε per un cert i

$$\varepsilon = \frac{|\vec{v}_s|}{|\vec{v}_e|} = \frac{\sqrt{v_{s,x}^2 + v_{s,y}^2}}{\sqrt{v_{e,x}^2 + v_{e,y}^2}} = \frac{|v_{s,x}| \sqrt{1 + \tan^2 r}}{|v_{e,x}| \sqrt{1 + \tan^2 i}} \approx \sqrt{\frac{1 + \tan^2 r}{1 + \tan^2 i}} \quad (16)$$

$$r \approx \arctan \sqrt{\varepsilon^2 (1 + \tan^2 i) - 1}; \quad \varepsilon > \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 i}} \quad (17)$$

Cal notar que $r(\varepsilon = 1) = i$ tal com era d'esperar

Conclusions

Angles d'incidència i de reflexió

- La dissipació energètica en el contacte pilota-superfície provoca una pèrdua d'angle de reflexió (s'ha estudiat una situació sobre un pla horitzontal, sense acció de la gravetat, i sense efecte)
- En una pala en repòs la principal font de la dissipació és la deformació elàstica en la direcció perpendicular a la pala i no pas la fricció tangencial
- Podem determinar l'angle de reflexió a partir del d'incidència si coneixem el coeficient de restitució del sistema pilota-superfície

Secció

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Experiment

Procediment

Mesura de l'alçada de la pilota en funció del temps en rebots verticals successius en caiguda lliure (pilota *Nittaku**** sobre una superfície de cautxú sintètic)

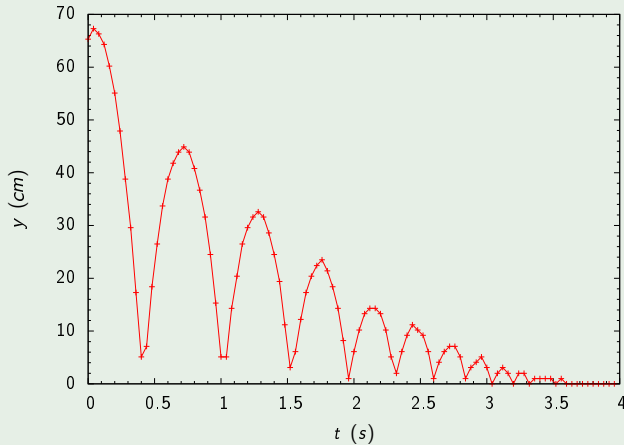
Instrumentació

- Sensor de posició *MultiLog Pro* (25 Hz)
- Programari *MultiLab*



Experiment

Resultats



Teoria

Alçada de la pilota en funció del temps $y(t)$

Caiguda lliure amb $y_{0,n} = 0$

$$y(t) = v_n(t - t_{n-1}) - \frac{g(t - t_{n-1})^2}{2} \equiv v_n \tilde{t}_n - \frac{g \tilde{t}_n^2}{2} \quad (18)$$

$y_{0,n} \equiv$ posició inicial del rebot n

$v_n \equiv$ velocitat inicial del rebot n

$t_n \equiv$ temps total transcorregut un cop completat el rebot n

$\tilde{t}_n \equiv$ temps transcorregut des de l'inici del rebot n

Cal determinar $n = n(t)$. Calcularem t_n i invertirem la funció

$$t_n = \sum_{k=0}^n T_k; \quad T_k \equiv \text{durada del rebot } k \quad (19)$$

Teoria

Alçada de la pilota en funció del temps $y(t)$

Considerem ε independent del rebot, és a dir, de l'energia

$$T_k = 2\sqrt{\frac{2h_k}{g}} = 2\varepsilon^k \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \equiv T_0 \varepsilon^k \quad (20)$$

Suma de la progressió geomètrica

$$t_n = \sum_{k=0}^n T_k = T_0 \frac{1 - \varepsilon^{n+1}}{1 - \varepsilon} \implies t_{n-1} = T_0 \frac{1 - \varepsilon^n}{1 - \varepsilon} \quad (21)$$

Teoria

Alçada de la pilota en funció del temps $y(t)$

Invertim la funció per trobar $n(t)$

$$n = \frac{\ln \left(1 - (1 - \varepsilon) \frac{t_{n-1}}{T_0} \right)}{\ln \varepsilon} \quad (22)$$

Si substituïm $t_{n-1} \rightarrow t$ només cal afegir una funció part entera (funció terra)

$$n = \left\lfloor \frac{\ln \left(1 - (1 - \varepsilon) \frac{t}{T_0} \right)}{\ln \varepsilon} \right\rfloor \quad (23)$$

Teoria

Alçada de la pilota en funció del temps $y(t)$

Les velocitats inicials són

$$v_n = \varepsilon^n \sqrt{\frac{gh_0}{2}} \quad (24)$$

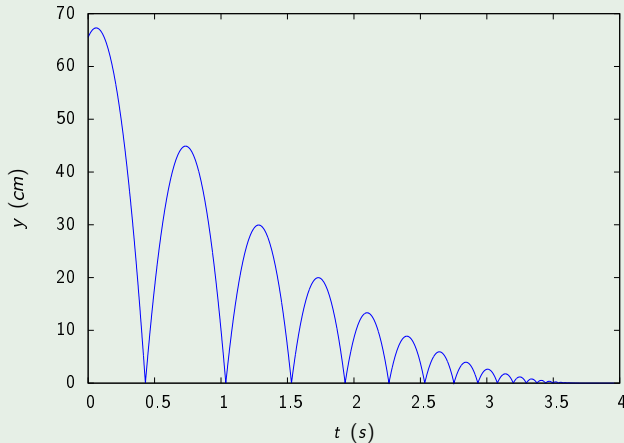
Finalment

$$y(t) = \sqrt{\frac{gh_0}{2}} \varepsilon^n \tilde{t}_n - \frac{g \tilde{t}_n^2}{2} \quad (25)$$

- Hem obtingut una expressió analítica que determina l'alçada de la pilota en qualsevol instant tenint en compte els rebots
- Només cal conèixer l'alçada inicial h_0 , la gravetat g i el coeficient de restitució ε

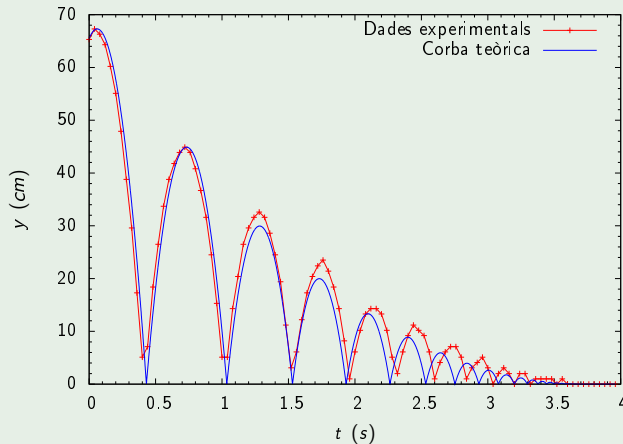
Conclusions

Corba teòrica de l'alçada $y(t)$



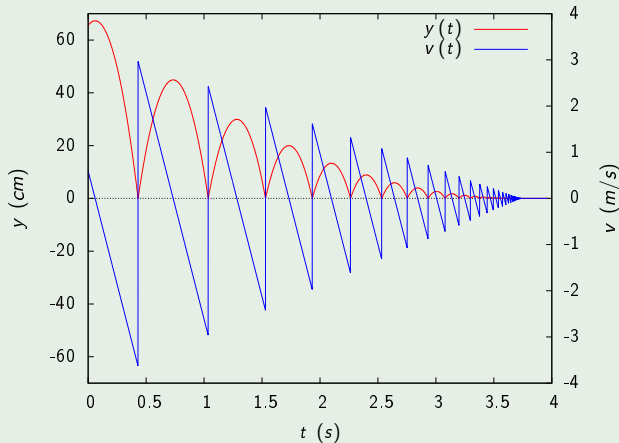
Conclusions

Comparació teoria-experiment de l'alçada $y(t)$



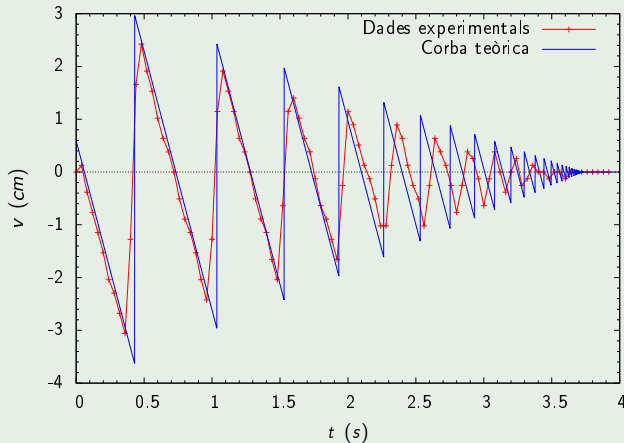
Conclusions

Corbes teòriques de l'alçada $y(t)$ i la velocitat $v(t)$



Conclusions

Comparació teoria-experiment de la velocitat $v(t)$



Capítol

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Secció

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- **Contacte amb una superfície**
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

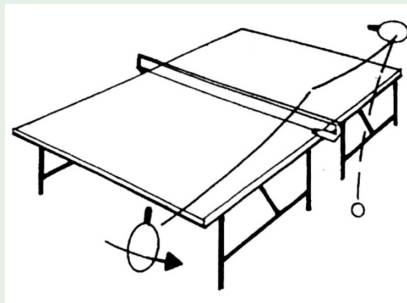
4 Conclusions i perspectives

Experiment

Evidència empírica

Les pilotes amb efecte reboten de forma diferent que les que no en duen

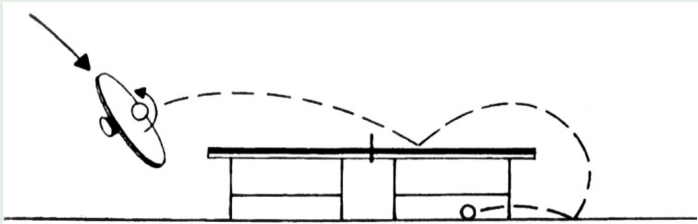
- Efecte lateral: una pilota amb efecte lateral rebotja en un pla diferent del d'incidència (se'n va cap al costats)



Experiment

Evidència empírica

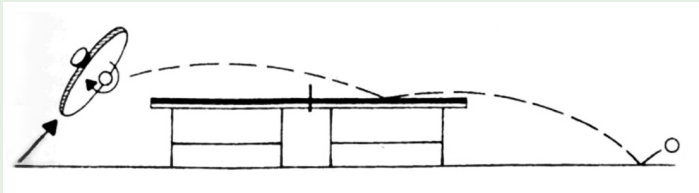
- Efecte tallat: una pilota tallada rebotja en un angle de reflexió major que el d'una pilota sense efecte (s'eleva en contactar amb la taula fins a aconseguir el retrocés i se'n va avall en contactar amb la pala)



Experiment

Evidència empírica

- Efecte liftat: una pilota liftada rebot en un angle de reflexió menor que el d'una pilota sense efecte (se'n va avall en contactar amb la taula i s'eleva en contactar amb la pala)

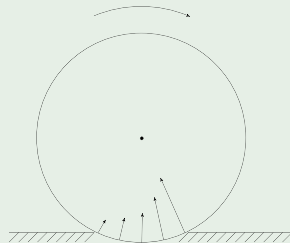


Teoria

Model del rodolament

Considerem una pilota amb efecte que cau verticalment sobre una superfície

- En el moment del contacte, l'efecte crea una asimetria en la pressió que rep la regió de contacte de la pilota. L'origen d'aquesta asimetria és la resposta viscoelàstica dels materials, que es deformen més ràpidament que no pas recuperen la seva forma inicial (histèresi elàstica)



Teoria

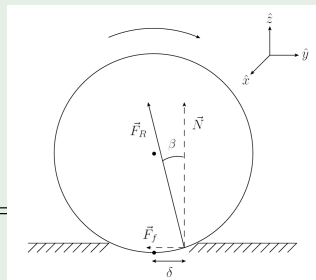
Model del rodolament

- La força resultant $\vec{F}_R$ està desplaçada δ del punt central del contacte $\Rightarrow$ crea un moment de força $\vec{M}_{\text{rel}}$

$$\begin{aligned}\vec{M}_{\text{rel}} &= \vec{r} \times \vec{F}_R \approx \delta F_R \sin\left(\frac{\pi}{2} + \beta\right) \hat{x} = \\ &= \delta F_R \cos \beta \hat{x} = \delta N \hat{x} \quad (26)\end{aligned}$$

- La component tangencial de la força $\vec{F}_R$ crea una petita fricció

$$\vec{F}_f = -F_R \sin \beta \hat{y} = \frac{N}{\cos \beta} \sin \beta \hat{y} = -N \tan \beta \hat{y} \equiv -\mu N \hat{y} \quad (27)$$



Teoria

Model del rodolament

- Un moment de força $\vec{M}$ provoca un canvi en el moment angular $\vec{L}$

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} \quad (28)$$

Separació del moment angular

$$\begin{aligned} \vec{L} &= \sum_{i=1}^N \vec{r}_i \times \vec{p}_i = \sum_{i=1}^N (\vec{r}_{CM} + \vec{r}_i') \times m_i (\vec{v}_{CM} + \vec{v}_i') = \\ &= \sum_{i=1}^N \vec{r}_i' \times \vec{p}_i' + \vec{r}_{CM} \times \vec{p}_{CM} \equiv \vec{L}_{rel} + \vec{L}_{CM} \end{aligned} \quad (29)$$

Teoria

Model del rodolament

- El moment de força $\vec{M}_{\text{rel}}$ modifica el moment angular $\vec{L}_{\text{rel}}$ (és intern)

$$\vec{L}_{\text{rel}}^f \approx \vec{L}_{\text{rel}}^i + \tau \vec{M}_{\text{rel}} \quad (30)$$

$\tau \equiv$ temps de contacte

Moment d'inèrcia I de la pilota (closca esfèrica)

$$\vec{L}_{\text{rel}}^i = I \vec{\omega}_i = -\frac{2mR^2}{3} \omega_i \hat{x} \quad (31)$$

$$\vec{L}_{\text{rel}}^f \approx -\frac{2mR^2}{3} \omega_i \hat{x} + \tau \delta N \hat{x} \equiv -\frac{2mR^2}{3} \omega_f \hat{x} \quad (32)$$

Teoria

Model del rodolament

- La pilota rebota amb menor efecte

$$\omega_f \approx \omega_i - \frac{3\tau\delta N}{2mR^2} \quad (33)$$

- El moment angular total es conserva de forma aproximada

$$\vec{L}^f = \vec{L}_{\text{rel}}^f + \vec{L}_{\text{CM}}^f \approx \vec{L}^i = \vec{L}_{\text{rel}}^i \quad (34)$$

- La pilota rebota amb un moment angular orbital que la desvia cap a la direcció observada empíricament

$$\vec{L}_{\text{CM}}^f \approx -\tau\delta N\hat{x} \quad (35)$$

Conclusions

Característiques de la pilota

- Menor efecte a major diàmetre (justificació de l'augment de mida per l'alentiment del joc)

Si contactem la pilota tangencialment amb una força $\vec{F} = F_t \hat{\theta}$ durant un temps τ (coordenades cilíndriques de la pilota)

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = \frac{d\vec{L}}{dt} \implies \vec{L} = \int_0^\tau R F_t \hat{z} dt = \tau R F_t \hat{z} \quad (36)$$

Moment d'inèrcia I de la pilota (closca esfèrica)

$$\vec{L} = \frac{2mR^2}{3} \vec{\omega} \implies \vec{\omega} = \frac{3\tau F_t}{2mR} \hat{z} \quad (37)$$

Conclusions

Característiques de la pala

- Major efecte a major flexibilitat de la goma i/o major gruix de l'esponja: augment del coeficient de rodolament δ
- Mecanismes d'acció de les gomes de pics:
 - ▶ disminució de la superfície de contacte $\implies$ menor adherència $\implies$ menor efecte (més pronunciat a menor superfície dels pics)
 - ▶ deformació asimètrica dels pics, aixafats a la banda d'atac però vinclats a la banda contrària. La restitució elàstica d'aquesta deformació pot capgirar l'efecte (més pronunciat a major longitud dels pics)

Secció

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Experiment

Procediment

- Mesura directa de l'angle de desviació d'una pilota amb efecte suspesa en un pèndol en un flux d'aire (trigonometria i escala sobre una fotografia), φ_d
- Mesura de l'angle de desviació d'una pilota amb efecte suspesa en un pèndol en un flux d'aire segons la teoria de Magnus, φ_t
 - ▶ Mesura de la velocitat de l'aire (mètode de l'efecte Venturi, mètode del pèndol, anemòmetre), u
 - ▶ Mesura de la velocitat de rotació de la pilota (vídeo), v

Instrumentació

- Corda, fil de niló, agulla d'estendre
- Ventilador
- Càmera fotogràfica i de vídeo

Experiment

Resultats

- Mesura directa

$$\varphi_d = \arcsin \frac{x + R}{a} = 3.4 \pm 0.2^\circ \quad (38)$$

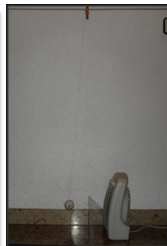
$x \equiv$ separació del pèndol de la vertical

$a \equiv$ longitud del pèndol

- Mesura indirecta

$$u = 2.5 \pm 0.1 \text{ m/s} \quad (39)$$

$$\nu = 2.00 \pm 0.06 \text{ Hz} \quad (40)$$



Carregant

Teoria

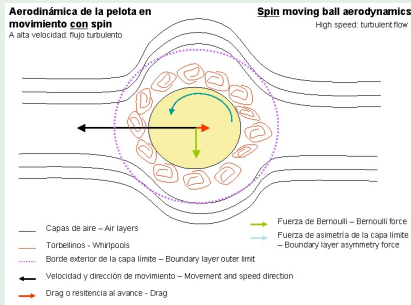
Efecte Magnus

Teorema de
Kutta-Joukowski:
resolució del problema
d'un cos qualsevol sotmès
a un flux $\vec{u}$ bidimensional
ideal, estacionari,
incompressible i amb
vorticitat $\vec{\Gamma}$ (segueix sent
potencial o irrotacional)

$$\vec{F}_M = \rho \vec{u} \times \vec{\Gamma}$$

$\rho \equiv$ densitat del fluid

Força de Magnus sobre el cos (41)



Teoria

Efecte Magnus

Interpretació física:

adhesió del fluid al cos

⇒ diferència de velocitat

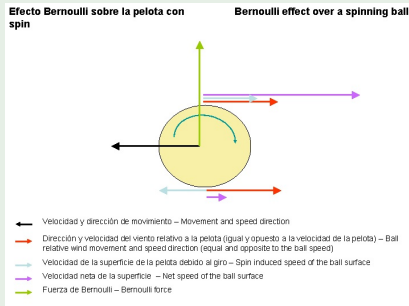
⇒ diferència de pressió P

⇒ força

Teorema de Bernoulli

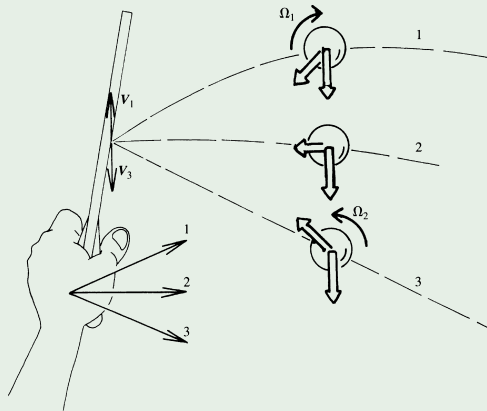
$$\vec{\nabla} \left(P + \frac{\rho u^2}{2} \right) = \vec{0} \quad (42)$$

- Turbulència a la capa límit ⇒ disminució de l'adhesió ⇒ disminució de l'efecte Magnus i de la resistència aerodinàmica (pilotes de golf)



Conclusions

Trajectòria de les pilotes amb efecte

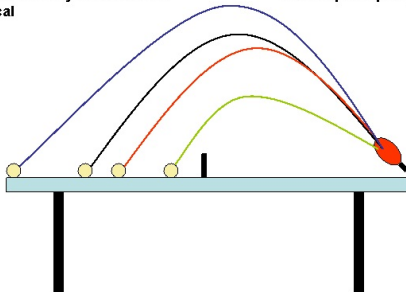


Conclusions

Trajectòria de les pilotes amb efecte

Proyección de las trayectorias en el plano vertical

Vertical plane path projection



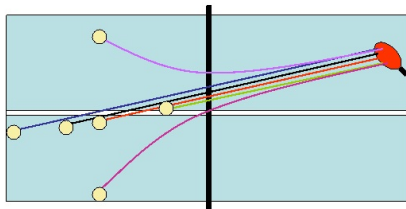
- Trayectoria ideal (parábola balística sin rozamiento) – Ideal path (ballistic parabola)
- Trayectoria real en el aire (rozamiento): sin top/back spin, con o sin spin lateral – Real path with friction, no top/back spin, with or without lateral spin
- Trayectoria con top spin – Path with top spin
- Trayectoria con back spin – Path with back spin

Conclusions

Trajectòria de les pilotes amb efecte

Proyección de las trayectorias en el plano horizontal

Horizontal plane path projection



- Trayectoria ideal (parábola balística sin rozamiento) – Ideal path (ballistic parabola, no friction)
- Trayectoria real en el aire (con rozamiento) sin spin – Real path with friction, no spin
- Trayectoria con top spin – Path with top spin
- Trayectoria con back spin – Path with back spin
- Trayectoria con spin lateral de derecha a izquierda, sin top/back spin – Path with lateral R to L spin, no top/back spin
- Trayectoria con spin lateral de izquierda a derecha, sin top/back spin – Path with lateral L to R spin, no top/back spin

Conclusions

Comparació teoria-experiment

Adhesió $v_+ = u + v, \quad v_- = u - v; \quad v = \omega R = 2\pi\nu R \quad (43)$

Teorema de Bernoulli $\Delta P = \frac{\rho}{2} (v_+^2 - v_-^2) = 2\rho uv \quad (44)$

Força de Magnus $F_M = S\Delta P = \pi R^2 \Delta P = 2\pi\rho uv R^2 \quad (45)$

Dinàmica del pèndol $\varphi_t = \arctan \frac{F_M}{mg} = 4.3 \pm 0.6^\circ \quad (46)$

Resultat compatible amb $\varphi_d = 3.4 \pm 0.2^\circ$

- La teoria de Magnus descriu mínimament bé fins i tot quantitativament la desviació d'origen aerodinàmic de les pilotes amb efecte

Capítol

1 Introducció

2 El rebot

- Dinàmica del rebot vertical unidimensional
- Dinàmica del rebot horitzontal bidimensional
- Cinemàtica del rebot vertical unidimensional

3 L'efecte

- Contacte amb una superfície
- Trajectòria en l'aire. Efecte Magnus

4 Conclusions i perspectives

Conclusions generals

Satisfacció dels objectius

Hem pogut descriure els mecanismes físics bàsics que governen els diversos fenòmens que es donen en el transcurs de les jugades de ping-pong

- El rebot
 - ▶ Pèrdua d'energia en el rebot i la seva relació amb les principals característiques de la pilota i de la pala
 - ▶ Pèrdua d'angle de reflexió en el rebot
 - ▶ Caracterització cinemàtica d'una successió de rebots verticals
- L'efecte
 - ▶ Trajectòries que prenen les pilotes amb efecte en rebotar i la seva relació amb les característiques de la pilota i de la pala
 - ▶ Trajectòries que prenen les pilotes amb efecte en desplaçar-se per l'aire

Treballs posteriors

La màgia dels efectes

Autor: Albert Martínez Vall

Institut: Col·legi Sant Miquel dels Sants, Vic

Curs de presentació: 2009

Director: Miquel Padilla Muñoz

- Tracta únicament el tema de l'efecte però en més detall en el terreny experimental
- S'hi fan experiments de rebot bidimensional semblants als del nostre treball però amb pilotes amb efecte liftat i tallat i es comparen
- S'hi fan simulacions de l'aerodinàmica de la pilota

Treballs posteriors

La física i el tennis taula

Autor: Oriol Abante Alert

Institut: Col·legi La Mercè, Martorell

Curs de presentació: 2011

Director: Josep Anton Garrido Alarcón

- Tractament genèric més enfocat a la vessant esportiva (materials i tècnica del ping-pong)
- Hi ha un apartat dedicat a la biomecànica del ping-pong
- S'hi fan experiments sobre la resistència de les gomes a la tracció
- S'hi fa una enquesta i dues entrevistes

Propostes d'estudi

Alguns temes susceptibles de ser tractats

- Millora de la precisió i de la quantitat de tots els experiments
- Aprofundiment en l'estudi de les propietats elàstiques dels materials
- Verificació experimental quantitativa del model del rodolament
- Estudi detallat dels mecanismes d'acció de les gomes de pics
- Aprofundiment en l'estudi de l'aerodinàmica de la pilota incloent-hi l'efecte de les turbulències

Moltes gràcies!

