

インビトウィナース（補間）の主要な問題の一つは、円弧の描画がとても難しいこと・・・

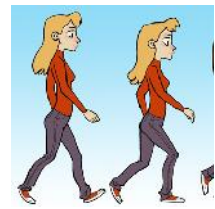
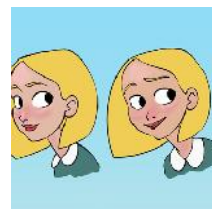
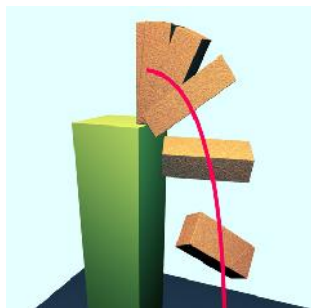
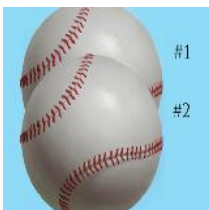
直線的な描画はアクションのエッセンスを完全に殺してしまう。

from The Illusion of Life, F. Thomas & O. Johnston

アクションパスの物理学

このチュートリアルでは、放り投げたボールやテーブルの端で転倒して落下するレンガなどのアクションの基本的なパス(軌道)の説明をする。

言い換えれば、それらの物体は直線的な動きではなくどのようにうごいているか？



© 2009 Alejandro L. Garcia

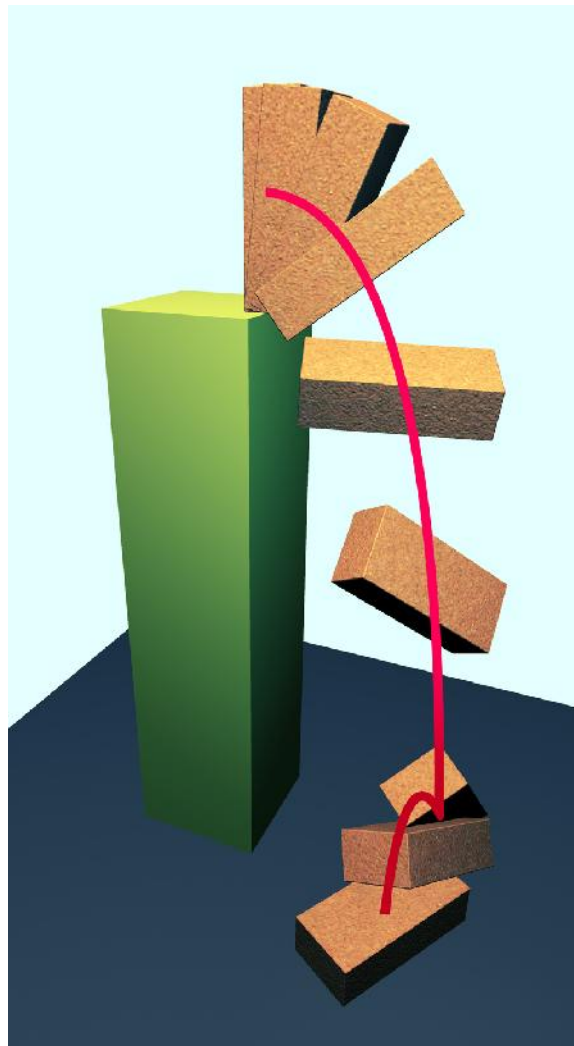
Creative Commons Attribution-
Noncommercial-Share Alike 3.0
United States License

レンガの落下アニメーションの実験

レンガの落下実験は、様々なアニメーションの原則を伝えるための基本的な実験である。

このチュートリアルでは、レンガの落下実験を統一の例として用いる。

高いところ（テーブル）からレンガが倒れて落下するこのテストでは、衝撃によりレンガが粉々に壊れたり、バウンスするかもしれない。



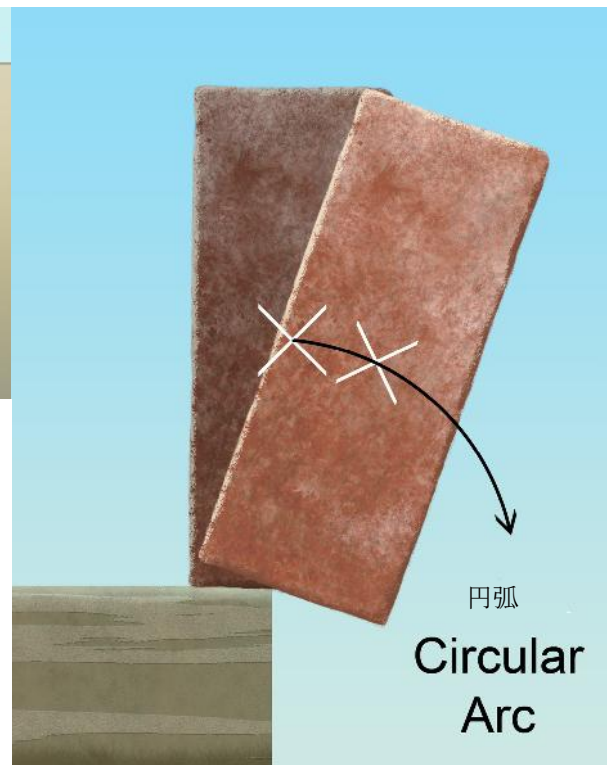
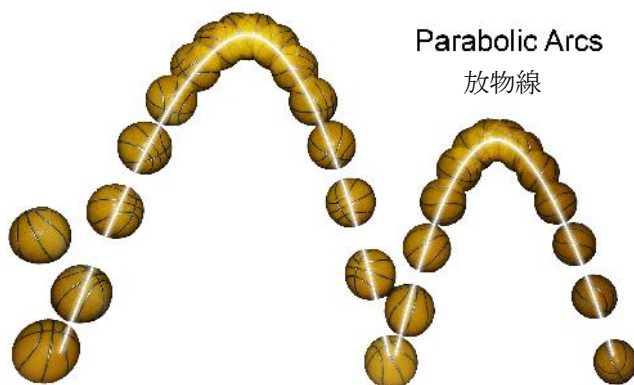
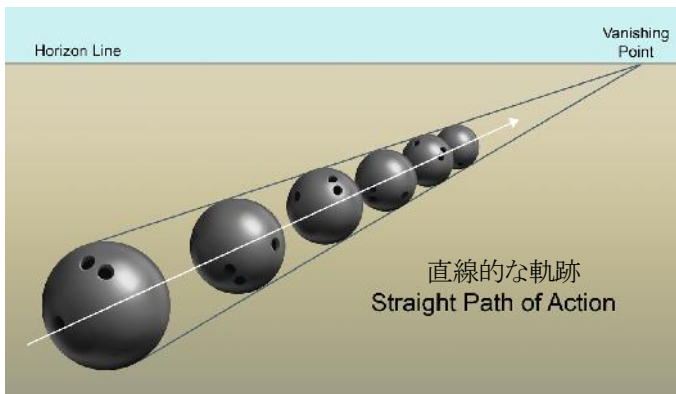
このチュートリアルでは、主に転倒、落下、バウンスなどのアクションパス（軌道）の法則を説明する。

転倒のタイミング（予備動作の作成方法も）やレンガの回転についてなど、他の要素についても説明するが、これらは落下をメインとした場合のセカンダリ（補助的要素）として考えられる要素である。

アクションパス（軌跡）

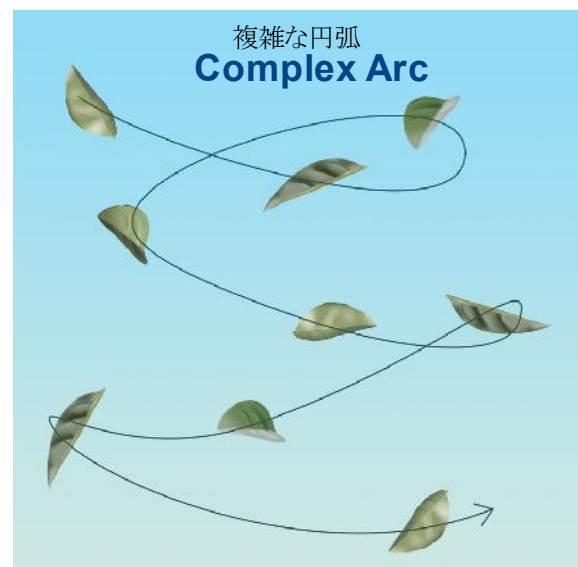
アクションパス（軌跡）は、空間を移動するキャラクターや物体に沿って描かれる。物理学者は、これを軌道と呼ぶ。

物体は、ほとんど直線的に動くことはなく、弧を描くように動く方がより一般的である。



注意：一般的に、重力、摩擦等、多くの力が物体に作用し、より動きを複雑にする。

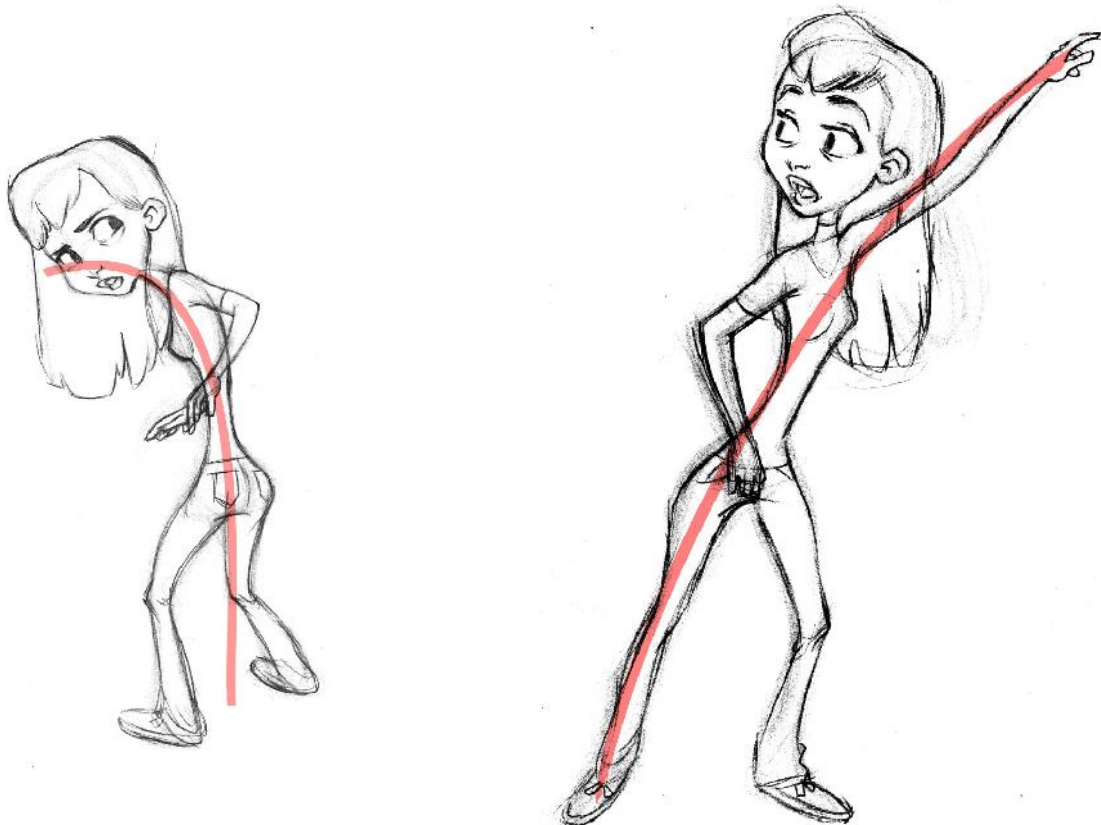
空気抵抗などの力は、時間とともに変化する、タイミング、間隔、およびアクションパス（軌跡）がさらに複雑になる。



アクションライン vs. アクションパス

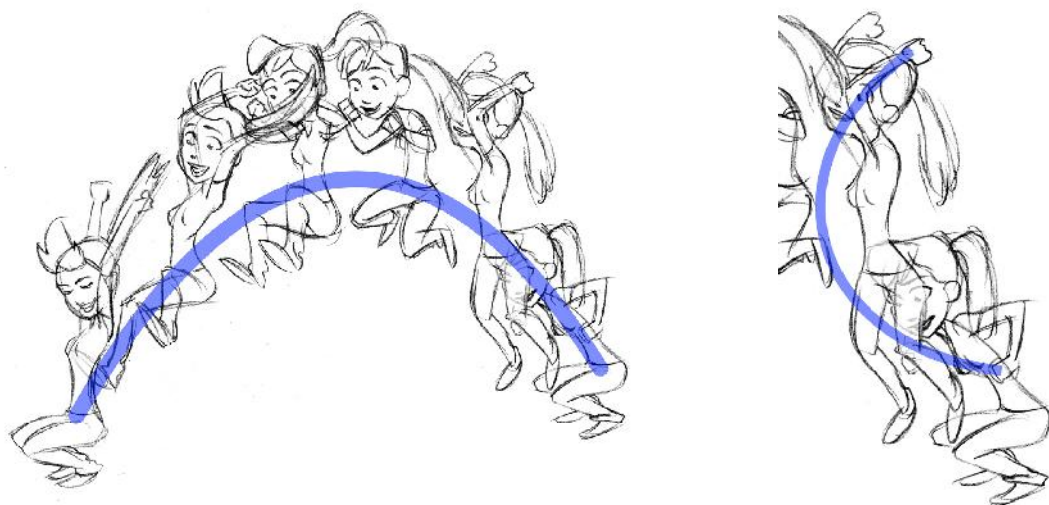
ドローイングのアクションライン（作用線）とアニメーションのアクションパス（軌跡）を混同しないことが重要である。

個々の原画（ポーズ）は、その単一の原画（ポーズ）でのアクションの視覚的な流れを示すアクションのライン（作用線）を持っている。



アクションパス（軌跡）とは、下図のジャンプの放物線の円弧のように原画のシーケンスのための軌道である。

アクションパスは、通常はメインの動きに対して使用することが多い。しかし、キャラクターの手、腕、足等の動きなど二次的アクションのアクションパスとすることも考えられる。

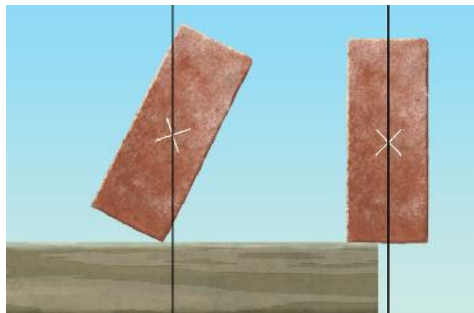


円弧

最もシンプルなアクションパスの一つは円弧である。

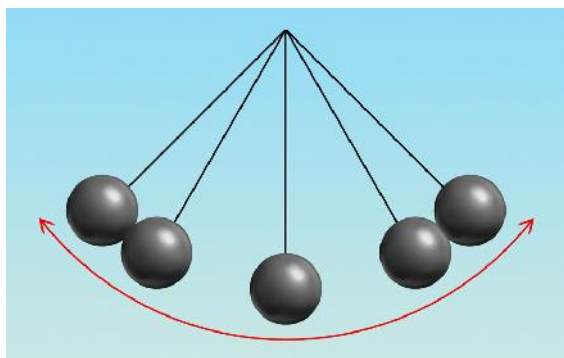
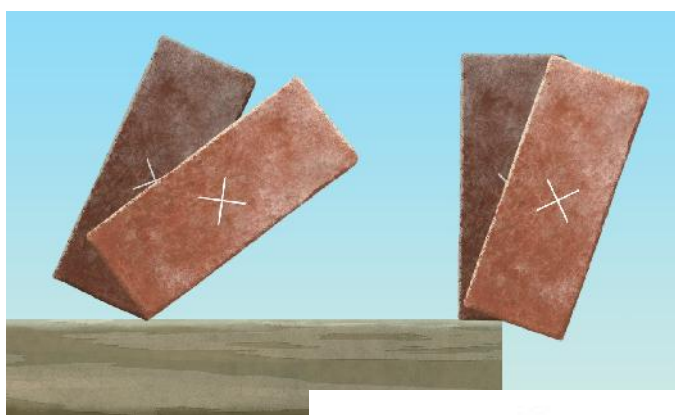
例えば、レンガは摩擦によってテーブルから離れるまで滑り続けようとするため、レンガは角を中心に回転して倒れる。

円弧の中心はレンガが回転するポイントである。

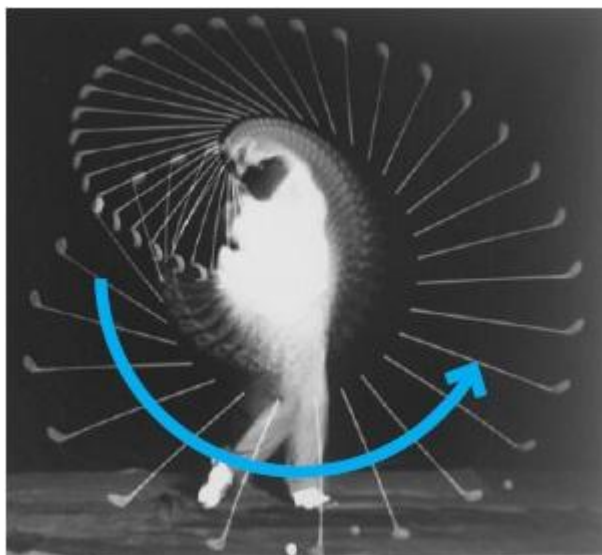


レンガは2通りの倒れ方が考えられる。

レンガの角を中心に倒れる倒れ方
テーブルの角を中心に倒れる倒れ方



円弧の運動は、ジョイント部分など固定された回転軸によって制約されていることが多い。



円弧の動きのタイミングは、おそらく、均一な部分(このゴルフスイングの右下部分のように)とスローイン(左下のような)と(上半分のように)スローアウトになる。

exponentialスペーシング（間隔）

※「exponential」について、簡単に言い表せられる言葉が見つからなかったなので、そのまま「exponential」を使用します。直訳では「指数の」「急激な」という意味が使われます。

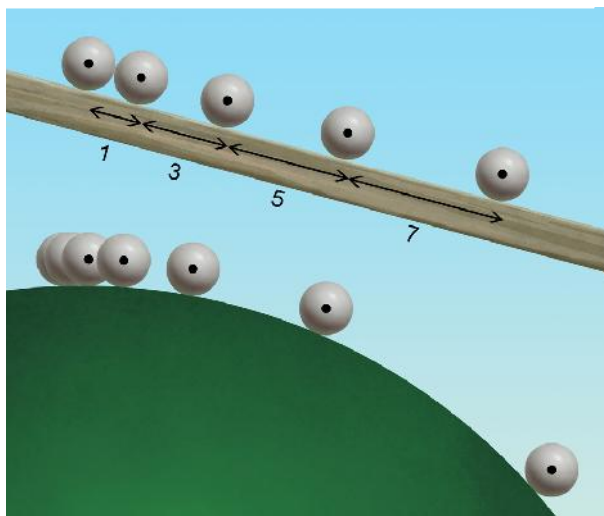
傾斜が増す急な下り坂をボールが転がり、加速に加速が加わる場合にexponentialスペーシング（間隔）が発生する。

前回のチュートリアル「タイミングとスペーシングの物理学」で説明したように、急な下り坂を転がるボールは「Odd Rule」に則った1:3:5:7:9の割合で徐々に加速する。

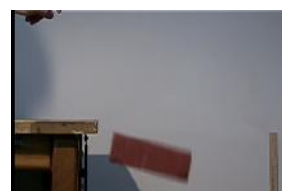
一方、スロープが円弧の場合は急激にスペース（間隔）が広がる。（例えば、1:2:4:8:16:...）。

丘の頂上からの徐々に加速は、始めは非常に遅いが、坂が傾きを増し急速に加速する。

同様にボールが転がり上がる場合はapex（頂上）が近付くにつれ、非常にゆっくりと移動し徐々に減速する。



「Odd Rule」では間隔は足し算的に増加する。exponential スペーシング（間隔）は、掛け算的に増加する。



別の例では、物体が転倒する時に exponential スペーシング（間隔）が発生する。その動きは、始めは非常に遅いが角度が増すと急激に加速する。



重要：予備動作はアニメーションの原則の一つであり、それは、レンガが前方に落下する前に（予備動作として）逆方向に揺らすことで確認することができるだろう。apex（頂点）付近の動作は遅いので、Exponential スペーシングの予備動作を見せるのに都合が良い。予備動作は、レンガが徐々に加速してメインの動き（落下）になる前の合図となる。

24fps でひっくり返るレンガ



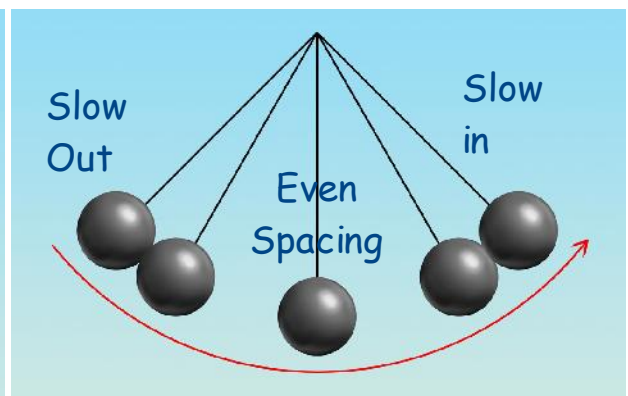
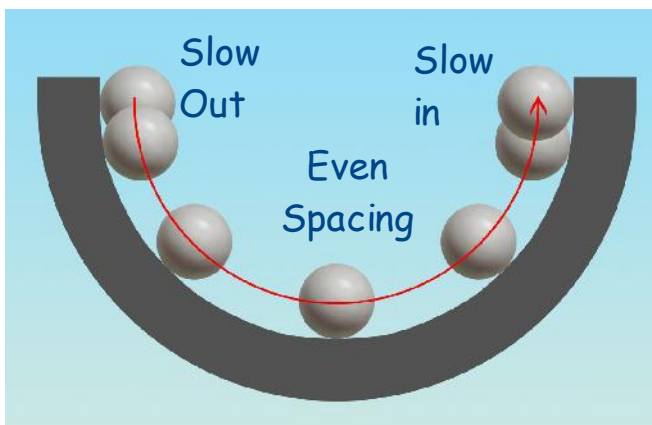
振り子のスペーシング

振り子も円弧の揺れである。しかし、そのスペーシング（間隔）は**exponential**ではない。

振り子のスペーシングは、円形のボウルの中で左右に転がるボールを確認することでよく理解できる。（またはハーフパイプのスケート選手）

左右両端での傾きは急勾配なので、加速はそれらの転換点で最大である。

真ん中の時に最大のスピードになり、その時のスペーシング（間隔）は、ほぼ均等になる。



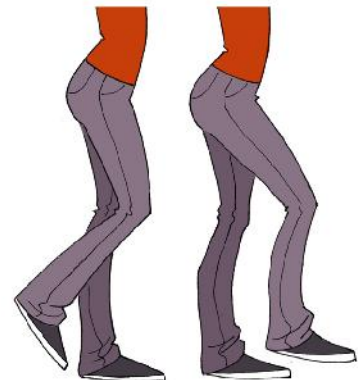
落下と同様に、振り子のタイミングも重さとは無関係である。
（摩擦で動きが遅くならない限り）

歩行サイクルの脚の動作は振り子運動の良い例である。

腕や脚の筋肉がリラックスの状態では、重力の力によって振り子のような動きになる。半径の大きな円弧の長い振り子は前後のスイングに時間がかかる。

長い脚の動物がゆったりとしたストライドであることの一理由の一つである。

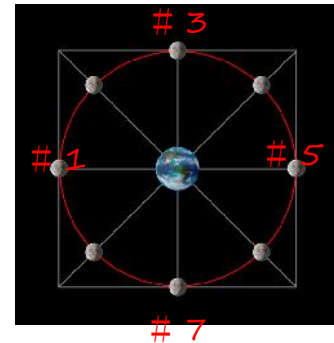
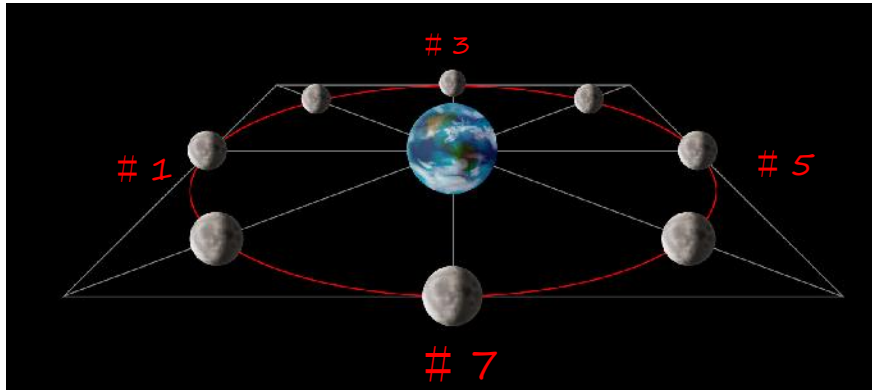
（例えばチワワのきびきびしたストライドと比較してグレートデーンのような大型犬のしのしと歩く）



パースペクティブの円弧

遠近法で見る円は楕円である。

手前から奥への間隔の歪みが、回転を均等にするために特有のタイミングとなる。



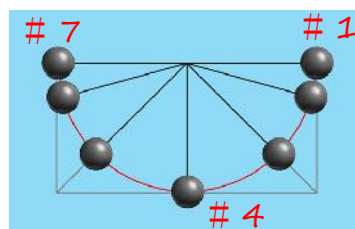
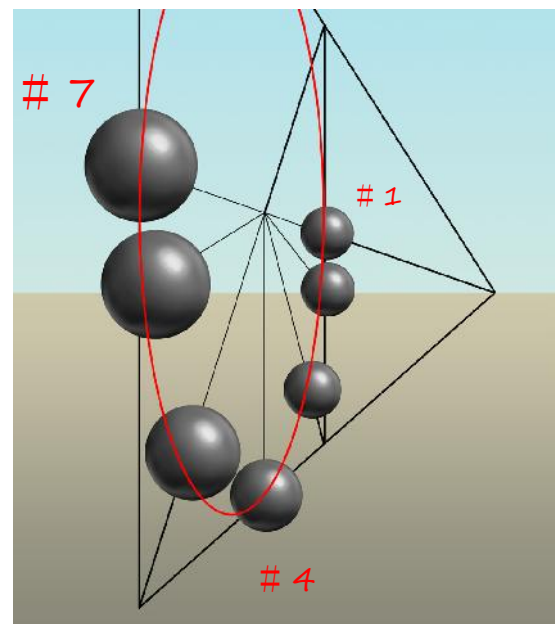
画面を横切る#1～#5と#6～#8の長さはほぼ同じように見える。
手前を移動する時間は、奥を移動する時間の半分の時間となる。
手前を移動する時は倍の速さに見える。

振り子のパースペクティブ効果は、動きのスペーシング（間隔）やタイミングについては、さらに顕著である。

振り子の揺れは、ほとんど予備動作無しで奥からスタートする。

最下点を通過した後、振り子は直ぐに手前に来る。

最後の方のタイミングは、ボールを真上に投げた時のapex（頂点）付近の動きに似ている。



スパイラルと正弦波

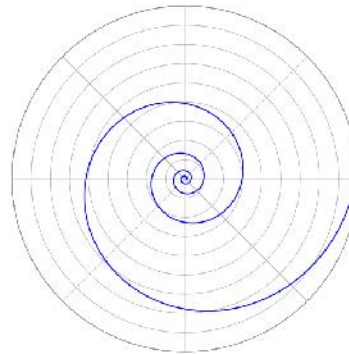


螺旋状に移動する物体は、排水中に渦巻く水のように半径が小さくなるほど、より速くなる。テザーボールのような速度が一定に保たれている場合でも円の半径が小さくなるため、ぐるぐる回るほど益々時間も少なくなる。



スパイラルと正弦波は円弧のバリエーションである。

スパイラルは、回転するにつれて半径が変化する円弧である。



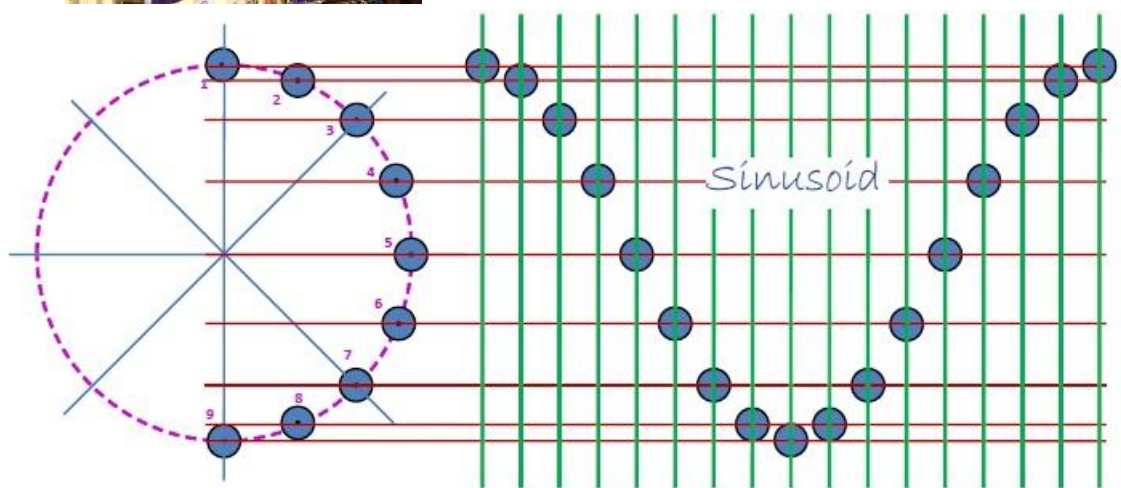
角度の変化に応じてスパイラルの異なる種類がある。この対数螺旋線は半径が急激に増大するため、一般的で自然なスパイラルの一つである。



正弦波は自然界では非常に一般的であり、ほとんどの波動がこのパターンである。

例としては、水面、旗の羽ばたきに波紋が含まれている。

同時に均一な上下の移行が繰り返される時に正弦波が作られる。



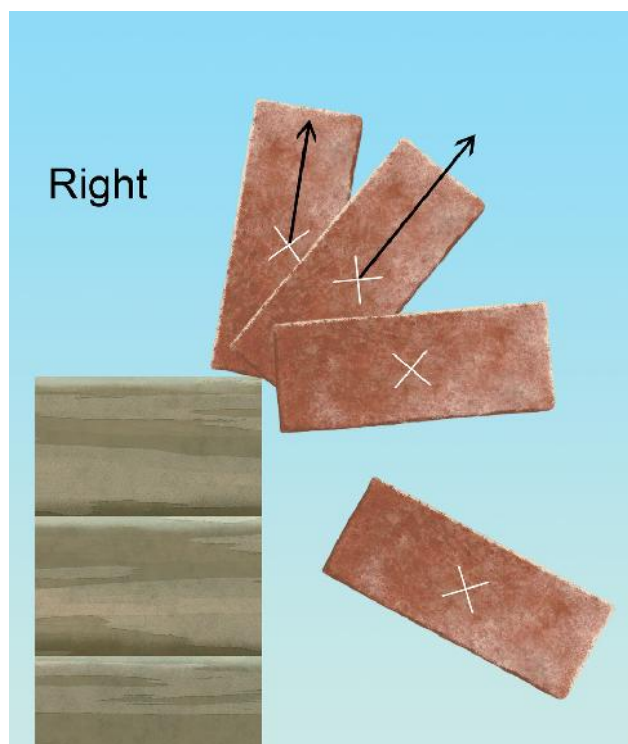
前方に傾く

レンガのアニメーション実験では、レンガは倒れてテーブルから離れて落下した。

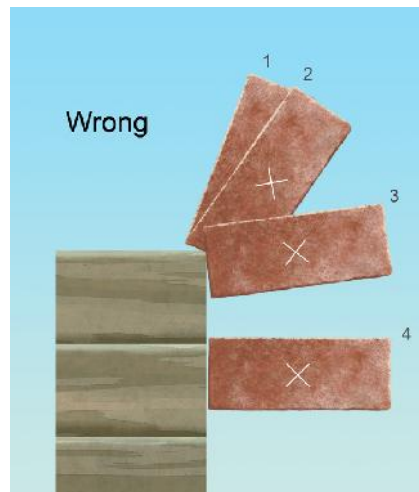
その回転によって、テーブルから離れる横方向のスピードを生み出される。

スピードを増したレンガは、テーブルから引き離すかのような力が作用する。

これは遠心力として知られている。



レンガはこのようには落下しない。



乗客として車に乗り、急ターンで円の中心から外側に引っ張られるように感じる時に遠心力を体験する。



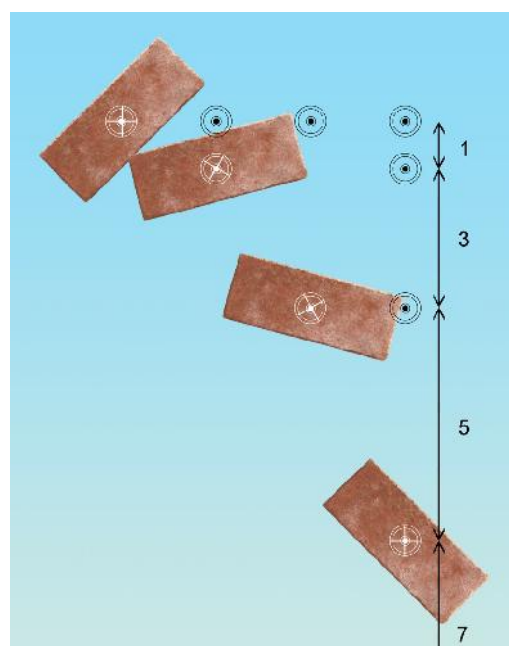
いったんテーブルの縁から滑り落ちたレンガのアクションパス（軌道）は円弧ではない。

空中のレンガは真っ直ぐに落下していないことを除けば“Physics of Timing and Spacing”のチュートリアルで説明した落下するボールと同様に落下する。

レンガの落下運動は垂直落下と横方向の動きの組み合わせである。



[リンク](#): 遠心力の起源と性質は別のチュートリアル (Physics of Creating Action) で説明している。



レンガの落下タイミング

Time (sec.)	Frames	Distance Fallen from Apex
1/24	1	1/3 inch
1/12	2	1 1/3 inches
1/8	3	3 inches
1/6	4	5 1/3 inches
1/4	6	1 foot
1/3	8	1 3/4 feet
1/2	12	4 feet
2/3	16	7 feet
3/4	18	9 feet
1	24	16 feet

Distance Fallen = (1/3 inch) x (Frames) x (Frames)

空中でのレンガのタイミングは、基本的に真っ直ぐに落下する物体の動きと同じである。

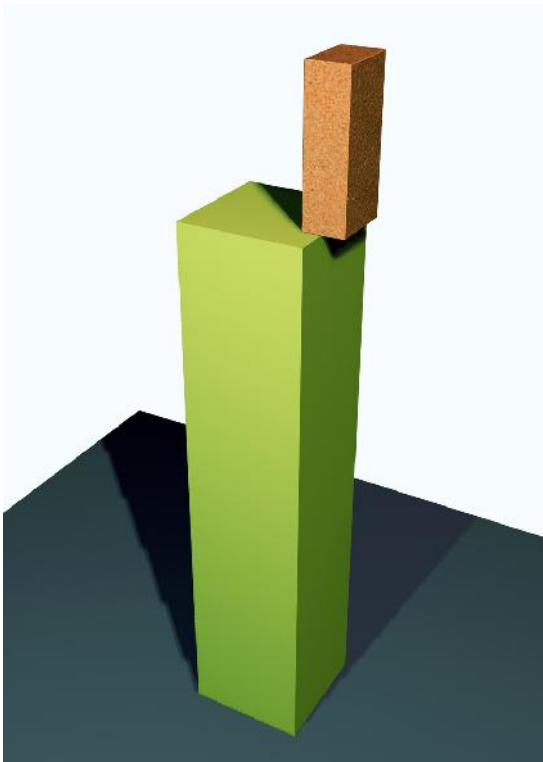
単に徐々に加速する垂直落下に横方向の動きを追加しただけである。

落下距離表（左の表）はレンガが落下したときの大よそのタイミングを見るために使用する。

（チュートリアル “Physics of Timing and Spacing” で説明済み。）

空気抵抗が無い場合、全ての物体は同じ速度で落下することを覚えているだろうか？

レンガは高層ビルの最上階から落下しない限り、空気抵抗は無視できる。



Q: 標準的なレンガの目安を $2\frac{1}{4} \times 3\frac{3}{4} \times 8$ インチとした場合、このレンガの滞空時間は何フレームくらいになるか？

A: 高さを4ブリックの長さ（これは32インチです）程度とすれば、テーブルの上から、大よそ10フレームくらいになりそうだ。

式を元に計算すると、10フレームで落ちた距離は $33\frac{1}{3}$ インチである。だいたい正しい。

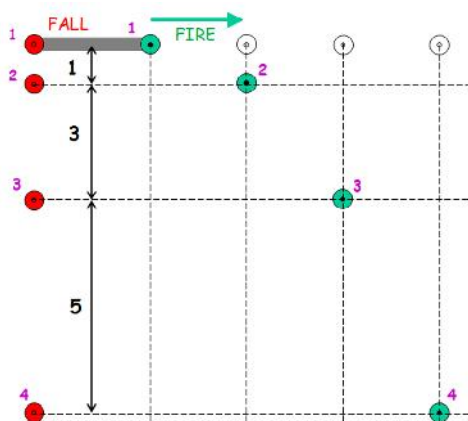
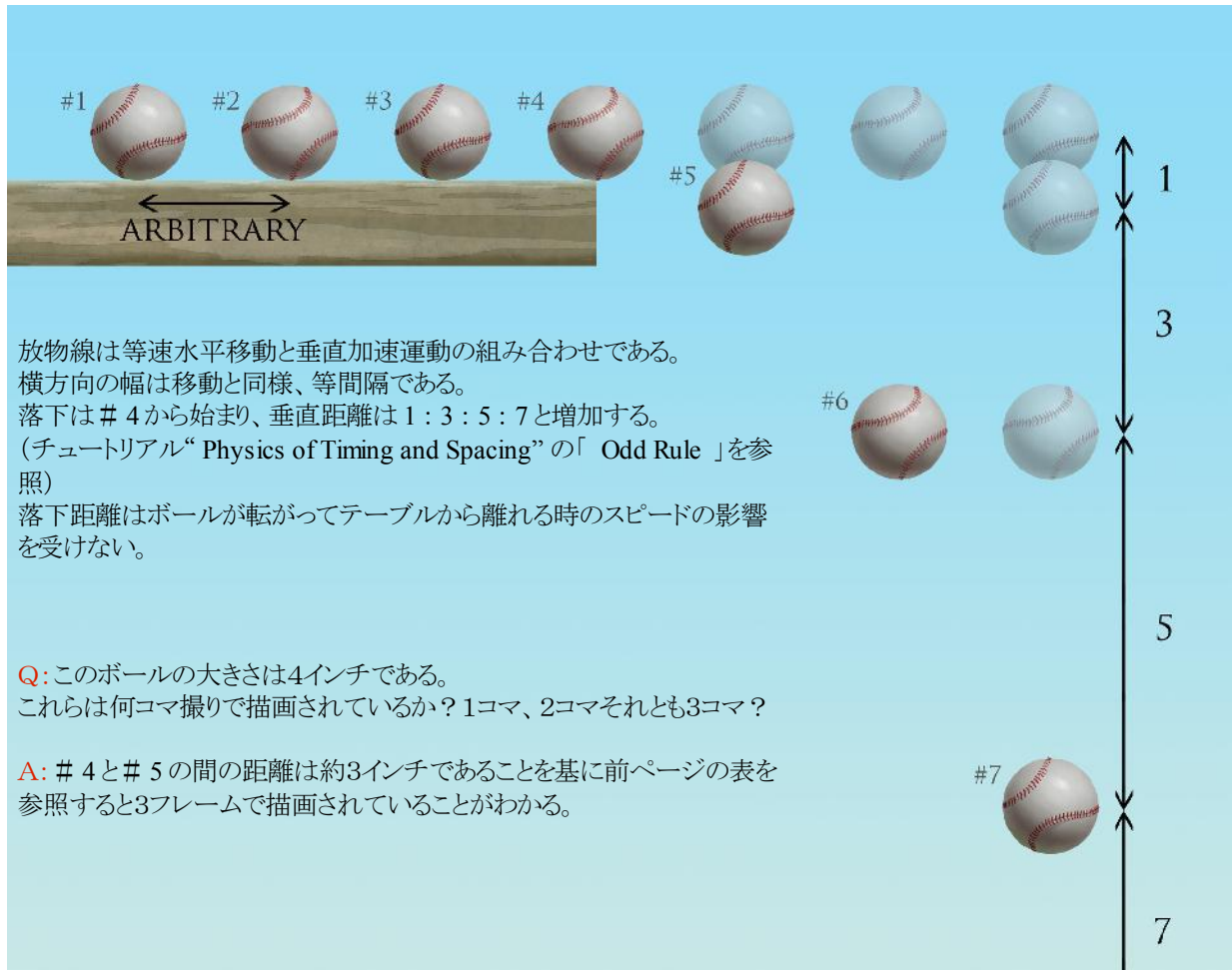


ヒント: このレンガの落下実験はアニメーターにとっての昔ながらの課題である。特に遠近法で一貫性のある形状と大きさを描くのが難しいからである。この一貫性は、レンガが動いていない初めと終わりが最も重要である。

移動と落下

横に移動しながら垂直落下する物体のアクションパスは放物線となる。

良い例として、ボールがテーブルから転がり落ちる例がある。



実験: 真っ直ぐ落ちるボールと水平に発射される2つのボールが同時にリリースされる典型的な物理のデモンストレーションがある。

ボールは常に同じ高さの位置で落下し同時に地面に着く。

滑らかなテーブルの角に平らなナイフを置いて試してみてください。

1つめのコインをナイフの先端に2つめのコインをナイフのハンドルの横のテーブルの上に置く。

素早くナイフをスライドさせることで先端のコインは落下し2つめのコインは横に飛びます。

地面に着いた音を聞いてみよう。



スピニング&タンブリング

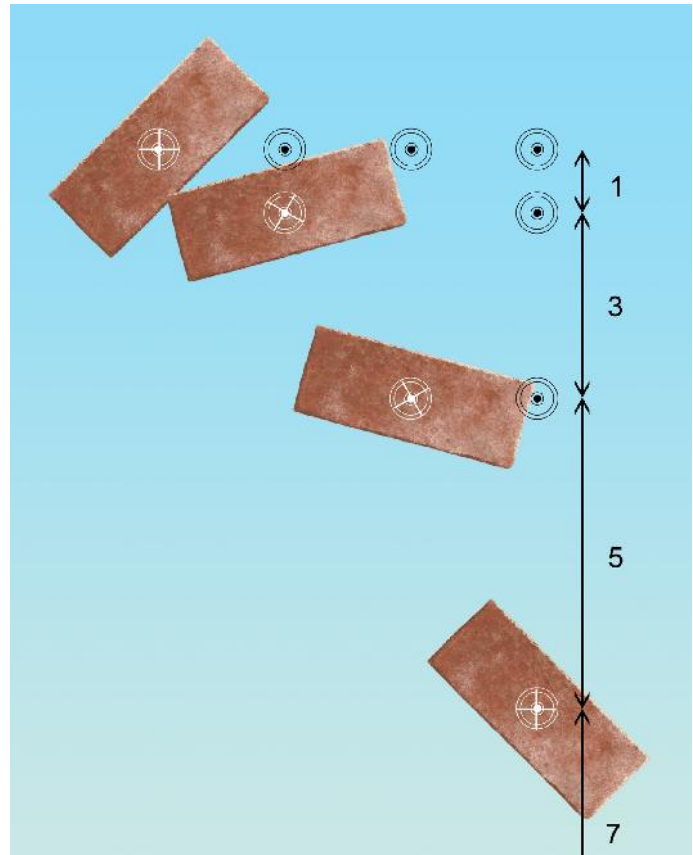
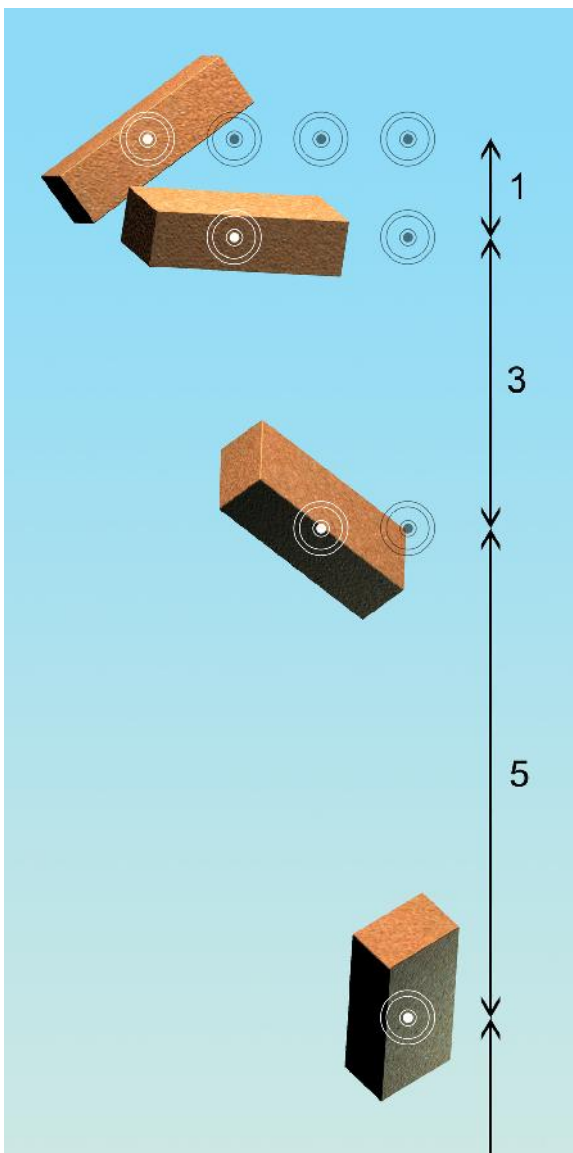


良い例として、椅子を投げるとタンブリング（複雑な回転）が見ることができる。

落下するレンガは中心を軸にシンプルに回転するかもしれないし、複雑な回転になるかもしれない。

シンプルな回転では一定の速度で回転する。

レンガは 45° 傾いた状態でテーブルから離れて、2フレームごとに約 30° 回転しながら落下する。



場合によっては、不安定でタンブリング（複雑な回転）が発生する。

均整のとれた形状に対して不規則な形状のオブジェクトの場合は左図のレンガのように短軸方向も長軸方向も回転していないのが一般的である。

タンブリング（複雑な回転）について簡単に説明する方法はない。

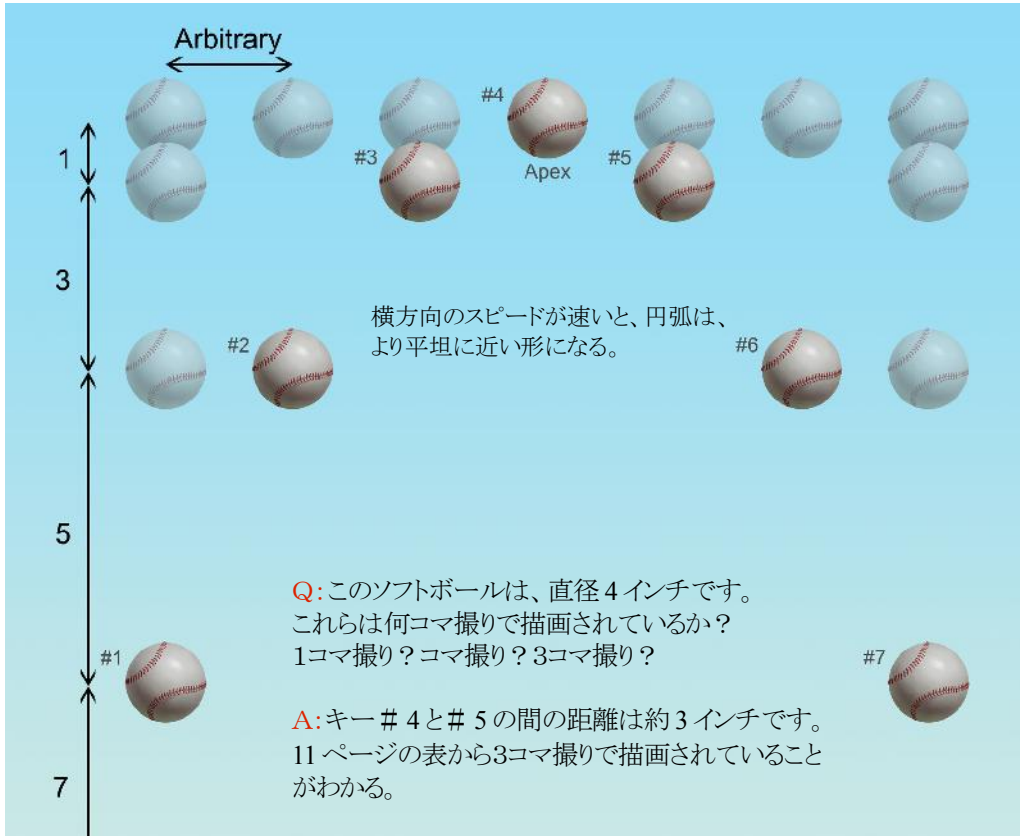
しかし、レンガの中心は同じ軌道である。

その他の放物線

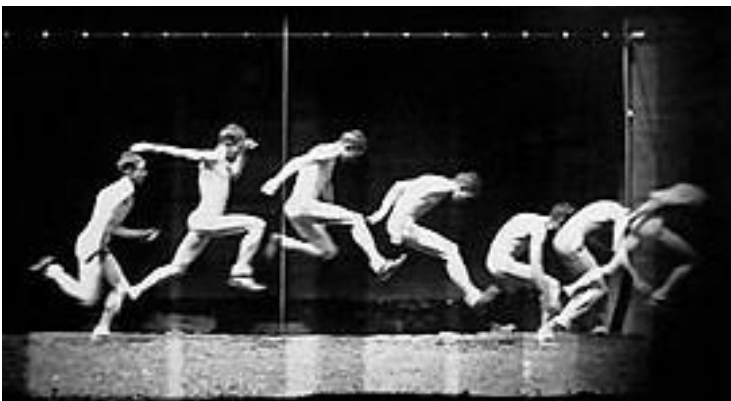
ボールは上に投げると真っ直ぐではなく軌道は放物線を描く。

放物線では横方向のスペーシング（間隔）は一定かつ均等である。

縦方向のスペーシング（間隔）は“Odd Rule”（チュートリアル「タイミングとスペーシング（間隔）の物理学」を参照）に沿った間隔となる。



飛んでいるキャラクターまたは空中に飛び出る水の軌道は放物線である。

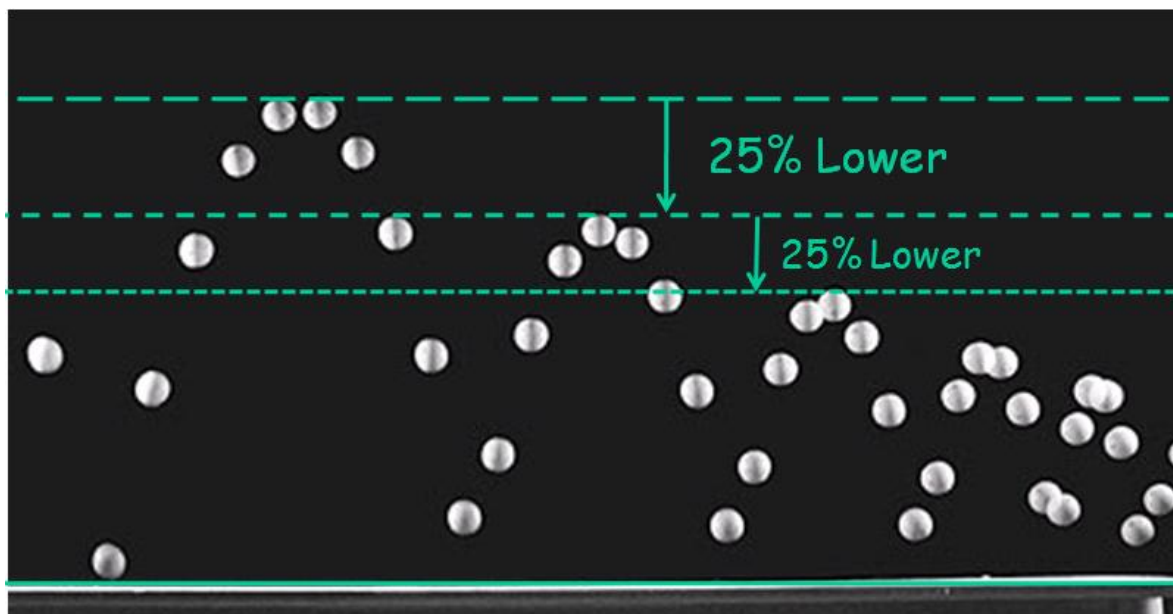


バウンス

跳ねるボールの軌道は、**apex**（頂点）を低くしながら連続する放物線となる。（地面との衝突によってエネルギーを失う。）

通常は、各バウンスの高さは同じ割合（下の写真で約25%）で低くなる。

跳ねるピンポン玉



Bouncing Object	Percent of height lost per bounce
Golf Ball	33%
Billiard Ball	40%
Hand Ball	50%
Tennis Ball	50%
Glass Marble	60%
Steel Ball Bearing	67%
Brick	95%
Clay Ball	100%

厳密に跳ねるアニメーションを作成する場合は、跳ねる物体と地面の両方の弾力性を考慮する必要がある。

例えば芝生の上で跳ねるゴルフボールはコンクリートで跳ねるよりも低くなる。

この表はコンクリートの床で跳ねた場合どのくらい低くなるかを示している。

通常、跳ねる物体は地面に衝突する度に跳ね返りが弱くなる。しかし、接地表面が上方方向に動いている場合は高くなることもある。

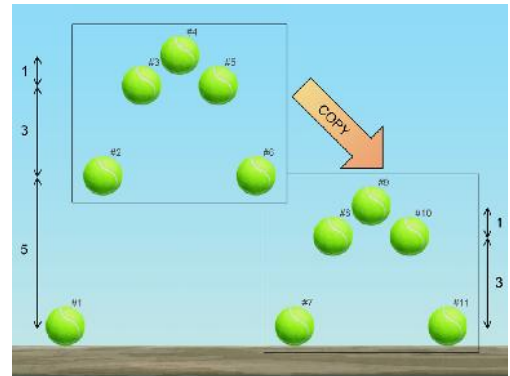
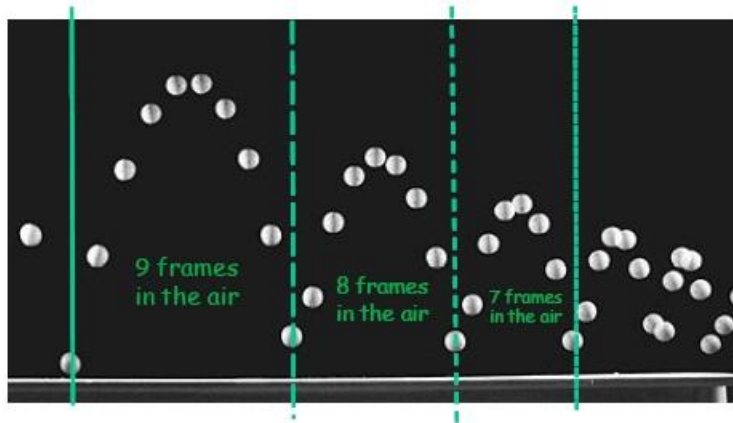
（ラケットを上下に動かしながらテニスボールを跳ねさせた場合など。）



連続するバウンス

それぞれの連続したバウンスは同じような放物線である。

通常、バウンスすることに水平方向への移動量が減少するため滞空時間も減少する。

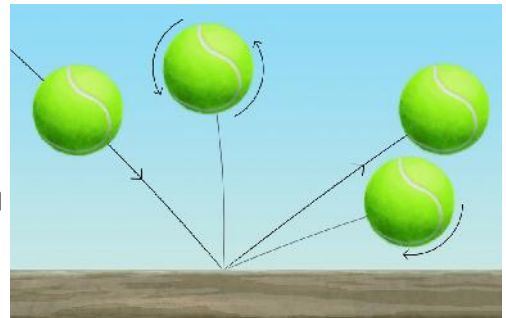


連続するバウンスは、一つ前のバウンスの上部をコピーすると簡単に作成できる。

連続したバウンスは、それぞれ角度が小さくなる。例えばボールが各バウンスで半分の高さになった場合入る角度は 45° で出る角度は 35° となる。

トップスピンのボールの場合、ボールはインパクトで横方向に加速するのでバウンスの角度が浅くなる。

トップスピンのボールの場合、速くて低いバウンスになる。



逆に、バックスピンのかかったボールは、インパクトで横方向への速度が遅くなる。十分なバックスピンによって、ボールを手元に戻すこともできる。

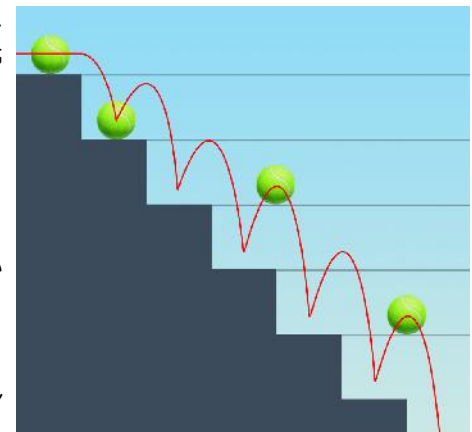
自分のスーパーボールで試してみよう。

階段の下方方向への連続するバウンスの例は興味深い。

いつものように、ボールはインパクトでエネルギーを失う、しかし、次の段で落下距離が増えるため加速する。

最初のバウンスか2回目のバウンス以降は各段でバウンスは同じ高さとなる。

例えば、右図のようにインパクトで高さが半分になっても前の段の高さまでバウンドする。



アクションパスとスケール

アクションパスとスペーシング（間隔）はスケールの影響は受けない。

通常、タイミングでスケールを明らかにできる。

これは6インチの石で4フィートの落下？

それとも、60インチの大きな岩で40フィートの落下？

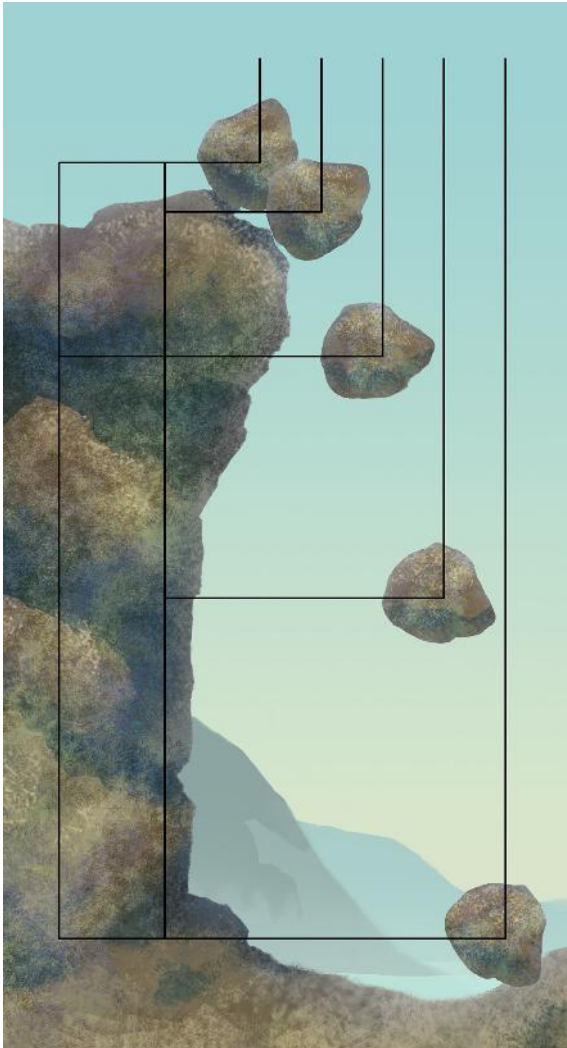
スペーシング（間隔）とアクションパスは2つのケースで同じです。しかし、タイミングは異なる。

大きな岩がおよそ38フレームで落下する一方、石は12フレームで落下する。

スケールモデルが映画の中で使用されている場合、タイミングをハイスピードカメラで補正することができる。

例えば、3倍速で撮影されている場合（毎秒72フレーム）

大きな岩が自然な速度のように再生される。

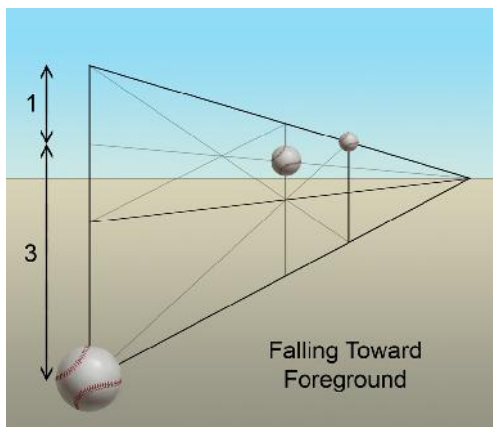


ゴジラの上半身を持つ本多猪四郎監督（1954）

様々な力が働く時、スケール調整は難しい。
例えば、飛散する空中の水滴のタイミングは重力の影響を受ける。しかし、滴のサイズは表面張力の影響を受ける。

遠近法の放物線

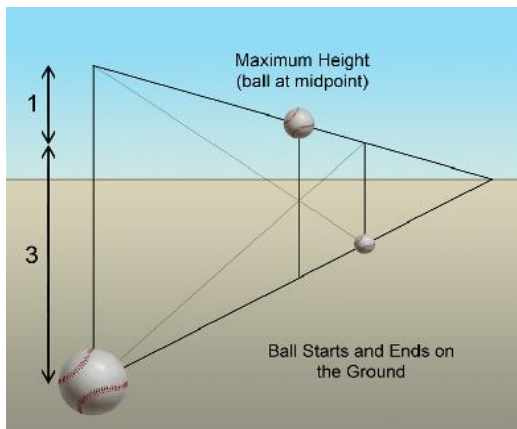
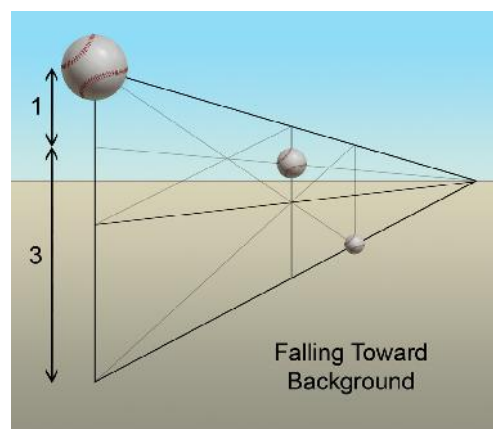
遠近法で水平移動するボールの放物線を描画するには、落下するボールと同様にポーズ・トゥ・ポーズを使うのが簡単である。



最も低い点とapex（頂点）の中間点を見つけるために“Physics of Timing and Spacing”のチュートリアルで説明した“Fourth Down at Half Time”を使用する。

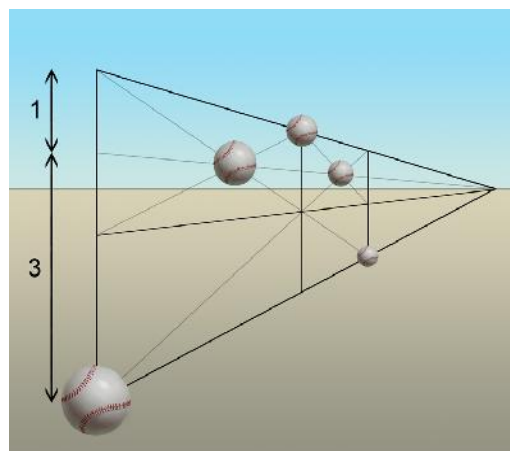
描画を追加するには
落下する物体の中割を見つける時と同じ原理を使う

apex(頂点)付近で最も移動量が少ないことを忘れないように。

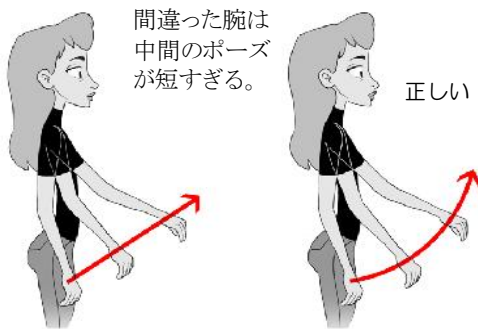


遠近法で上昇と落下の放物線を描画するには、平らな地面にスタートとエンドの点を選択する。消失点へ遠近法の線を引き最高点を決定する。

対角線が交差する点を放物線の頂点の位置とする。
apex（頂点）の両側の位置を特定するために
“Fourth Down at Half Time”のルールを使用する。



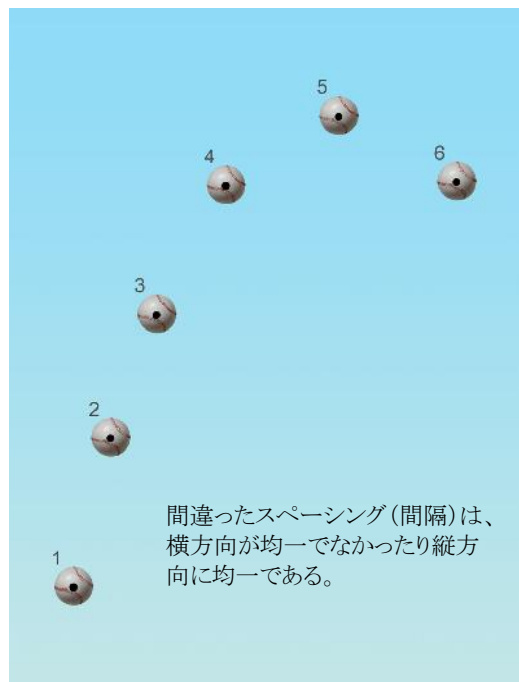
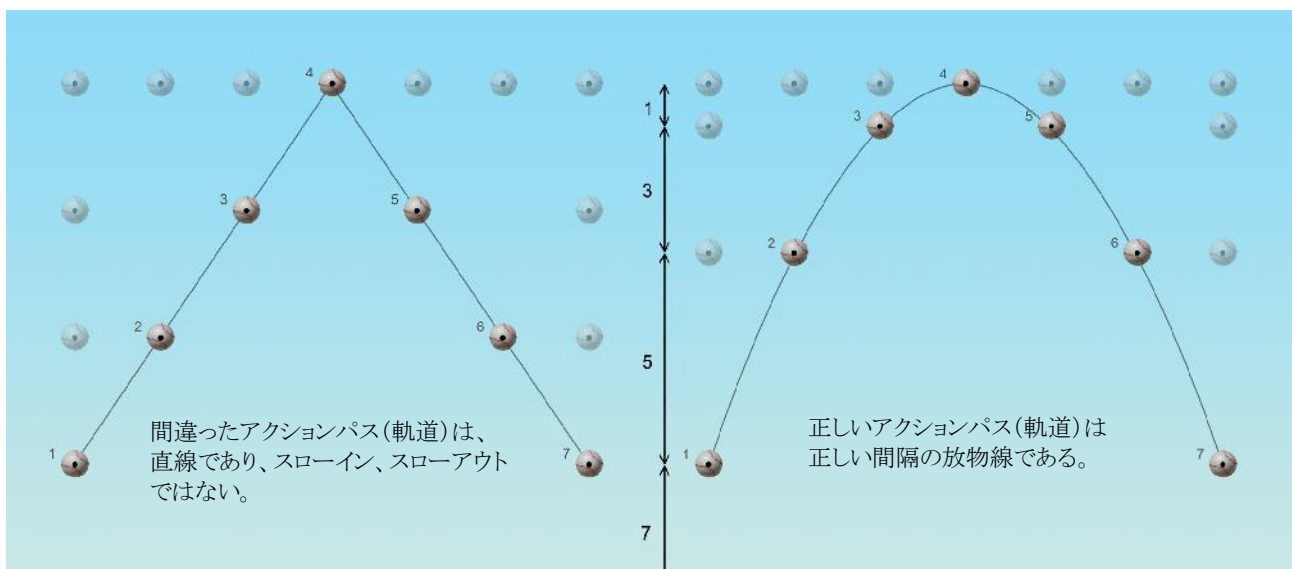
間違った弧



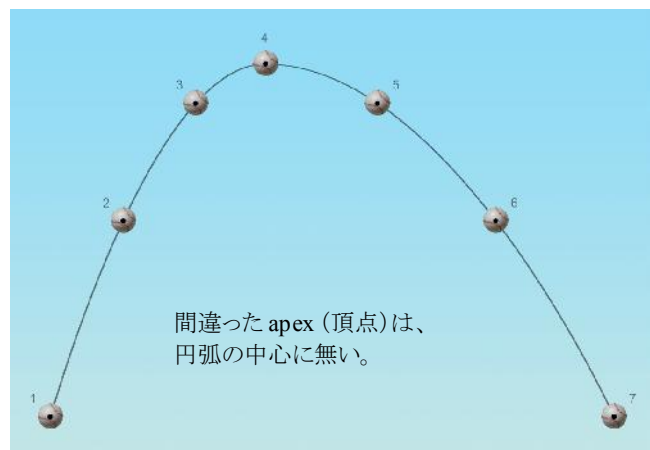
最も一般的な間違った弧の描画は円弧になっていないことだ。
間違ったアクションパス（軌道）は直線である。

関連するエラーは、タイミングやスペーシング（間隔）が均一過ぎる場合に発生する。

他のよくある間違いは、間違った円弧の形であったり、形は正しいが間違ったスペーシング（間隔）等である（すなわち、円弧上の間違った場所でキーを置くこと）。



いつでも物体には力が作用する。投げたボールには重力がかかりタイミング、スペーシング（間隔）、アクションパス（軌道）に影響を受ける。（その3つも相互に関連している。）



モーショングラフの基本

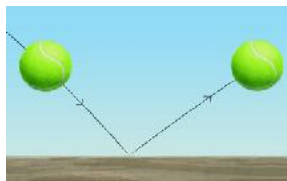
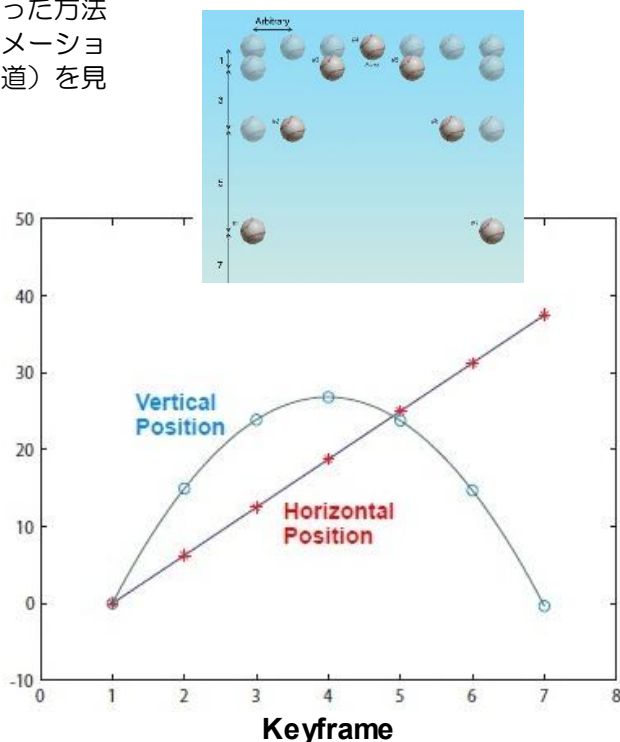
モーショングラフはアクションパス（軌道）と密接に関連している。タイミングとスペーシング（間隔）について違った方法で説明する。モーショングラフは、コンピュータアニメーションでは一般的であり、それぞれのアクションパス（軌道）を見る方法を知るのは良いことである。

投げたボールのアクションパス（軌道）の放物線は、横方向にコンスタントな動きと縦方向のスローインアウトの動きを組み合わせたものである。

横方向のスペーシング（間隔）は一定のままであるため、横方向のグラフは直線である。

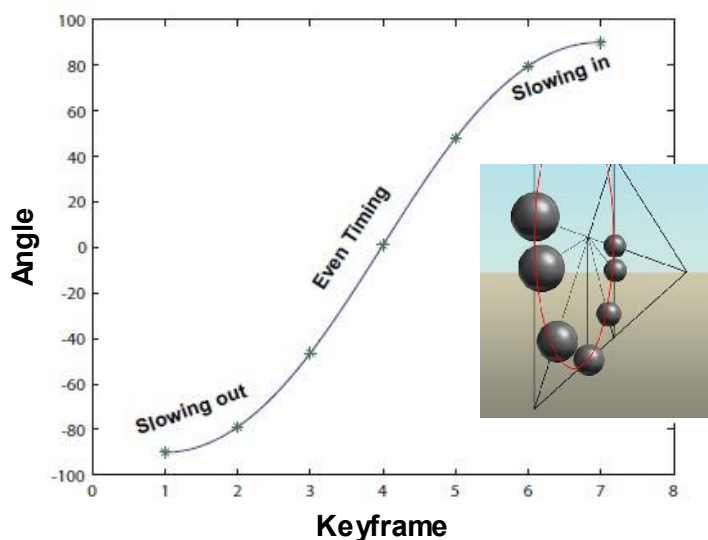
縦方向のモーショングラフはアクションパス（軌道）と同じような放物線である。

全てのケースで、物体が最速で移動している時のモーショングラフは急勾配になる。



Q: バウンドするボールの動きはどのようになるか？

A: ボールが回転していない場合は、横方向の速度は一定で、モーショングラフは直線になる。縦方向のモーショングラフは、アクションパス（軌道）と同じ形状でV字型である。



振り子の揺れのモーショングラフはS字カーブである。

振り子は、各apex（頂点）の出入りで遅くなる。厳密な放物線ではないが、それに近い曲線である。

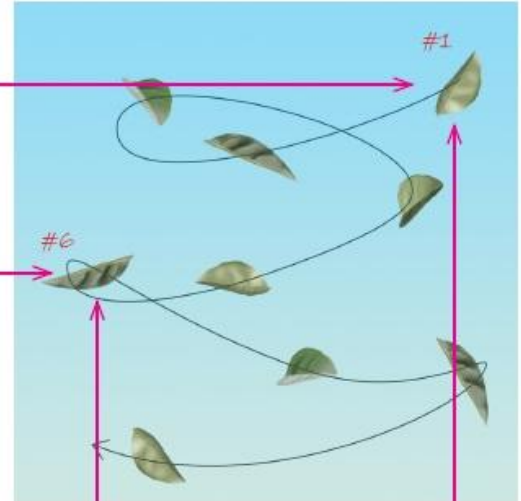
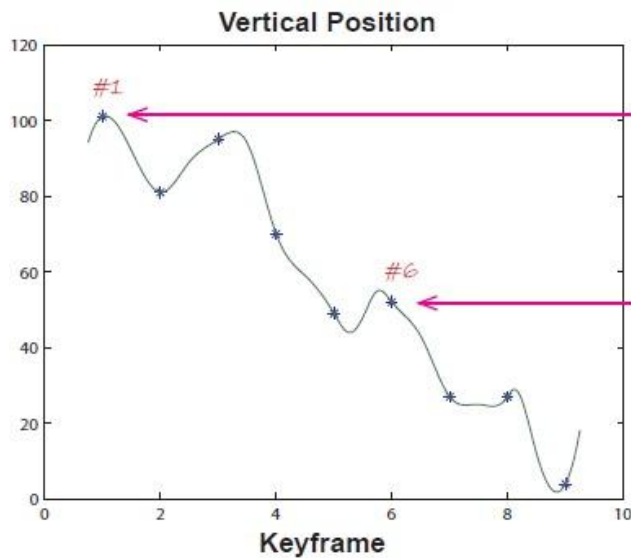
スイングの途中の振り子は最高速度で動いてモーショングラフでは急勾配となる。速度がほぼ一定であるため、グラフはほぼ直線である。

振り子は、行ったり来たりして揺れ続けている場合正弦波のようにS字カーブを繰り返す。

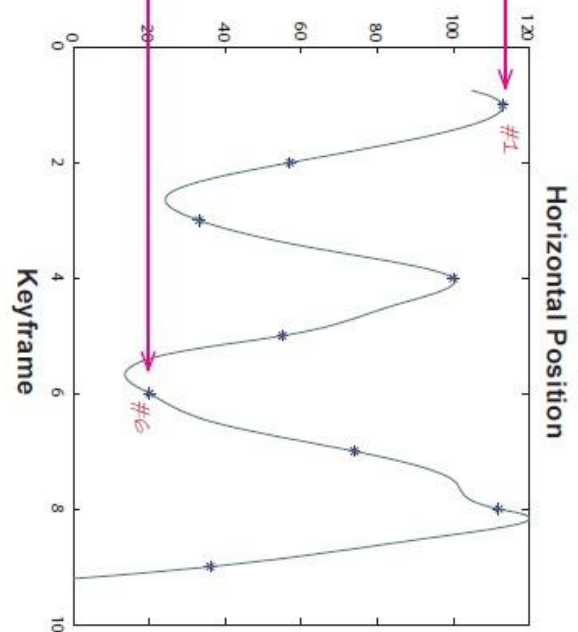
複雑なモーショングラフ

複雑なモーショングラフのアクションパスは。

不規則であり解釈は難しい。しかし、一つずつ分解して調べることで動きを理解できる。



葉はループしながら下降し、一時的に上昇もある。
縦方向のモーショングラフにピークがある度に、葉の動きは上
方から下方へ切り替わりになっている。
(そして、上方から下方へ動きが反転する度に谷になる。)



注意：時には、視点を変えてみることで見易くなる。

この横方向の繰返しの振幅は振り子の揺れに似ている。
アキシヨノパス(軌道)とは異なり、モーシヨナグラフのカーブは交差しないということに注意が必要である。
もし、そのようなことがあるとすれば同時に2箇所で物体がある場合だけである。(そして同じキープレーム)

アクションパスのスペーシングとタイミング

複雑なアクションパスとタイミングは、上記の原則を使って各要素の動きを予測するために、要素ごとに分解することで理解することができるであろう。

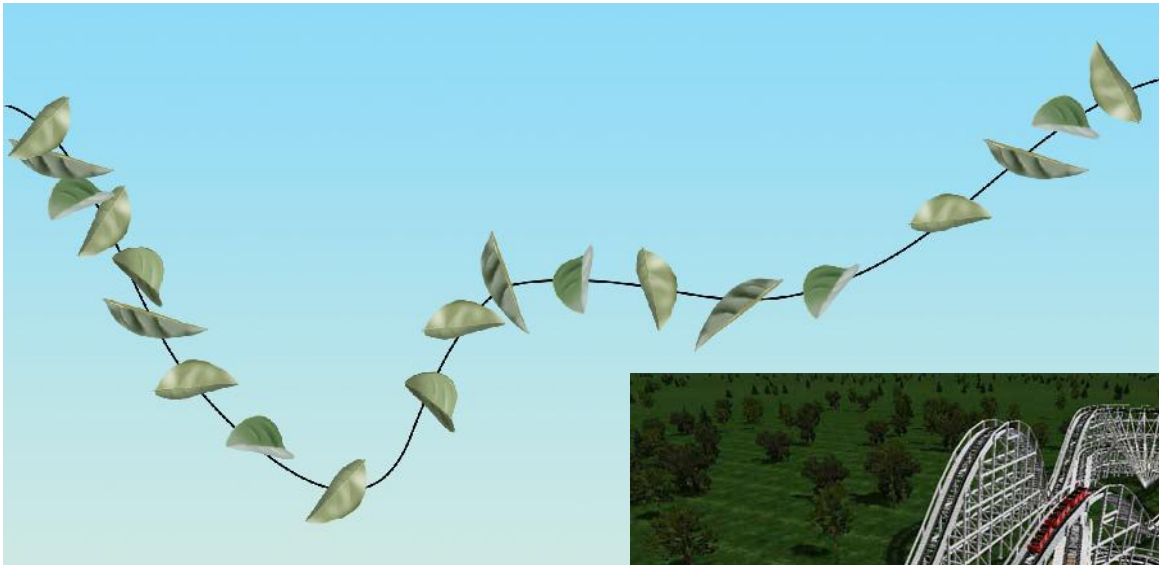
地面に舞う葉をつかむ。

パスが平らな箇所では、葉は、ほぼ一定のスピードで横に動く。

パスが急勾配で下がっているスロープの場合はスローアウトの動きで下がり、上向きのスロープの場合はスローインの動きで上がる。

丸みのある下向きのカーブのタイミングは振り子のようなものである。

一方、上向きのカーブでは、ほぼexponential のようにパスの頂上をゆっくり越える。



ジェットコースターは、あたかも葉の上に乗って移動するかのよう
な想像ができる。
タイミングとスペーシング (間隔) は、よりリアルに動きを感じること
ができるはずである。

風のような別の力が葉を押しやった場合の運
動は、これらのタイミングとスペーシング (間
隔) パターンにはならないだろう。

キャラクターデザイン



最初の2つのチュートリアルでは、バウンドするボールや落下するレンガのようにシンプルな物体のパスとスペーシング（間隔）、タイミングを考察してきた。

次のチュートリアルでは、物理学がキャラクターデザインにどのように役立つかがわかる。

特に信頼できるアクションポーズとバランスの作成について。



Image Credits

All illustrations not listed below are by Charlene Fleming and photos not listed are by the author

Bouncing Ball, pg. 3,
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Bouncing_ball_strobe_edit.jpg

Detective, pgs. 3, 21, Rebbaz Royee

Golf Swing, pg. 5, Harold Edgerton,
http://www.artsology.com/gfx/motion_in_art/edgerton_golf_swing.jpg

Skateboarder, pg. 7,
<http://web.mit.edu/newsoffice/2005/catch-air.jpg>

Whirlpool, pg. 9,
<http://www.spiralwinshingwells.com/guide/images/whirlpool2.jpg>

Tetherball, pg. 9, Draper Inc., <http://www.draperinc.com/images/GYM/Images/Tetherball.jpg>

Logarithmic Spiral, pg. 9,
http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Logarithmic_spiral.svg#file

Ripples, pg. 9, <http://www.free-background-wallpaper.com/images/Wallpapers1600/water/Enhanced-Ripples.jpg>

Rainbow Flag, pg. 9,
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/33/Flyingrainbowflag.JPG>

Sports Car, pg. 10,
<http://images.paultan.org/images/135testdrive/450/title.jpg>

Dr. Experiment, pg. 12, Rebbaz Royee

Chair, pg. 13 <http://www.flickr.com/photos/pedromourapinho/2441369249/in/set-72157604362514045/>

Man Jumping, pg. 14, Thomas Eakins,
http://www.pbs.org/eakins/img_1882.htm

Water Fountain, pg. 14,
<http://bovitz.com/photo/traditional/jpgphotos/2006/2006-10Toronto/Bird-water-fountain.jpg>

Bouncing Ball, pgs. 15, 16, Prof. A. Davidhazy, RIT, <http://people.rit.edu/andph/photofile-b/strobe-bouncingball-3607-1.jpg>

Tennis Racket, pg. 15,
http://web.mit.edu/3.082/www/team1_f02/pictures/tennis-ball-rebound-1a.jpg

Ishiro Honda, pg. 17,
http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Inoshiro_Honda_and_Godzillazilla.jpg

Water Splash, pg. 17,
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Water_splash.jpg

Roller Coaster, pg. 22, <http://www.negative-g.com/NoLimits/No%20Limits%20Defunct%20Coasters.htm>

Leaf Blower, pg. 22, <http://www.re-nest.com/uimages/re-nest/4-17-2008leafblower.jpg>

Special thanks to Alice Carter, David Chai, John Clapp, Courtney Granner, Lizz Greer, Rex Grignon, Martin McNamara, and the Shrunkenheadman Club at San Jose State.

Physics of Animation is a project supported, in part, by the National Science Foundation