

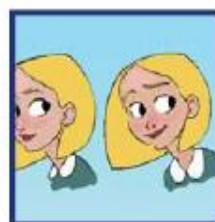
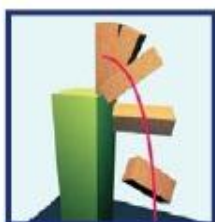
私達は、この世に頭から生まれて、足から去る。それは、全てバランスの問題である。

Paul Boese

バランスと体重移動の物理学

このチュートリアルでは、キャラクターのリアルなポーズ作成に役立つバランスの基本的原則について解説をする。

体重移動がダイナミックアクションポーズやポーズに対して、どのように影響するかを確認することもできる。



キャラクターデザイン

バランスのとれたキャラクターポーズを作ることは、デザインプロセスの重要な段階である。倒れそうなキャラクターのステージングは望まないだろう。（それが前提になってない限り）

では、キャラクターのポーズはバランスをどうすれば良いか知ってるだろうか？

これらの様々なポーズについて考えてみよう。
どれがバランスがあって、どれがないか？
違いを説明することができるか？
キャラクターの重心は正しくポーズに反映されているか？



バランスの原則を理解する事は、キャラクターのポーズやオブジェクトのバランスを保つために必要となるので、ビジュアルディベロップメントと同様に重要である。



バランスの原則は、移動しているキャラクターにも適用される。
一貫性のある動きの場合、内側か外側のどちらかに傾けることでバランスを保つことができる。

バランスが取れることと左右対称は同じではない。

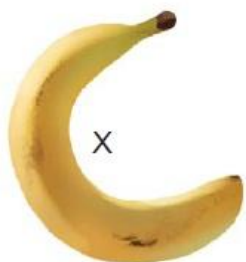
重心



物体の重量配分の平均位置は、重心（CG）と呼ばれる。ボールやレンガのように単純な物体の重心は、その形状の中心に位置している。



物体の重量配分が偏っている場合、大部分の重量が位置している近くに重心がある。例えば、ハンマーはハンマーヘッドと柄のつなぎ目付近に重心がある。



重心は、中が空気のボールの中心のような空間上のポイントにも位置付けることができる。

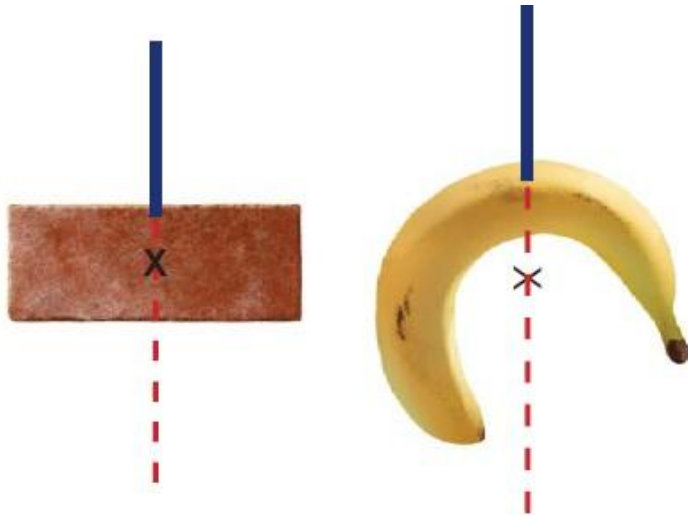
ドーナツや曲がったバナナは、完全に物体の外に重心を置くことができる。



注：地球上で重力が一定の場合、重心と質量の中心（物体の中心の位置）とは同じである。

吊るして重心を調べる

物体の重心を探す方法の一つに吊るす方法がある。
吊るした物体の重心は、吊るす点の真下になる。



ハンマーの重心は、ハンマーヘッドに近い柄の内部に位置しています。

一点から吊るしただけでは、重心が吊るした下のどこにあるか見つけるのに十分ではない。
しかし、第2の点から物体を吊るすと三角測量によって重心を見つけることができる。

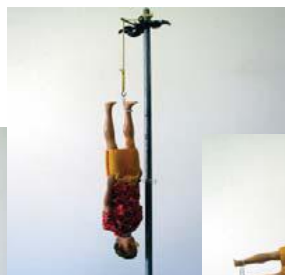


これらの写真では、様々なアクションポーズと様々な吊るし方で人形を見せている。
重心の位置は、腕や足の向きによってどのように左右されるか気をつけてみよう。



このU字型のポーズの重心は骨盤の高さで体の外にある。

腕を上げると重心は体内の高い位置になる。



人形の頭は空洞なので人間と比べて少し低い位置に重心がある。

支点で重心を調べる



Q: 指でドーナツのバランスを取る簡単な方法は何か？

A: ドーナツの穴の中心に指をいれ、ドーナツの中心に指を置く。

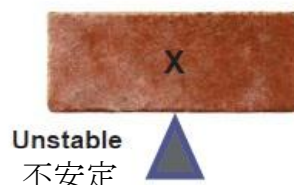
もう一つの物体の重心を見つける方法は支点である。重心が支点の真上もしくは真下にある場合、物体は支点上でバランスが保てるだろう。

重心が支点より上にある場合、バランスは不安定になり、少し傾けるだけでも支点から落ちて倒れる。

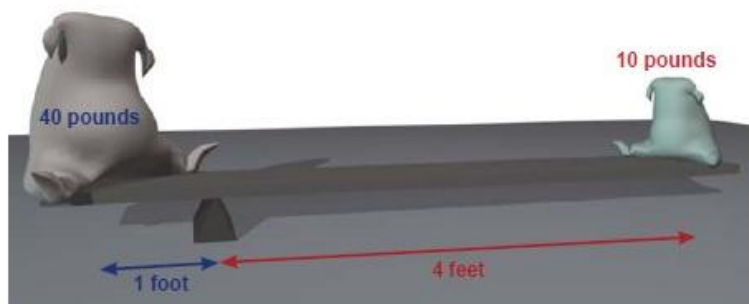
重心が支点より下にある場合は、バランスが安定しており、少し傾けると物体が少し揺れるだけである。



上の鳥のおもちゃは口ばしの先端で安定性を保っている。
口ばしの下に重心がくるように羽の先端の重さを調整している。



下の写真のハンマーのように、重心は、最も重い部分の近くにある。

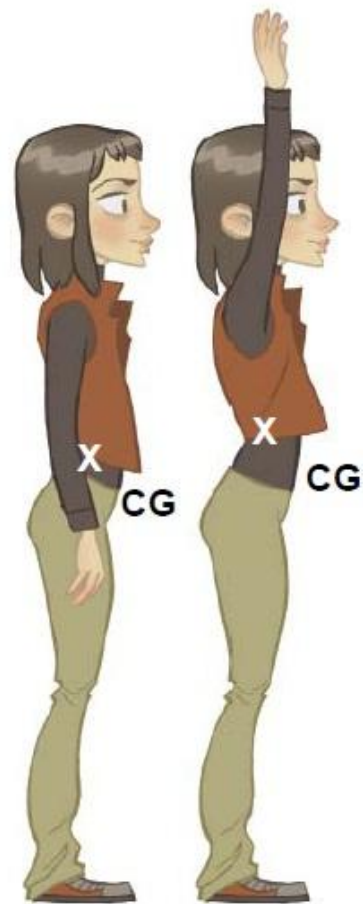
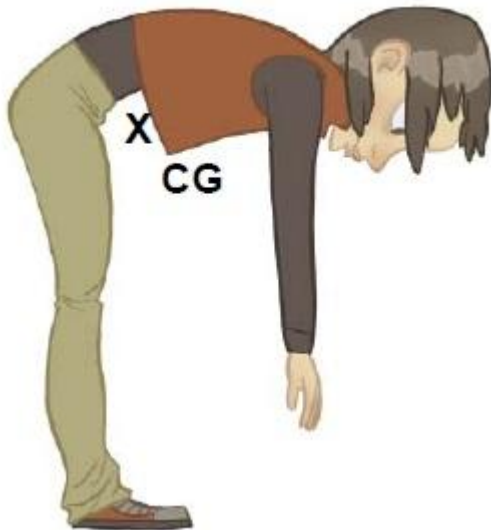


支点で支えて重心位置を確かめる方法は、天秤と同じ原理に基づいている。テコの秤では、両側の重さが同じときバランスがとれる。

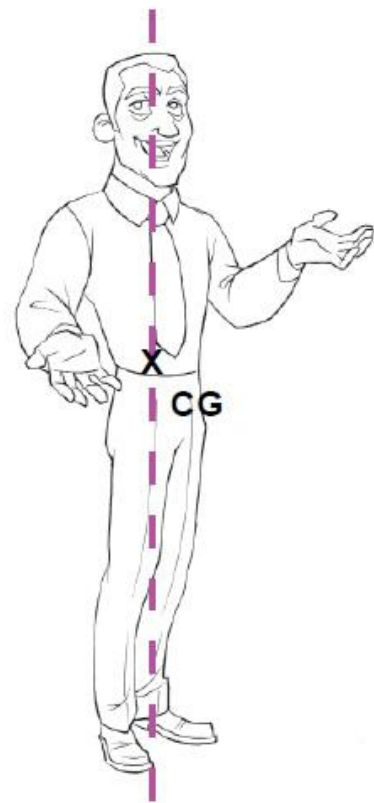
人の重心

直立の場合、成人の重心はへその高さくらいで胴体の中央に位置している。（全体の55%くらいの高さ）
キャラクターの重心の正確な場所はポーズによってシフトする。
例えば、腕を上げた場合、このキャラクターの重心は、数センチ上昇する。

逆U字で腰を曲げた状態の時のように、重心を身体の外側に置くことができる。



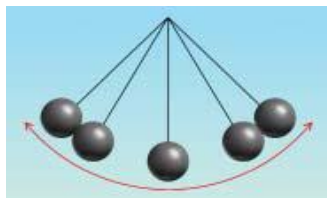
重力線は物体の重心から上下に伸びる架空の垂直線である。
人が直立しているとき、重力線はのどを通過する垂直線とみなすことができる。



注: 重力線はアクションラインと同じではない。
アクションラインはポーズの視覚的な曲線である。
(チュートリアル「アクションパスの物理学」を参照)



転倒と落下

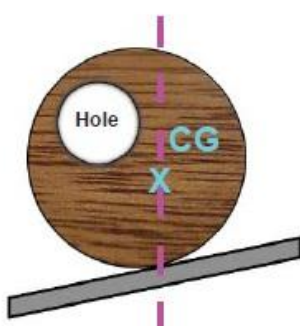
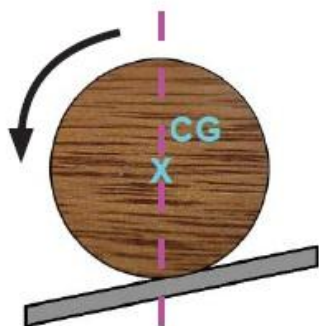
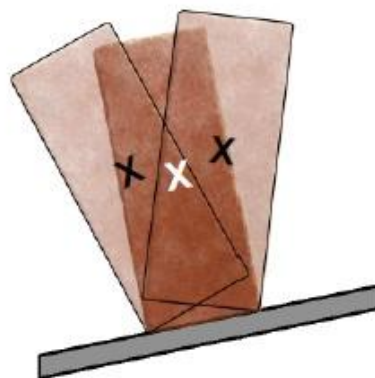


バランスを理解する方法の一つは、妨げるものが何もない場合、静止した物体の重心が低い位置で安定する性質を利用する。
最も簡単な例では、ボールの落下である。

ターザンは蔓で高い木の枝から下方へ移動する。動きはフォロースルー（慣性）により、最も低い点を過ぎて動き続けるが、揺れ続けるなら、最終的には最も低い点で止まる。（吊るされた真下のポイント）

一般的に物体の重心は低い位置で安定する。この原則はバランスの予測に役立つ。

右図の傾斜上にあるレンガが揺れている場合は、重心を持ち上げるので安定するだろう。



左の車輪は下り坂で重心が低い方へ移動するため転がる。
一方、穴が空き軸のズレた車輪は、重心を持ち上げることになるため転がらない。



Q：私のお気に入りのデモの一つ、これらの写真にはヒンジ付きの板にハンマーがセットされている。左の写真は正常に見えるが、右の写真はどうか？真っ直ぐな状態のヒンジ付きの板に注目。
（しかも、板の上に置かれた小さな重りを支えている。）
A：重心はハンマーヘッドの近くにある。
左図は、板が下がった状態で、重心は最も低いところにある。
右図は、板が上がった状態で、重心は最も低いところにある。
この場合、下向きに曲がる板なので重心によって板が持ち上げられる。



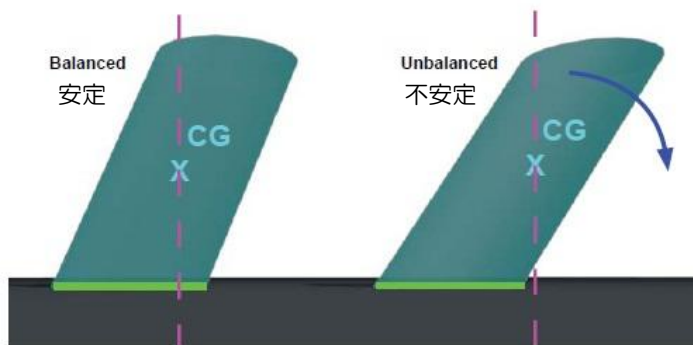
Base of Support基底面

重心がbase of support(基底面)の上にある場合、物体のバランスは保たれている。

下の2つの円柱の場合は、左の円柱は土台の上に重心があり、下方向への重力と上部を支えるbase of support(基底面)の力が噛み合っている。



右の円柱はbase of support (基底面) 上に重心がないため、重心を支えられず、その代わりに、回転の力が働いて転倒する。



重心線はバランスを判断するのに役立つ。ラインがbase of support (基底面) を通過する場合は物体のバランスがとれている。

重心線がbase of support (基底面) の外側を通っている場合は物体が転倒するだろう。

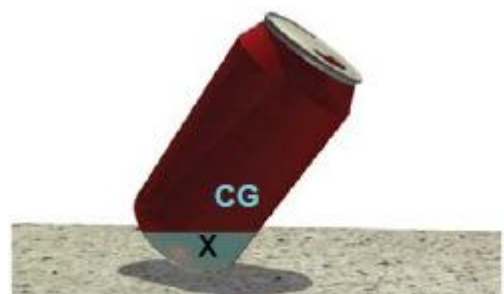


これらの傾いた円柱のbase of support (基底面) は、床に接触しているエリアである。

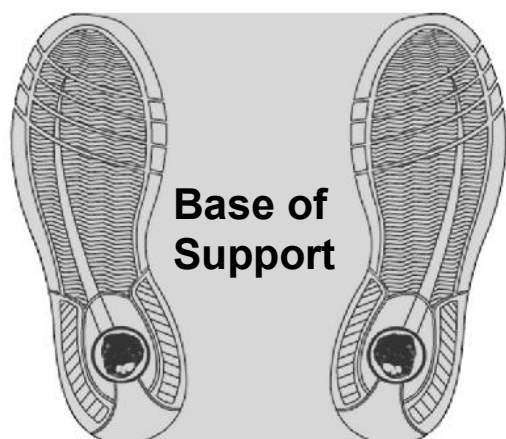


このワインボトルホルダーの重心はbase of support (基底面) の真上にあるので安定している。

空の缶に少量の水を注ぎ角で立たせることができる。

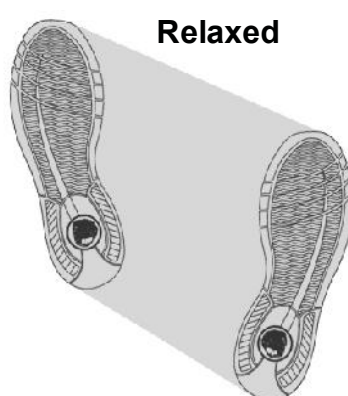


人間の Base of Support (基底面)

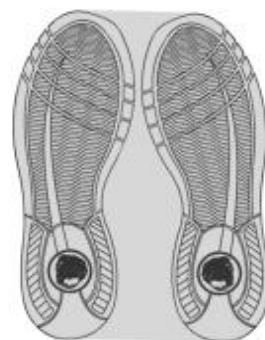


直立した時の base of support (基底面) は、足の下（靴の底）を含む、両足の間の領域である。
大雑把に、この領域は、両足のつま先からつま先へカカトからカカトまでカバーされる。

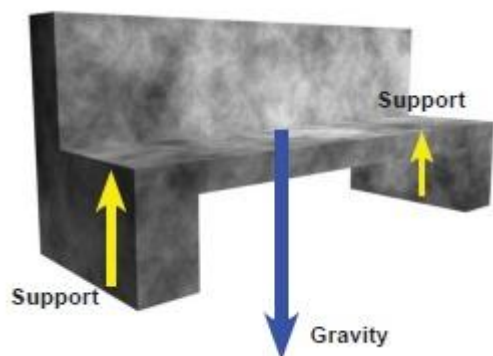
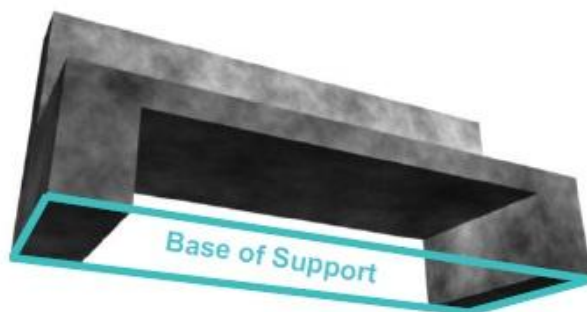
base of support (基底面) が大きい場合は、重心を置きやすくバランスが安定している。



Feet Together



物体が地面と接する複数の接点（例えば2つ脚）がある場合、接点と接点で囲まれた領域が base of support (基底面) となる。



ベンチの2つの脚で重力（重量）を支えてバランスをとることができる。

バランスの取れたキャラクターのポーズ

バランスのとれたポーズかどうかを判断するには、キャラクターの重心の見当をつける。重力線（重心から伸びる縦線）が**base of support**（基底面）を通過する場合はキャラクターのバランスがとれている。

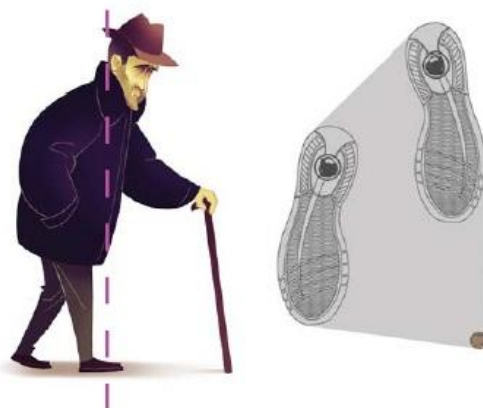
右の2体のキャラクターは上半身が重く、重心が胸の中心にある。（さらに、大きな腕も少し前に出ている）

base of support（基底面）は、足裏を含む、つま先とつま先、カカトからカカトまでを結ぶ領域である。

左側のポーズはバランスがとれているが、右側のポーズはアンバランスである。



右の老人は前方に傾いているが、杖を含む3点の**base of support**（基底面）なのでバランスのとれたポーズである。



前かがみでサングラスを拾う、このキャラクターは、脚の上に重心を置くために、無意識に後方に下半身を移動している。

この動きを理解するために以下のことを試しよう。踵を壁に着けて立ち、前かがみで、床のモノを拾ってみる。おそらく、半分以上曲げることができずに転倒するだろう。



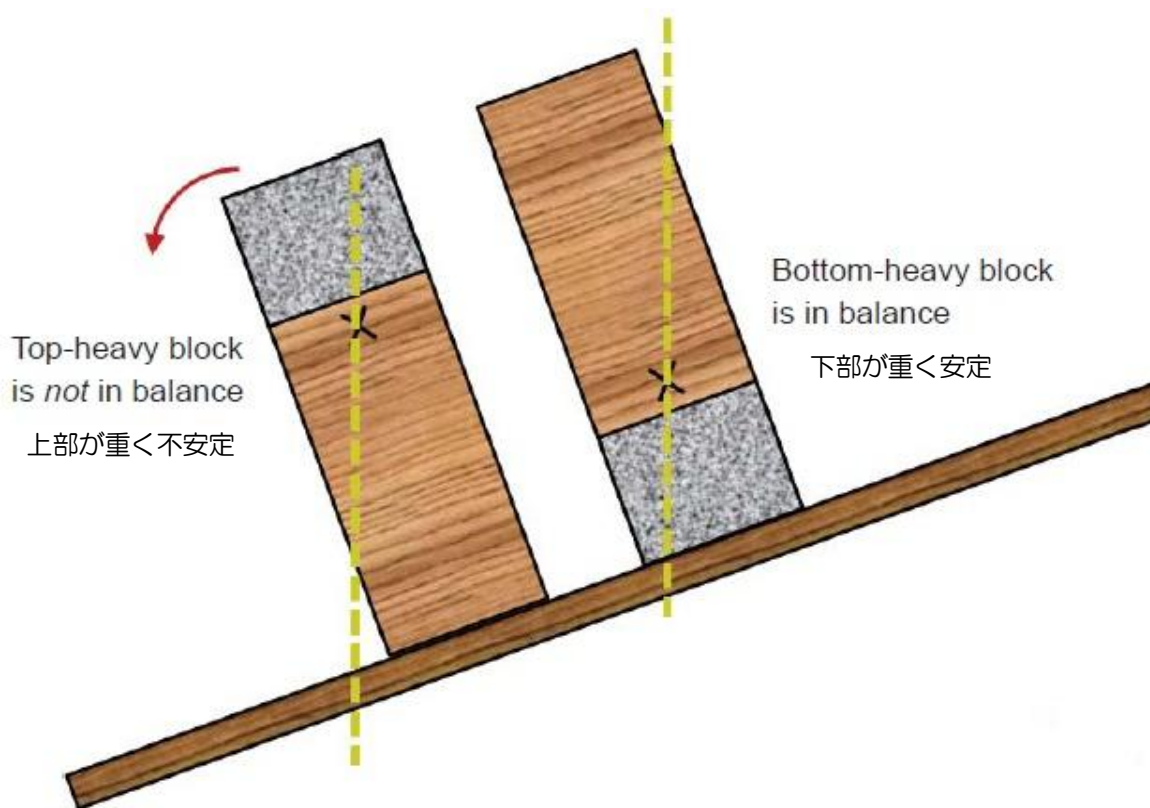
バランスと高さ

重心の高い物体はバランスが崩れやすい。

斜面に2つの類似した物体がある。

左の物体は、重心が上部にあり、傾きの角度により重心線がbase of support（基底面）の上から外れているので、倒れる。

もう一つの物体は下部が重く、重心がbase of support（基底面）の上にあるので安定している。



このキャラクターは、一番安定した状態にするため両足を広く離し、できるだけ大きなbase of support（基底面）を作っている。

左右に傾いたとき、重心が移動しないように、重心を落とし安定させている。



バランスを保つ



base of support（基底面）が小さい場合、バランスを保つのが困難である。このような場合、無意識に重心の位置を調整している。

例えば、平均台を歩くような移動はbase of support（基底面）が狭く、バランスをとるのが困難である。

腕を広げると、左右のバランスをとりやすくbase of support（基底面）の上に重心を移動しやすくなる。



バレリーナは、つま先に重心を載せる必要がある。これは、とても小さいbase of support（基底面）である。腕を動かすことで、素早く重心移動ができる。（同様に頭、胴体、後ろ脚など）



両足で立っているとき、素早く片足をあげてみよう。base of support（基底面）の上に重心がこないので、バランスを失うだろう。

片足でバランスをとるために、片足に重心をシフトする必要がある。

バランスを崩して、横に転倒しないように、片側に下半身をずらして、上半身を逆側に少しずらす傾向があることに気付くだろう。

体重移動 (Weight Shift)

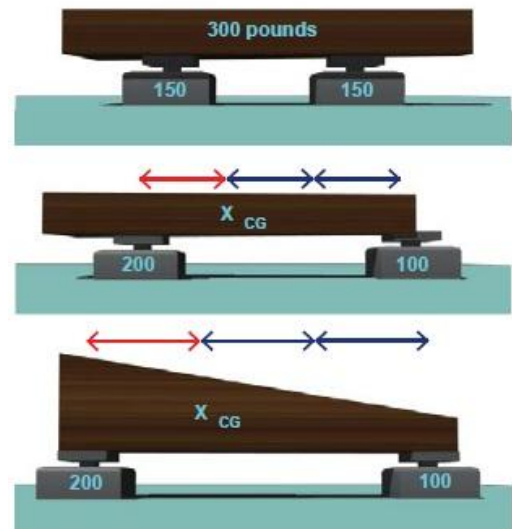
片方に重さが掛かるように配置されている場合に体重移動 (Weight Shift) が発生する。

体重移動 (Weight Shift) は、キャラクターのポーズに影響を与えるので重要である。

重心が物体の中心にある場合、それぞれの支えには同じ重量がかかる。

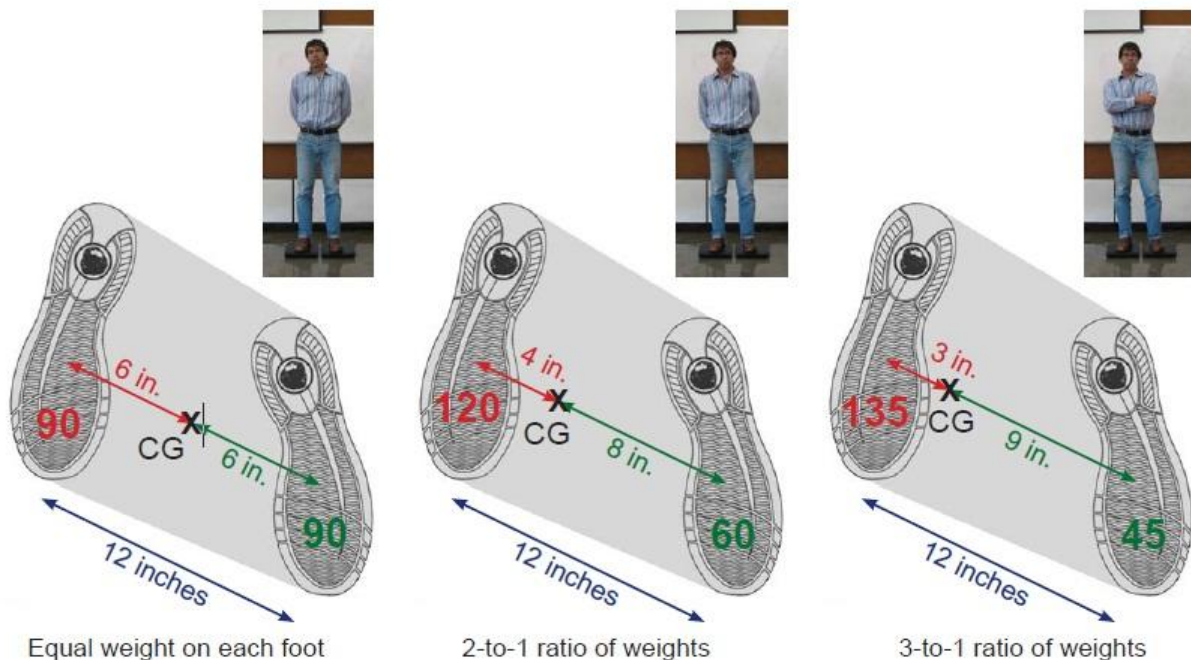
しかし、片方の支えが重心に近い場合、距離に比例してより重い重量を支えている。

同様に、重心が片方の支えに近い場合、重心に近い支えは、距離に比例してより重い重量がかかる。

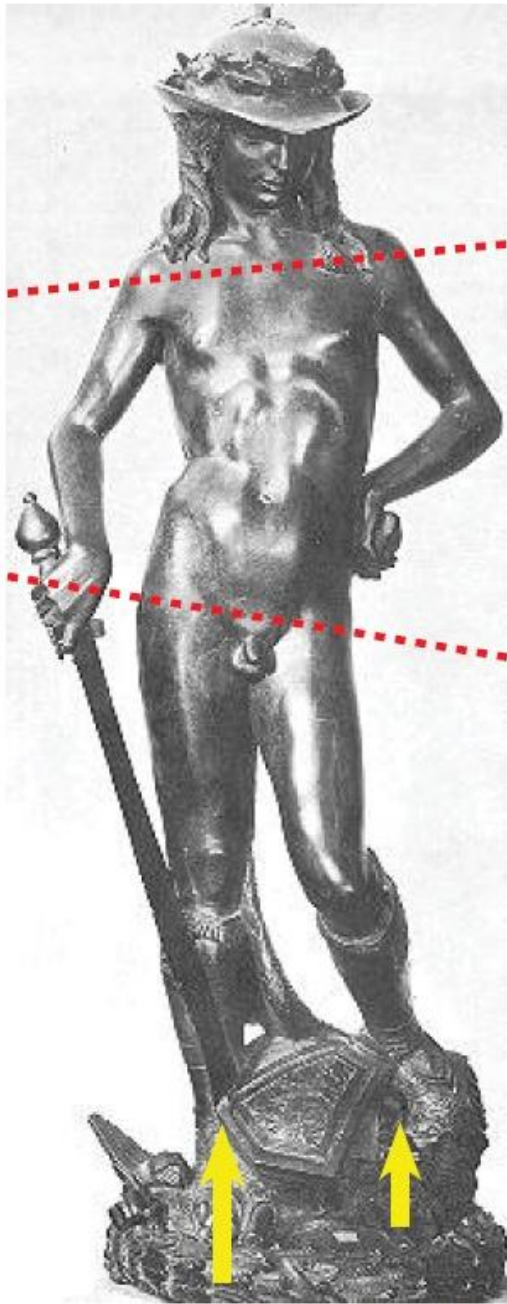


180ポンドの人が、重心を両足に均等にかかるように立った場合、それぞれの足に90ポンドの重量がかかる。

しかし、片側に重心を移動させることで片足に重さ加わる。重心の小さなシフトが、大幅な重量移動を引き起こす。



Contrapposto(コントラポスト)



Donatello's David (circa 1440s)

コントラポスト (contrapposto) とは、肩と腰を傾けて体重の大部分を片脚にかけて立っている人を説明するのに使われる用語である。

グレン・ビルップ (Glenn Vilppu) は「単純に片足に体重移動すると、通常、補正するために胴体をシフトして、無意識に胴体の曲線を作り、首と頭についても逆側に補正する傾向がある。」と書いている。

コントラポストの導入は紀元前4世紀まで遡り、古代ギリシャ彫刻家ポリュクレイトス (Polykleitos) は名声を得た。



片足立ちのポーズは、極端なコントラポストの例である。

立ちvs座り

キャラクターの自然なポーズは体重移動の違いにより、立っているか、座っているかで異なる。

右の写真のように、上半身だけ見えている場合でもコントラポストのポーズであることは明らかである。

キャラクターの上半身だけ描く場合でも、体重移動によってポーズがどう変化するか全身を意識する。



同様にミディアムショットで上半身だけのアニメーションを付ける場合でも、全身を意識して付ける必要がある。



このキャラクターは、違和感のないポーズに見えるよう、マンガっぽさをアピールしつつ高度に様式化されている。

持ち上げと運び

持ち上げられた物体の重量だけでなく、実際に持ち上げているかのようにキャラクターの力強さや重量感をアニメートすることが必要である。

ビーチボールを持ち上げる



最初の例では、ビーチボールなどの軽く感じる物体である。

このキャラクターは、ビーチボールを体から離して、腕だけで持っているポーズによって軽さを表現している。

ボールが非常に重い場合、ボールを加えた重心はつま先より前に配置される。その場合、彼女がどんなに力持ちでも前に倒れるだろう。

（イメージしてみよう。彼女が中身の詰まったボールを持つ像だとしたら？）

右の水のボトルを持ち上げている絵は、水のボトルが重いことを伝えている。キャラクターは腕を伸ばさず、脚を使って持ち上げている。

彼女の身体能力に関係なく、base of support（基底面）の上に重心（ボトルも含めた）を置くため、ボトルを身体に近づける必要がある。また、同じ理由により逆方向に傾く。

水の入ったボトルを持ち上げる



左のハイカーのポーズは、彼のパックが軽いことを示唆している。

右のポーズは、base of support（基底面）の上に重心を置くために前傾し、パックが重いことを示している。



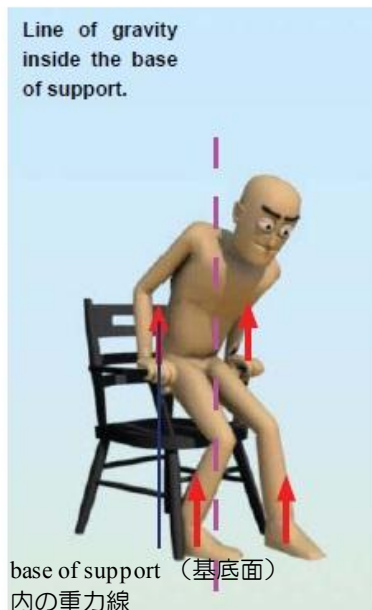
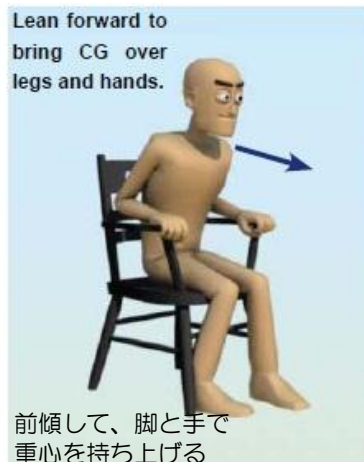
注: パックの重量は、キャラクターのバックパックを消したポーズを見ると明らかである。



椅子から立ち上がり

base of support（基底面）は、座っている状態から立つ時、ポーズに影響を与える。徐々に立ち上がる場合、常にキャラクターのバランスを維持するためにbase of support（基底面）に重心を残す必要がある。

手を使えばbase of support（基底面）が広がるので、腕を使って立つ方が簡単である。



キャラクターが素早く立ち上がった場合、バランスを崩す可能性がある。上に投げたボールが頂点付近で遅くなるように、立ちあがるときも遅くなる。

投げとジャンプ

重心は、投げた物体やキャラクターのジャンプのリアルなアニメーション作成に役立つ。



投げられたハンマーの動きは複雑に見える。それは、重心を見分けていないからである。

ハンマーは、一定の回転速度で重心を中心に回転しながら、放物線弧の軌道をたどる。
("Physics of Paths of Action" 「アクションパスの物理学」のチュートリアルを参照)



できるだけ高くジャンプしようとするときに、腕を振る方法に注意してみよう。しゃがむことにより、より大きな力で地面を押し返し、腕を持ち上げて重心を上げ、上昇する。

ハードルを飛び越える場合、空中で自然に腕を下げる。それは、身体の下に重心を移動するために胴体を持ち上げるためである。



走り高跳びの背面跳びの選手は重心を骨盤の下に下げることで、バーをクリアする。



ダイナミックバランス



キャラクターが静止している状態でバランスが崩れているように見えるポーズでも、動いている状態ではバランスが維持される場合がある。

左のランナーは、横への傾斜と前への動きの組み合わせによりコーナーを回っている。

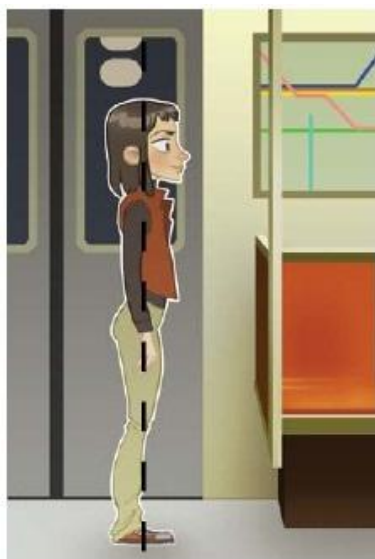
下の写真で動いている時のバランスを見てみよう。



自転車が動いている時にバランスをとることが容易なことに気づいているだろうか？

それは、車輪の回転がジャイロ스코ープのような役割をするからである。ゆっくりした動きは転倒の原因になる。

「人生は自転車に乗るようなものだ。バランス保つために動き続けなければならない。」 アルバートアインシュタイン



左側のキャラクターは、停車中の電車内で立っている。

右側のキャラクターは、電車が前方に加速しているので傾いた状態で立っている。

水平加速によって重力ラインの傾斜角度が決まる。

例えば、加速はその重力の半分（ $1/2GEE$ ）のとき、重力ラインの角度は27度である。

電車が加速している間、重力ラインは傾斜する。等速で走行している場合、重力ラインは垂直に戻る。



"ロールオーバー"バランスの欠如

急旋回の重力線は、求心加速度によりカーブの内側に向かって傾斜する。
シャープなカーブ（すなわち、より小さい半径）や、大きな加速度は、重力線の傾きを増加させる。

同様に、より高速でのターンは、大きく傾く。

重力線がbase of support（基底面）の範囲外にある場合、バランスが失われ、外へ向かってころがる。



ロールオーバーによるバランスの喪失は、急な斜面に駐車した場合の転倒に似ている。
(11 ページを参照)

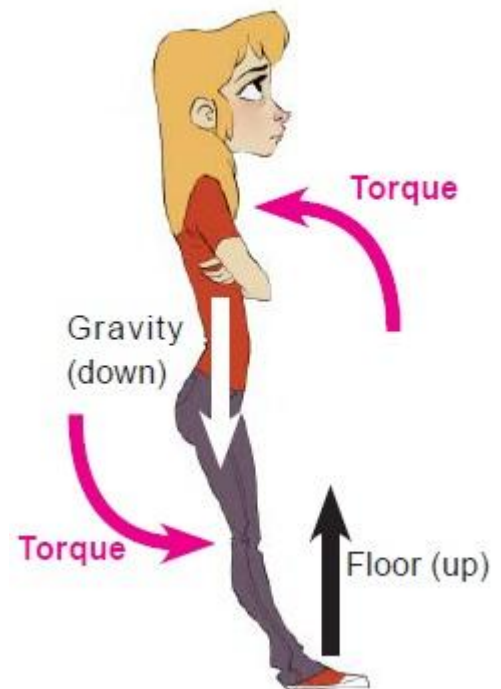


内側に傾くランナー

水平方向の支える力

水平方向に押したり引いたりして、バランスを保つことがある。その力は反トルクである。

右のキャラクターのポーズは、明らかにバランスが崩れている。
上向きと下向の力がズれているのでトルクが生じてキャラクターは後方へ背中から倒れる。



同じポーズでキャラクターが壁にもたれかかった場合は、横方向に支える力によって回転が阻止されるのでバランスを保てる。
バランスを保つために、反トルクを生成する2つの横方向の力がある。

- * 壁は、右に向かってキャラクターを押す。
- * 地面の摩擦力は、左に向かって押す。

キャラクターのポーズに影響を与える、これらの力について考えることは重要である。

(例えば、摩擦力に対し足で押して滑り止めのような脚の角度である。)



このキャラクターのポーズは、誰かが背中を前方に押そうとしている場合と同じである。

アクション作成

アニメーションのためにバランスは重要であるが、動きはさらに重要である。

しかし、何が違和感のないアクションをもたらすのか？どのようにリアルなアニメーションを作成するのか？

それが、次のチュートリアル「アクション作成の物理学」のテーマである。

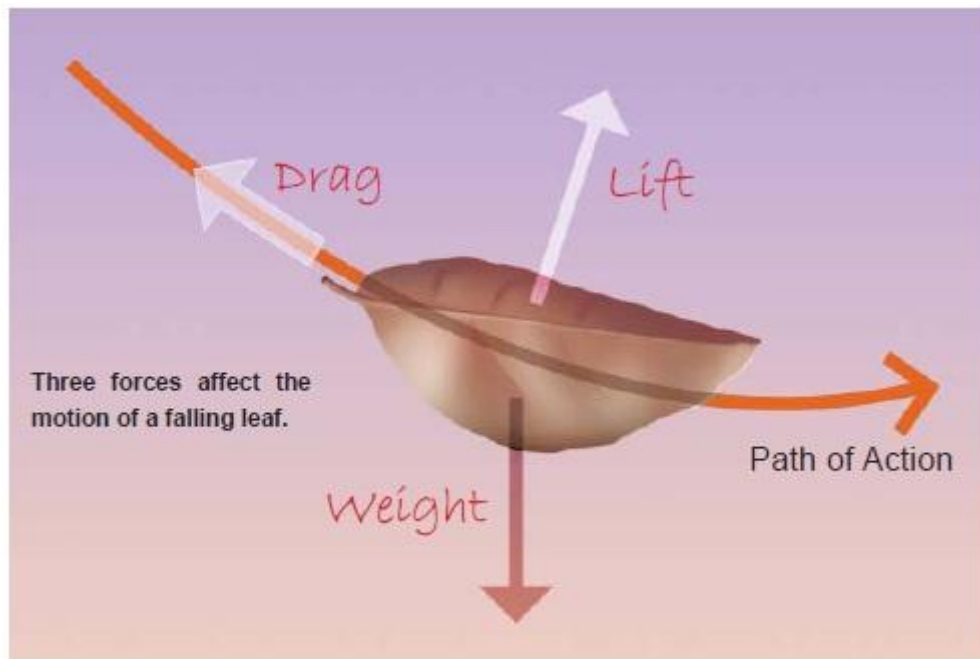


Image Credits

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

Man-Bat, pg. 2, Cameron Chun.

Spaceman, pg. 2, Andrea Rhodes.

Stack of rocks, pg. 2, Corey Tom.

Hammer, pg. 3, Corey Tom.

Detective, pg. 3, Rebbaz Royee.

Flour Sack See-Saw, pg. 5, Corey Tom.

Soda Can, pg. 8, Corey Tom.

Bench, pg. 9, Corey Tom.

Shoe Prints, pg. 9-12, Corey Tom.

Woman in Swimsuit, pg. 10, Katie Corna.

Martial Artist, pg. 11, Lam Nguyen.

Balance on a Beam, pg. 12, Amy Seaver

Circus Ballerina, pg. 12, Lam Nguyen.

Weights on Scales, pg. 13, Corey Tom.

David (Donatello & Michelangelo), pg. 14-15, Wikimedia.

Two Women, pg. 15, Katie Corna.

Hiker, pg. 16, Rebbaz Royee.

Rising from a Chair, pg. 17, Corey Tom.

Thrown Mallet, pg. 18, Corey Tom.

Jumping Man, pg. 18, Eadweard Muybridge.

High Jump, pg. 18, Carl Blake, Flickr.

Bicycle Turning, pg. 19, Ethan Lofton, Flickr.

Skateboarder, pg. 19, Mike Baird, Flickr.

Roll-over Jeep, pg. 20, Stephanie Lew.

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

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