空手三角飛び蹴り

1

空手の達人技の中に秘儀中の秘儀ともいわれている三角跳び蹴りという技がある。この三角跳び蹴りを物理的に解明した以下の文章の（①）～（⑬）において[　]に文字が指定してある場合はその文字を用いた式を，[数値]とある場合は当てはまる数値を入れよ。

最初に人の跳び上がる能力はどれほどであるかを垂直飛びを例として概算してみることにする。

図 1

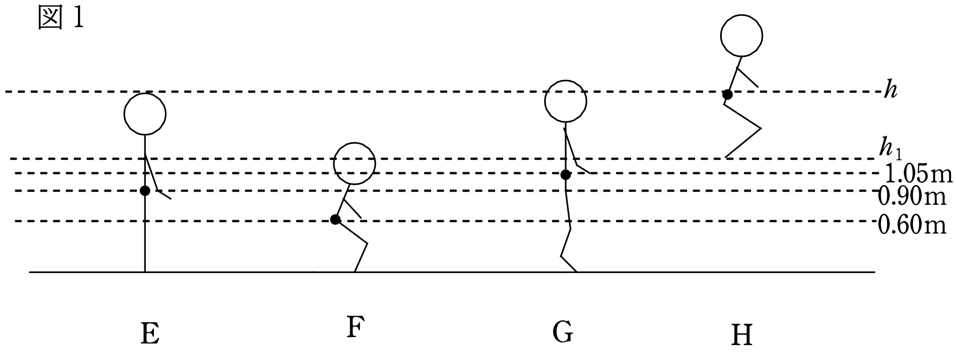


図 1 は自然体の状態をE（重心の高さ0.90m），跳びあがるため体を最も低くした瞬間をF（重心の高さ0.60m）とする。跳びあがるとき，つま先が床から離れる瞬間をG（重心の高さ1.05m）とし，最も高く上がり，足を曲げた状態をH（重心の高さ h ）とする。Hの状態における足先の高さを $h_1 = h - 0.60$ とする。図の黒点が重心の位置であり，E, F，Hの状態では上向きの速度は0である。片足の床を蹴る力は鍛えた人で体重の1.2倍とされている。この場合，この人の質量を m[kg]，重力加速度の大きさを g [m/s^2] とすると，この人に働いている重力の大きさは（①[m,g]）[N]で片足の床を蹴る力の大きさは1.2 mg [N]である。両足で蹴ると2.4 mg {N}となる。以降の仕事は重心の高さの変化に注目して考えることにする。FからGの状態になるまでこの力の大きさが一定であるとすると，この力がした仕事は（②[数値]）mg [J]となる。仕事によって得たエネルギーが運動エネルギーとなり，Hの状態の重力による位置エネルギーとなる。FからHになるのに，$(h - 0.60)$ [m]飛び上がっているので，増加した重力による位置エネルギーは（③[h]）mg である。両者は等しいので，（②）mg =（③）mg が成立し，h =1.68mほどであり，h_1=（④[数値]）mとなる。Eの状態とHの状態の重心の高さの差が，この人の垂直飛びの記録は0.78mとなる。垂直飛びの世界記録が1.22mであり，NBAの平均が0.70mなので，体を鍛え上げた人なら，この垂直飛びの記録は可能であるといえる。足先の位置から，この人は（④）mの高さの台まで跳びあがることができることを意味している。助走すれば，もう少し記録は伸びるであろう。

三角跳び蹴りとは図2のようにAとBが対戦しているとき，AがBを攻撃するのに，直接Bを攻撃するのではなく，近くの壁に飛び込み，その反動を利用してBの身長よりも高く跳び，Bに跳び蹴りをかけるというものである。Bは上からの跳び蹴りを受けるわけで，ほとんどかわすことができず，勝利を得るためにかなり有効な大技であるが，技術的にか

なり難易度が高く相当な達人技である。このような三角跳び蹴りは人間技としては不可能であるという説もあり，可能な技かどうかを物理的に解明してみよう。

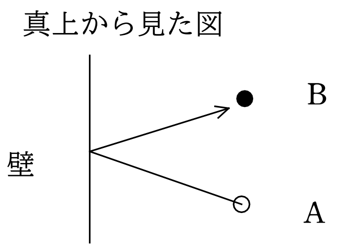


図2

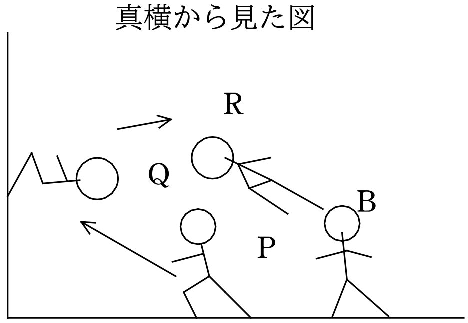
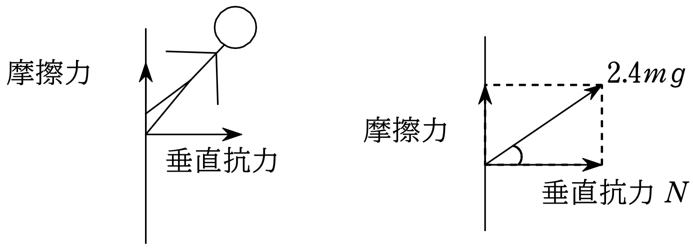


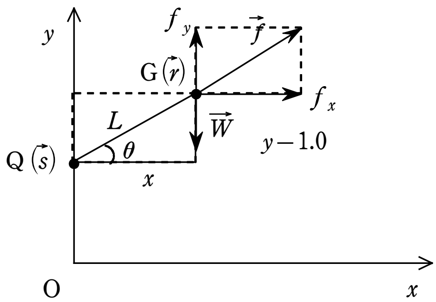
図3

図４



空手家Aが図３のPからQに跳びあがるとき，Aは（④）mまで跳び上がれるので，Qの高さを1.0mとする。Aが壁を蹴るときは一定の大きさの抗力 $2.4mg$ が働いているとし，蹴り始めは壁から最大摩擦力が働いているとする。

図５



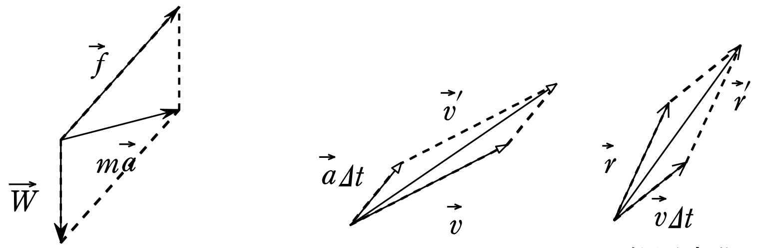
人の質量はすべて重心に集まっているとして運動方程式を立てて，壁を蹴った後の重心の動きを計算してみることにする。

人の重心が受ける力は，足からの抗力 $\vec{f}$ と重力 $\vec{W}$ である。図５のように壁を y 軸，床を x 軸とし，長さの単位はmとする。AはPから跳びあがり，壁の床からの高さ1.0mの位置Qに足を突き，壁を蹴って三角跳び蹴りをするとすれば，足を突いた位置Qの座標は $\vec{s}=(0,1.0)$ となる。ある瞬間の重心Gの位置座標を $\vec{r}=(x,y)$ とする。

足からの抗力 $\vec{f}$ は線分QGに沿う方向となり，大きさは $2.4mg$ である。線分QGの長さを L とすると， $L=\sqrt{x^2+(y-1.0)^2}$ となる。$\vec{f}=(f_x,f_y)$ とし，線分QGの水平からの

なす角をθとすると，$\cos\theta = \dfrac{x}{L}$，$\sin\theta = \dfrac{y-1.0}{L}$となるので，$f_x =$ （⑤[x,L]） mg，$f_y =$ （⑥[y,L]） mgとなる。また，$\vec{W}$を成分で表すと$\vec{W}=(0,mg)$である。

図６



運動方程式　　速度変化　　位置変化

加速度$\vec{a}=(a_x,a_y)$とし，$\vec{f},\vec{W}$を用いて運動方程式を立てると，$m\vec{a}=\vec{f}+\vec{W}$となる。運動方程式により$\vec{a}$が求められる。加速度は変化しているが，微小時間Δtの間は加速度が一定であるとして速度を計算する。時刻tでの速度を$\vec{v}=(v_x,v_y)$とし，時刻$t+\Delta t$での速度を$\vec{v}'=(v_x',v_y')$とすると，両者の関係は$\vec{v}'=$ （⑦[$\vec{v},\vec{a},\Delta t$]） となる。

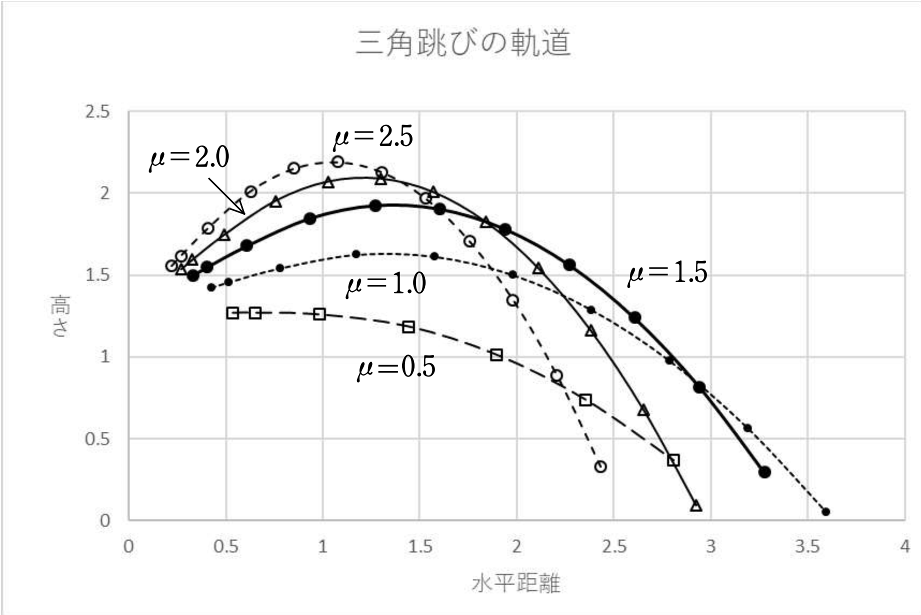
微小時間Δt後の座標を$\vec{r}'=(x',y')$とすると，$\vec{r}'=$ （⑧[$\vec{r},\vec{v},\Delta t$]）となる。このようにして微小時間Δt後の位置が計算できる。さらにΔt後の位置を求めるには$\vec{r}=\vec{r}'$，$\vec{v}=\vec{v}'$とし，新たな位置座標を用いて$\vec{f}$を計算し，これを用いて 同様の計算を次々とすることによって，重心の動きを調べることができるのである。このような計算をシミュレーション計算と呼んでいる。

この計算を実行するには時刻0における$\vec{f},\vec{v}$,$\vec{r}$が必要である。足が壁に設置した瞬間を時刻$t=0$とする。この瞬間の値（初期値）を求めてみよう。

蹴る瞬間，最大摩擦力が働いているものとすれば，垂直抗力をN，静止摩擦係数をμとすると，最大摩擦力の大きさは（⑨[μ, N]）である。この時の抗力の大きさは（⑩[μ, N]） となるので，（⑩）$=2.4mg$が成立する。よって，時刻0における$f_x=\dfrac{2.4mg}{\sqrt{1+\mu^2}}$，$f_y=\dfrac{2.4\mu mg}{\sqrt{1+\mu^2}}$となる。$\vec{v}$は静止していると仮定して$\vec{v}=(0,0)$となる。

Lは足を曲げた状態の足先と重心との距離で，最初0.60mであり，最も伸びた時で1.05 mと設定する。$0.60<L<1.05$の範囲で重心に抗力が働き，重心は重力と抗力の合力によって加速度運動し，$L\geqq 1.05$のとき，足が壁から離れるので$\vec{f}=0$となり，重力のみの運動をすることになる。$\tan\theta=$ （⑪[μ]） で，$t=0$のとき，$L=0.60$となるので，$x=L\cos\theta=\dfrac{L}{\sqrt{1+\tan^2\theta}}=\dfrac{0.60}{\sqrt{1+\mu^2}}$，$y=1.0+L\sin\theta=1+\dfrac{0.60\mu}{\sqrt{1+\mu^2}}$となる。

この条件のもとに$m=60$kg，$g=10\mathrm{m/s^2}$とし，μ=0.5，1.0，1.5，2.0，2.5の各場合においてExcelを用いて計算した結果が図７である。



グラフから判断して対戦相手の身長が1.6m程度であったとすると，最も壁から離れていて，かつ相手より高い位置から蹴ることが可能なのはμ＝（⑫[数値]）のときである。グラフは重心の位置を示しているので蹴り足は重心の位置より0.60m程先にある。この場合，壁より，（⑬[数値]）m程度離れている人まで蹴ることができる。静止摩擦係数は通常1.0未満である。1.0未満ではグラフより，ほとんど高く飛べていないことが分かる。よって，この三角飛び蹴りは道場の壁板を利用して使える技ではないことになる。

真実の三角飛び蹴りというのは壁ではなく，窓の桟や屋外の岩･木の幹など滑らないものを利用して蹴りあがるのではないかと考えられる。

空手三角飛び蹴り

(解説)

① 重力の大きさなので mg

② FからGは1.05−0.60＝0.45m上昇している。仕事は力×距離なので，力$2.4mg$で0.45m上昇しているので 仕事＝ $2.4mg \times 0.45 = 1.08\,mg$ よって，1.08

③ 重心の位置が$(h-0.60)$上昇しているので，重力による位置エネルギーは$mg(h-0.60)$上昇していることになる。 よって，$(h-0.60)$

④ ②の仕事が③の位置エネルギーの上昇となるので $mg(h-0.60) = 1.08mg$が成立する。これを解くと $h = 1.68$mとなる。h_1はhより0.60m小さいので，

1.68−0.60＝1.08 よって， 1.08

⑤ f_xは体が足から受ける抗力 $2.4mg$ の水平成分なので， $2.4mg\cos\theta$となる。

$\cos\theta = \dfrac{x}{L}$ なので， $f_x = 2.4mg\cos\theta = \dfrac{2.4x}{L}mg$となり， ⑤＝ $\dfrac{2.4x}{L}$

⑥ f_yは体が足から受ける抗力 $2.4mg$ の鉛直成分なので， $2.4mg\sin\theta$ となる。

$\sin\theta = \dfrac{y-1.0}{L}$ なので， $f_y = 2.4mg\sin\theta = \dfrac{2.4(y-1.0)}{L}mg$ よって，

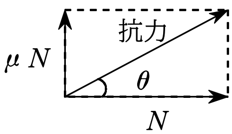
⑥＝ $\dfrac{2.4(y-1.0)}{L}$

⑦ 図６の速度変化のベクトル図より $\vec{v'} = \vec{v} + \vec{a}\Delta t$

⑧ 図６の位置変化のベクトル図より $\vec{r'} = \vec{r} + \vec{v}\Delta t$

⑨ 垂直抗力を N，静止摩擦係数をμとすると，最大摩擦力の大きさなので， μN

⑩



図で三平方の定理を用いると，抗力＝ $\sqrt{N^2+(\mu N)^2} = \sqrt{1+\mu^2}\,N$

⑪ ⑩の図より $\tan\theta = \dfrac{\mu N}{N} = \mu$

⑫ 身長1.6m程度で，最も遠くに飛んでいるのは $\mu = 1.5$

⑬ $\mu = 1.5$のとき，高さ1.6mとなるのは，グラフより2.5mの位置である。これに蹴り足の長さを加えて，3.1m