

# Stormworks 弾道学

## Stormworks Ballistics

ストームワークス・バリスティクス

第二版

Alouette  
Discord: le\_alouette

2024 年 12 月 17 日

## 目次

1	はじめに	1
2	抵抗を受けない放物運動	1
2.1	理論	1
2.2	演習	2
3	空気による抵抗を受ける放物運動	5
3.1	理論	5
3.2	数値解を求める	7
3.3	Lua での実装	7
4	偏差射撃	9
4.1	理論	9
4.2	数値解を求める	9
5	付録	10
5.1	各銃砲の諸元	10
5.2	各銃砲の射表	10

## 1 はじめに

このドキュメントは、Stormworks において、空気や風による抵抗を受けながら飛翔する砲弾の運動方程式について理解し、与えられた座標を命中するために必要な角度を求める弾道計算機を設計することを目的としています。理論を求めるうえで微積分や線形代数など高校/大学数学を用いることが多いですが、計算の結果については筆者が示しているので、「そのような計算を行い理論を求めることができる」程度に留めてもらって構いません。

## 2 抵抗を受けない放物運動

2 章では、抵抗を受けない放物運動について解説する。高校の力学で学習する初歩的な内容であるから、これについて知見のあるものは理論の部分は読み飛ばしてもらって構わないが、演習には目を通していただ

きたい。

## 2.1 理論

初速  $v_0$  の物体を迎え角  $\theta$  で投射したとき、物体は図 1 の破線で示されるような放物線を描き飛翔する。このとき、初速  $v_0$  の  $x$ ,  $y$  成分  $v_{0x}$ ,  $v_{0y}$  はそれぞれ  $v_0 \cos \theta$ ,  $v_0 \sin \theta$  と表せる。この運動は抵抗こそないものの、 $y$  成分は重力により負方向に「引っ張られ」続ける。このように、速度を「引っ張る」成分を**加速度**と呼ぶ。ここで、この加速度、より具体的には**重力加速度**  $g$  により速度の  $y$  成分は時間によって変化するため、時間を表す変数  $t$  を用いた時間関数

$$v_y(t) = v_0 \sin \theta - gt \quad (1)$$

と表すことができる。速度の  $x$  成分も併記すると、

$$\begin{cases} v_x(t) = v_0 \cos \theta \\ v_y(t) = v_0 \sin \theta - gt \end{cases} \quad (2)$$

となる。変位 (時間経過後の位置変化) もまた自明に時間によって変化し、その値は速度に時間をかけたものではない！一般に「み/は/じ」や「は/じ/き」等と習う公式は、物体が**等速直線運動**をしている場合にのみ有効である。変位  $x(t)$  についてはそれで問題ないのだが、 $y(t)$  については**等加速度運動**をしているためこの公式を用いることはできない。ではどう変位を求めるかというと、式 (1) を時間積分することで求められ、

$$y(t) = \int_0^t (v_0 \sin \theta - gt) dt = v_0 t \sin \theta - \frac{gt^2}{2} \quad (3)$$

となる。変位の  $x$  成分も併記すると、

$$\begin{cases} x(t) = v_0 t \cos \theta \\ y(t) = v_0 t \sin \theta - \frac{gt^2}{2} \end{cases} \quad (4)$$

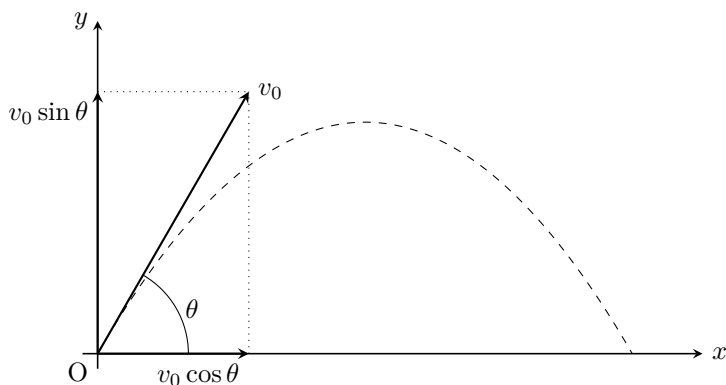


図 1: 抵抗を受けない放物運動

## 2.2 演習

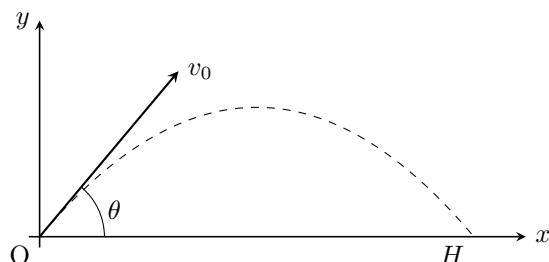
以上で抵抗を受けない放物運動を数式として表すことができた。では少し問題を解いてみよう。

問 1

以下の図のように、重力加速度  $g$  のもと原点  $O$  から初速  $v_0$ 、迎え角  $\theta$  で斜方投射を行い、一定時間が経過したのち点  $H(a, 0)$  に命中した。ただし、 $a > 0$  であって、空気抵抗は考慮しない。

(1) 経過した時間を求めよ。

(2) 物体の最高到達点を求めよ。ただし、①  $a$  によらない点 ②  $a$  による点 の 2 つを求めよ。



解 1

(1) 点  $H$  に到達した時間を  $T$  とすると、変位  $x(t)$  より、

$$\begin{aligned} x(T) &= a \\ v_0 T \cos \theta &= a \\ T &= \frac{a}{v_0 \cos \theta} \end{aligned}$$

(2) ①  $y(t)$  の極大値を求めるため、 $v_y(t)$  が 0 となる点を用いて、

$$\begin{aligned} v_y(t) &= 0 \\ v_0 \sin \theta - gt &= 0 \\ gt &= v_0 \sin \theta \\ t &= \frac{v_0 \sin \theta}{g} \end{aligned}$$

たる  $t$  を変位  $y(t)$  に代入し、

$$\begin{aligned} y\left(\frac{v_0 \sin \theta}{g}\right) &= v_0 \frac{v_0 \sin \theta}{g} \sin \theta - \frac{g\left(\frac{v_0 \sin \theta}{g}\right)^2}{2} \\ &= \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{g} - \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} \\ &= \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} \end{aligned}$$

②  $T$  を用いると、最高到達点に達するのはこの時間の半分であって、

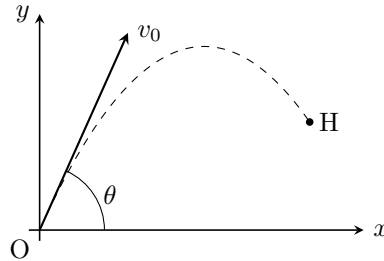
$$\begin{aligned} y\left(\frac{T}{2}\right) &= v_0 \frac{T}{2} \sin \theta - \frac{g\left(\frac{T}{2}\right)^2}{2} \\ &= v_0 \frac{a}{2v_0 \cos \theta} \sin \theta - \frac{g\left(\frac{a}{2v_0 \cos \theta}\right)^2}{2} \\ &= \frac{a \sin \theta}{2 \cos \theta} - \frac{ga^2}{8(v_0 \cos \theta)^2} \\ &= \frac{a}{2} \left( \tan \theta - \frac{ga}{4(v_0 \cos \theta)^2} \right) \end{aligned}$$

よって、経過した時間は  $\frac{a}{v_0 \cos \theta}$ 、最高到達点は①  $\frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g}$  ないし②  $\frac{a}{2} \left( \tan \theta - \frac{ga}{4(v_0 \cos \theta)^2} \right)$  である。

問 2

以下の図のように、ある点  $H(a, b)$  が与えられていて、重力加速度  $g$  のもと原点  $O$  から初速  $v_0$ 、迎え角  $\theta$  で斜方投射を行う。ただし、 $a \geq 0$ 、 $b \geq 0$  であって、空気抵抗は考慮しない。

- (1)  $y$  を  $x$  について表した関数  $y(x)$  を求めよ。
- (2) 初速  $v_0$  の物体を投射して点  $H$  を命中するための迎え角  $\theta$  を求めよ。ただし、 $0 < \theta \leq \frac{\pi}{2}$  とする。
- (3)  $v_0 = 20$ 、 $g = 10$  とする。点  $(30, 5)$  は命中可能か？
- (4) 初速  $v_0$  の物体が命中できる  $H$  の範囲 (到達可能範囲) を図示せよ。



解 2

(1)  $x(t) = v_0 t \cos \theta$  より、 $t(x) = \frac{x}{v_0 \cos \theta}$  であるから、

$$\begin{aligned} y(x) &= y(t(x)) = v_0 \left( \frac{x}{v_0 \cos \theta} \right) \sin \theta - \frac{g \left( \frac{x}{v_0 \cos \theta} \right)^2}{2} \\ &= x \tan \theta - \frac{gx^2}{2(v_0 \cos \theta)^2} \end{aligned}$$

ここで、 $\frac{1}{\cos^2 \theta} = 1 + \tan^2 \theta$  より、

$$\begin{aligned} y(x) &= x \tan \theta - \frac{gx^2}{2v_0^2} (1 + \tan^2 \theta) \\ &= -\frac{g}{2v_0^2} (1 + \tan^2 \theta) x^2 + x \tan \theta \end{aligned}$$

(2) (1) より、

$$-\frac{ga^2}{2v_0^2} (1 + \tan^2 \theta) + a \tan \theta = b$$

$k = \frac{ga^2}{2v_0^2}$ 、 $u = \tan \theta$  とおくと、

$$\begin{aligned} -k(1 + u^2) + au &= b \\ -ku^2 + au - (k + b) &= 0 \end{aligned}$$

二次方程式の解より、

$$\begin{aligned} u &= -\frac{-a \mp \sqrt{a^2 - 4k(k+b)}}{2k} \\ &= \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4k(k+b)}}{2k} \\ \iff \tan \theta &= \frac{a \pm \sqrt{a^2 - \frac{ga^2}{v_0^2} \left( \frac{ga^2}{v_0^2} + 2b \right)}}{2 \frac{ga^2}{2v_0^2}} \\ &= \frac{1}{ga} \left( v_0^2 \pm \sqrt{v_0^4 - g(ga^2 + 2bv_0^2)} \right) \\ \iff \theta &= \arctan \left( \frac{1}{ga} \left( v_0^2 \pm \sqrt{v_0^4 - g(ga^2 + 2bv_0^2)} \right) \right) \end{aligned}$$

(3)

**証明** (2) より, 根号について注目すると,  $v_0^4 - g(ga^2 + 2bv_0^2) < 0$  となる時虚数となり実数解を持たない (=到達不可能). 与えられた条件をもとにこの評価式に代入すると,

$$\begin{aligned} 20^4 - 10(10 \cdot 30^2 + 2 \cdot 5 \cdot 20^2) &= 160000 - 10(9000 + 4000) \\ &= 160000 - 130000 \\ &= 30000 \end{aligned}$$

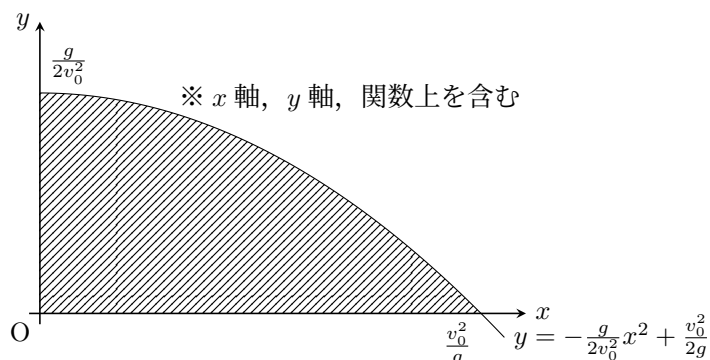
となるため, 命中可能である.

□

(4) (3) の評価式が 0 以上なら到達可能であるので,

$$\begin{aligned} v_0^4 - g(gx^2 + 2yv_0^2) &\geq 0 \\ v_0^4 - g^2x^2 - 2ygv_0^2 &\geq 0 \\ -2ygv_0^2 &\geq g^2x^2 - v_0^4 \\ y &\leq -\frac{g}{2v_0^2}x^2 + \frac{v_0^2}{2g} \end{aligned}$$

が満たす範囲のうち, 条件より  $x \geq 0, y \geq 0$  もともに満たす必要があるから, 関数  $-\frac{g}{2v_0^2}x^2 + \frac{v_0^2}{2g}$  と  $x$  軸,  $y$  軸に囲まれた部分が到達可能範囲である. これを図示すると以下ようになる.



### 3 空気による抵抗を受ける放物運動

2 章では抵抗を受けない放物運動について解説した. 3 章では, 空気抵抗を受ける放物運動について解説する. ここからは高校の力学で学習する範囲ではないが, 高校程度の数学を用いて解説する. ただし, ここの空気抵抗は Stormworks でのものであって, 現実のそれに用いられるものではない (現実の空気抵抗を適用した運動方程式を用いるわけではない) 点には留意されたい.

#### 3.1 理論

初速  $v_0$  の物体を迎え角  $\theta$  で投射したとき, 空気抵抗を受ける物体は図 2 の破線で示されるような放物線を描き飛翔する. 空気抵抗を受けない場合と比べて, 右側が潰れているような軌跡となる. 速度について初速自体は変わらないが, Stormworks においては tick ごとに速度に比例した抵抗を受ける. ここで, 空気抵抗係数  $c$  を用いると,

$$\begin{cases} v_x[t+1] = (1-c) \cdot v_x[t] \\ v_y[t+1] = (1-c) \cdot v_y[t] - g \end{cases} \quad (5)$$

たる数列で表すことができる．ここで数列を用いているのは，Stormworks においては速度の時間変化が離散的<sup>1</sup>だからである．値が連続的に変化するアナログとは異なり，コンピュータでのシミュレーションのようなデジタルなシステムは連続な値ではなく離散的な値を用いる．(5) の漸化式からそれぞれの初期値  $v_x[0] = v_0 \cos \theta$ ,  $v_y[0] = v_0 \sin \theta$  を用いて一般項を求めると，

$$\begin{cases} v_x[t] = (1-c)^t \cdot v_0 \cos \theta \\ v_y[t] = (1-c)^t \cdot (v_0 \sin \theta + \frac{g}{c}) - \frac{g}{c} \end{cases} \quad (6)$$

また，このような離散的な値を積分した値は変位としては正確ではない．かわりに**数列の和**を用いて変位を求めると，

$$\begin{aligned} \sum_{t=0}^{t-1} ((1-c)^t \cdot v_0 \cos \theta) &= \frac{(1 - (1-c)^t) v_0 \cos \theta}{c} \\ \sum_{t=0}^{t-1} ((1-c)^t \cdot (v_0 \sin \theta + \frac{g}{c}) - \frac{g}{c}) &= \frac{1}{c} ((1 - (1-c)^t) (v_0 \sin \theta + \frac{g}{c}) - gt) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x[t] = \frac{1}{c} ((1 - (1-c)^t) v_0 \cos \theta) \\ y[t] = \frac{1}{c} ((1 - (1-c)^t) (v_0 \sin \theta + \frac{g}{c}) - gt) \end{cases} \quad (8)$$

抵抗を受けない場合は  $t$  を  $x(t)$  で表し，それを  $y(t)$  に代入する (合成関数とする) ことで  $y(x)$  とし，必要な迎え角を求めた．空気抵抗を受ける場合でも同様に試してみよう．式 (8) より，

$$\begin{aligned} \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t] &= 1 - (1-c)^t \\ (1-c)^t &= 1 - \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t] \end{aligned} \quad (9)$$

ここで両辺の対数を取ると，

$$\begin{aligned} \ln(1-c)^t &= \ln\left(1 - \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t]\right) \\ t \ln(1-c) &= \ln\left(1 - \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t]\right) \\ t &= \frac{\ln\left(1 - \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t]\right)}{\ln(1-c)} \end{aligned} \quad (10)$$

したがって，

$$y(x) = \frac{1}{c} \left( (1 - (1-c)^{\frac{\ln\left(1 - \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t]\right)}{\ln(1-c)}}) (v_0 \sin \theta + \frac{g}{c}) - g \frac{\ln\left(1 - \frac{c}{v_0 \cos \theta} x[t]\right)}{\ln(1-c)} \right) \quad (11)$$

となって，これを  $\theta$  について解けばよさそうだが，指数項と線形項を含むため解析的に解くことができない．実際，これを数式処理ソフトウェア Maxima を用いて  $\theta$  について解いてみると，図 3 のような結果を得るが， $\theta$  に関する式 =  $\theta$  に関する式となってしまう， $\theta$  を他の文字を用いて表現することができていない．しかし，運動のモデルは既知であるので，コンピュータを用いることで  $\theta$  に漸近<sup>2</sup>した解を近似的に求めることができ，このような解を**数値解**と呼ぶ．

1 とびとびの値．

2 徐々に近づくこと．しかし，有限時間のもとでは到達することはない．

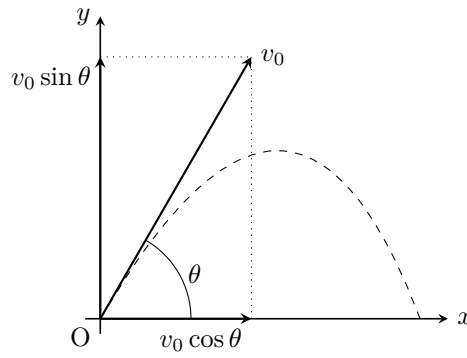


図 2: 空気抵抗を受ける放物運動

(%i1)  $1/c \cdot ((1 - (1-c)^{((\log(1 - (c/(v_0 \cdot \cos(\theta))) \cdot x[i])) / \log(1-c)))} \cdot (v_0 \cdot \sin(\theta) + g/c) - g \cdot (\log(1 - (c/(v_0 \cdot \cos(\theta))) \cdot x[i])) / \log(1-c))$

(%o1) 
$$\frac{\left( \frac{\log\left(1 - \frac{c x_i}{\cos(\theta) v_0}\right)}{\log(1-c)} \right) \left( \sin(\theta) v_0 + \frac{g}{c} \right) - \frac{g \log\left(1 - \frac{c x_i}{\cos(\theta) v_0}\right)}{\log(1-c)} \right)}{c}$$

(%i2) solve(%o1=y, theta);

(%o2) 
$$\left[ \log\left(\frac{\cos(\theta) v_0 - c x_i}{\cos(\theta) v_0}\right) = - \frac{\log(1-c) \left( c^2 y + \left( \frac{\log\left(\frac{\cos(\theta) v_0 - c x_i}{\cos(\theta) v_0}\right)}{\log(1-c)} - 1 \right) g \right) + \log(1-c) \sin(\theta) \left( \frac{\log\left(\frac{\cos(\theta) v_0 - c x_i}{\cos(\theta) v_0}\right)}{\log(1-c)} - 1 \right) c v_0}{c g} \right]$$

図 3: 解析結果

### 3.2 数値解を求める

数値解を求めるアルゴリズムは実に様々であるが、今回はもっとも単純で安易なオイラー法を用いる。複数次のルンゲ-クッタ法などと比較すると精度の低いアルゴリズムだが、実装が容易であるし、今回の弾道計算機においては精度は十分である。ここでは、以下のようなアルゴリズムを用いる。

弾道計算オイラー法

引数: 目標座標  $H(a, b)$ , 砲弾初速  $v_0$ , 重力加速度  $g$ , 砲弾空気抵抗係数  $c$ , 誤差閾値  $\varepsilon$

1. 与えられた座標  $H$  から迎え角  $\theta$  の初期値を決定する
2. 以下を  $n$  回繰り返す:
  - (a) 迎え角  $\theta$  で投射した場合の水平到達時間  $t$  を求める
  - (b) 水平到達時間  $t$  から、迎え角  $\theta$  で投射した場合の変位  $y$  を求める
  - (c) 垂直誤差  $e := b - y$  とする
  - (d)  $e \leq \varepsilon$ :  
 $\theta$  を出力する
  - $e > \varepsilon$ :  
 進む
  - (e) ベクトル  $(a, y)$  と  $(a, b)$  のなす角  $\theta_e$  を求める
  - (f)  $\theta$  に  $\theta_e$  を足し合わせる
3. 解非収束により、解なし (=到達不可) と判断する

このアルゴリズムの主な部分は繰り返しの部分であるが、文章では分かりづらい。そのため、図 4 に視覚的

な実行例を示す．なお  $\theta_e$  は以下の式で求められる．

$$\theta_e = \arccos \left( \frac{a^2 + by}{\sqrt{a^2 + y^2} \cdot \sqrt{a^2 + b^2}} \right) = \arccos \left( \frac{a^2 + by}{\sqrt{a^4 + a^2b^2 + a^2y^2 + b^2y^2}} \right) \quad (12)$$

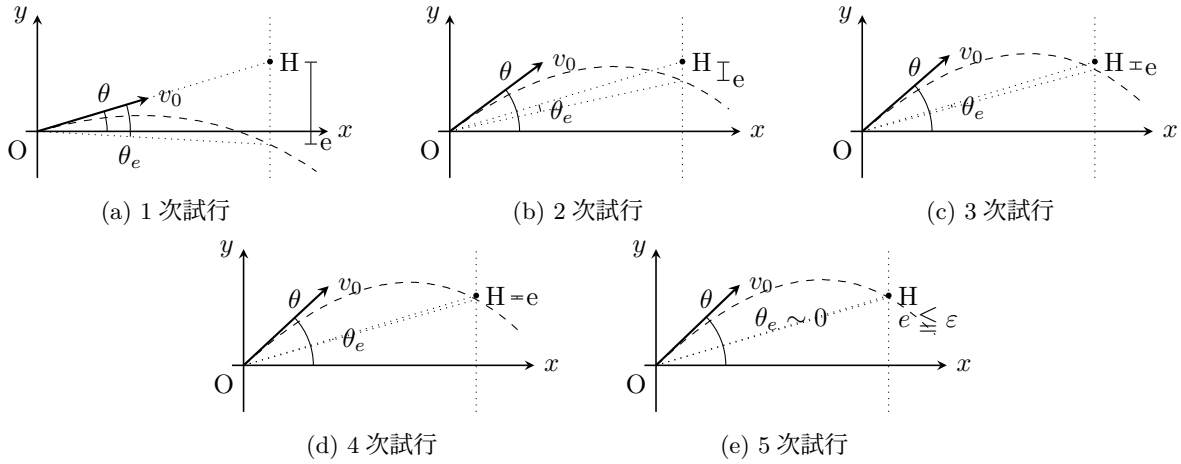


図 4: 弾道計算オイラー法の実行例

### 3.3 Lua での実装

これまでの理論を用いて弾道計算オイラー法を Lua に実装したソースコードをコード 1 に示す．これは水平距離  $a$ ，垂直距離  $b$  を入力し，命中に必要な迎え角を出力するものであって，自身や目標のワールド座標を考慮したものではないことに注意されたい．

コード 1: ballistic calculation.lua

```

1 pi = math.pi
2 pi2 = pi*2
3
4 vzero = 800/60 -- 初速(m/tick)
5 c = 2.0e-3 -- 空気抵抗係数
6 eps = 0.05 -- 誤差閾値(m)
7 g = 30/3600 -- 重力加速度(m/tick/tick)
8
9 function euler(a, b, vzero, g, c, eps) -- 弾道計算オイラー法
10     local theta = math.atan(b, a) -- 初期仰角
11     for i = 1, 20 do
12         local vx = vzero*math.cos(theta) -- 水平初速
13         local vy = vzero*math.sin(theta) -- 垂直初速
14         local t = math.log(1 - c*a/vx)/math.log(1-c) -- 水平到達時間
15         local y = ((1 - (1-c)^t)*(vy + g/c) - g*t)/c -- 時間t後の垂直変位
16         local e = b - y -- 垂直誤差
17         if e <= eps then -- 垂直誤差が誤差閾値内なら
18             return theta -- thetaを返す
19         end
20         local theta_e = math.acos((a^2 + b*y)/math.sqrt(a^4 + a^2*b^2 + a^2*y^2 + b^2*y^2)) -- 誤差角
21         theta = theta + theta_e

```



```

22     end
23     return math.atan(b, a) -- 解なし
24 end
25
26 function onTick()
27     a = input.getNumber(1) -- 水平距離
28     b = input.getNumber(2) -- 垂直距離
29
30     angle = euler(a, b, vzero, g, c, eps) -- 必要な迎え角を計算
31
32     output.setNumber(1, angle*4/pi2) -- angleをRobotic Pivot用に正規化し，出力
33 end

```

---

## 4 偏差射撃

3章までの内容は，自身も目標も静止していて，かつ無風の状態を想定したものであった．4章では，自身の速度，目標の速度，そして風速を考慮した弾道計算について解説する．目標が移動している場合に見越し角射撃を行う必要があるのは言うまでもないが，自身が移動している場合や風が吹いている場合にも砲弾の初速が変わったり，風によって流されたりする．これらを考慮した射撃を**偏差射撃**と呼ぶ．

### 4.1 理論

自身が動いている場合，風が吹いている場合，その両方の場合の砲弾の動きのイメージを図5(a)-(c)に示す．ただし，これらは世界を「上から」見た図であって， $v_m$ を自身の移動速度， $w$ を風速としている．

(a)の場合の偏差量 $d_m$ は，単に $v_m$ を用いて

$$d_m = -v_m t \quad (13)$$

と表すことができる．ここで負としているのは，図5からもわかるように速度のベクトルとは逆の方向に偏差を取る必要があるからである．一方で，(b)の偏差量 $d_w$ は抵抗による偏差であるから，式(8)を用いて

$$d_w = -\frac{1}{c}((1 - (1 - c)^t) \cdot \frac{w}{c} - wt) \quad (14)$$

と表される．ただし， $w$ は風速， $c$ は風抵抗係数である．

以上より，(c)の偏差量すなわち外乱偏差量 $d_e$ は $d_m + d_w$ であって，

$$d_e = -\left(v_m t + \frac{1}{c}((1 - (1 - c)^t) \cdot \frac{w}{c} - wt)\right) \quad (15)$$

となる．また，目標が移動している場合の目標の移動偏差量 $d_o$ は，目標が等速運動をしていると仮定すると，

$$d_o = v_o t \quad (16)$$

となるから，合計偏差量 $d$ は $d_e + d_o$ であって，

$$d = v_o t - \left(v_m t + \frac{1}{c}((1 - (1 - c)^t) \cdot \frac{w}{c} - wt)\right) \quad (17)$$

となる．これらの偏差量をオイラー法によって漸近させることで最終的な偏差量を得る．

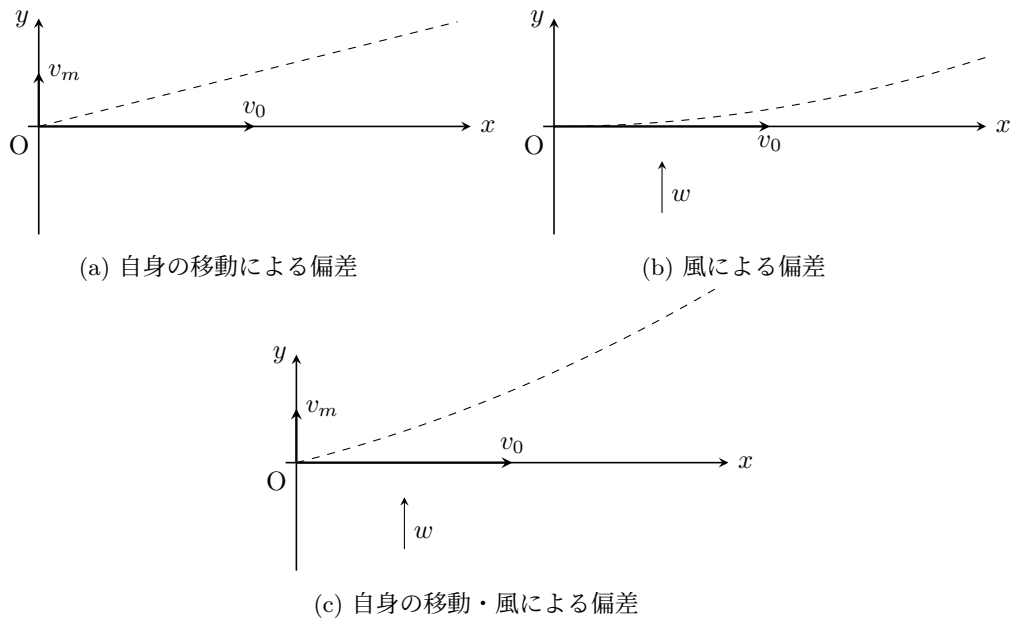


図 5: 外乱による砲弾の偏差

## 4.2 数値解を求める

偏差量を求める計算についてもオイラー法を用いることとした。そのアルゴリズムは以下の通りである。

偏差計算オイラー法

引数: 目標座標及び速度  $H(a, b, c, v_a, v_b, v_c)$ , 射手座標及び速度  $S(x, y, z, v_x, v_y, v_z)$ , 砲弾初速  $v_0$ , 重力加速度  $g$ , 砲弾空気抵抗係数  $c_a$ , 砲弾風抵抗係数  $c_w$ , 誤差閾値  $\varepsilon$

1. 到達時間  $t$  を 0 に初期化する
2. 以下を  $n$  回繰り返す:
  - (a) 目標座標/速度  $H$ , 射手座標/速度  $S$ , 及び到達時間  $t$  から 3 軸の偏差量  $D: (d_x, d_y, d_z)$  を求める
  - (b) 座標を相対化し偏差量を足し合わせたものを引数として弾道計算オイラー法を実行し, 到達時間  $t$  を得る
3. 最終的に弾道計算オイラー法が非収束:
 

解なしと判断する

弾道計算オイラー法が収束:

$H$ ,  $S$ ,  $D$  を考慮し, 必要な方位角/迎え角を計算する

なお, このアルゴリズムに関しては Lua での実装を提示しない。2 軸の弾道計算はシステムによって制御方式が様々であるため, 読者のシステムに応じた実装を期待する。

## 5 付録

### 5.1 各銃砲の諸元

各銃砲の諸元を表 1 に示す。

### 5.2 各銃砲の射表

各銃砲の水平射表を表 2 に示す。なお, 算出には Lua5.3 を用いた。

表 1: 各銃砲の諸元

銃砲名	初速 [m/s]	空気抵抗係数	風抵抗係数
Machine Gun	800	$2.5 \times 10^{-2}$	$3.75 \times 10^{-3}$
Light Auto Cannon	1000	$2.0 \times 10^{-2}$	$2.7 \times 10^{-3}$
Rotary Auto Cannon	1000	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.3 \times 10^{-3}$
Heavy Auto Cannon	900	$5.0 \times 10^{-3}$	$6.25 \times 10^{-4}$
Battle Cannon	800	$2.0 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-4}$
Artillery Cannon	700	$1.0 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-4}$
Bertha Cannon	600	$5.0 \times 10^{-4}$	$5.25 \times 10^{-5}$

表 2: 各銃砲の射表 [deg]

距離 [m]	MG	LAC	RAC	HAC	BC	AC	Ber
100	0.13	0.08	0.07	0.09	0.12	0.16	0.22
200	0.34	0.19	0.17	0.21	0.26	0.33	0.46
300	0.65	0.33	0.28	0.32	0.40	0.51	0.70
400	1.18	0.50	0.39	0.45	0.54	0.70	0.94
500	2.77	0.73	0.52	0.58	0.69	0.88	1.19
600	-	1.07	0.67	0.72	0.84	1.07	1.44
700	-	1.66	0.83	0.86	0.99	1.26	1.69
800	-	3.38	1.02	1.02	1.15	1.45	1.94
900	-	-	1.23	1.18	1.31	1.64	2.19
1000	-	-	1.49	1.36	1.47	1.84	2.45
1100	-	-	1.80	1.54	1.64	2.04	2.71
1200	-	-	2.18	1.74	1.81	2.24	2.97
1300	-	-	2.68	1.96	1.99	2.45	3.23
1400	-	-	3.38	2.19	2.18	2.65	3.49
1500	-	-	4.50	2.44	2.36	2.86	3.76
1600	-	-	7.27	2.71	2.55	3.08	4.03
1700	-	-	-	3.01	2.75	3.29	4.30
1800	-	-	-	3.34	2.95	3.51	4.57
1900	-	-	-	3.71	3.16	3.73	4.84
2000	-	-	-	4.12	3.37	3.96	5.12
2100	-	-	-	4.59	3.59	4.19	5.40
2200	-	-	-	5.14	3.82	4.42	5.69
2300	-	-	-	5.78	4.05	4.66	5.97
2400	-	-	-	6.55	4.29	4.90	6.26
2500	-	-	-	7.53	4.54	5.14	6.55
2600	-	-	-	8.85	4.79	5.39	6.85
2700	-	-	-	10.91	5.06	5.64	7.15
2800	-	-	-	-	5.33	5.90	7.45
2900	-	-	-	-	5.62	6.16	7.75

距離 [m]	MG	LAC	RAC	HAC	BC	AC	Ber
3000	-	-	-	-	5.92	6.42	8.06
3100	-	-	-	-	6.22	6.69	8.37
3200	-	-	-	-	6.54	6.97	8.69
3300	-	-	-	-	6.88	7.25	9.00
3400	-	-	-	-	7.23	7.53	9.33
3500	-	-	-	-	7.59	7.82	9.65
3600	-	-	-	-	7.97	8.12	9.98
3700	-	-	-	-	8.37	8.42	10.32
3800	-	-	-	-	8.80	8.73	10.66
3900	-	-	-	-	9.24	9.05	11.00
4000	-	-	-	-	9.71	9.37	11.35
4100	-	-	-	-	10.22	9.70	11.71
4200	-	-	-	-	10.75	10.04	12.07
4300	-	-	-	-	11.33	10.39	12.44
4400	-	-	-	-	11.95	10.74	12.81
4500	-	-	-	-	12.63	11.11	13.18
4600	-	-	-	-	13.37	11.48	13.57
4700	-	-	-	-	14.19	11.87	13.96
4800	-	-	-	-	15.12	12.26	14.36
4900	-	-	-	-	16.19	12.67	14.76
5000	-	-	-	-	17.47	13.09	15.18
5100	-	-	-	-	19.08	13.53	15.60
5200	-	-	-	-	21.44	13.97	16.03
5300	-	-	-	-	-	14.44	16.47
5400	-	-	-	-	-	14.92	16.92
5500	-	-	-	-	-	15.42	17.38
5600	-	-	-	-	-	15.95	17.86
5700	-	-	-	-	-	16.49	18.34
5800	-	-	-	-	-	17.06	18.84
5900	-	-	-	-	-	17.67	19.36
6000	-	-	-	-	-	18.30	19.89
6100	-	-	-	-	-	18.97	20.43
6200	-	-	-	-	-	19.69	21.00
6300	-	-	-	-	-	20.46	21.58
6400	-	-	-	-	-	21.30	22.19
6500	-	-	-	-	-	22.22	22.83
6600	-	-	-	-	-	23.24	23.50
6700	-	-	-	-	-	24.41	24.20
6800	-	-	-	-	-	25.80	24.94
6900	-	-	-	-	-	27.59	25.73

距離 [m]	MG	LAC	RAC	HAC	BC	AC	Ber
7000	-	-	-	-	-	30.54	26.57
7100	-	-	-	-	-	-	27.48
7200	-	-	-	-	-	-	28.49
7300	-	-	-	-	-	-	29.61
7400	-	-	-	-	-	-	30.91
7500	-	-	-	-	-	-	32.50
7600	-	-	-	-	-	-	34.74