

ハンドガンのそれをホールドする手首関節周りの慣性モーメント測定
Measuring Moment of Inertia about Shooter's Wrist Joint
Nov 16, 2025 by Masaki Shishiba

0 背景：

この記事は“ハンドガンの重心の周りの慣性モーメント測定”の続編である。前回の記事では鉄砲の重心のまわりの慣性モーメントに関するもので、今回は鉄砲をホールドする手の手首関節近辺のまわりの慣性モーメントの測定について述べる。

前回の記事においても今回の記事においても手の剛性と質量については、手強いと云ふか面倒な話題なので、触れていない。もしホールドする手の力が厚手の毛糸の手袋越しで極めて緩ければ前回の慣性モーメントが、または鋼鉄製の手のごとき強い場合には今回の慣性モーメントがより大きく影響すると云へる。

AP 競技ではトリガー重さが 500gf 以上と定められてゐるので、この力に負けてピストルの向きが 10m 先でのそれ換算で 3mm (または角度で 3.0×10^{-4} [rad] or 1[deg])程度に収まるに足る強さでホールドされてゐると想像するので、特別の場合をのぞき今回の“手首まわりの慣性モーメント”がより多く命中精度に影響すると思はれる。

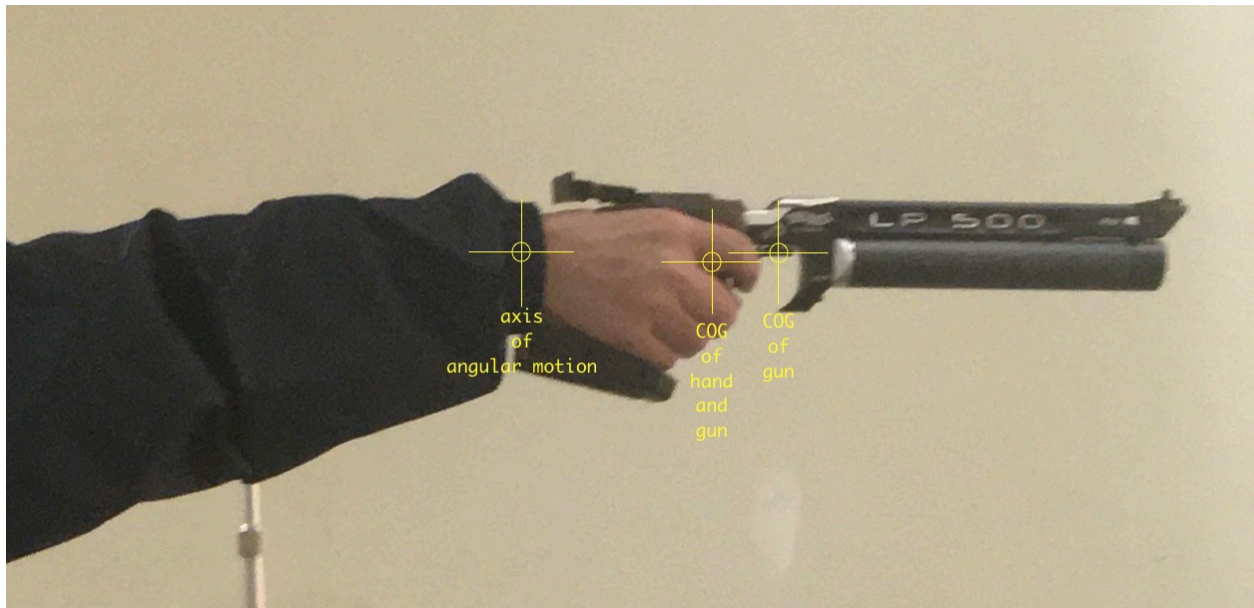


Fig. 0 本来議論すべき角運動の軸，手 + ピストルの重心(COG)，ピストルのみのCOG の位置
鉄砲の重心と手首関節は約 170mm 離れてゐる。

1.0 測定方式(原理)：

剛体振り子(physical pendulum)と呼ばれる振り子がある。それは剛体上の一軸をピヴォットとした振り子でその軸から重心までの距離、剛体の質量、重力加速度、振動の周期からその軸のまわりの慣性モーメントが求まる。

剛体上のピヴォットとすべき場所に穴を開けそこに軸となる棒を通し、その棒の両端を摩擦無く支える仕掛けを用意することで測定できる。通常のピストルの場合、手首関節はピストル上に位置しないので質量が(ほぼ)ゼロのブラケットを用意しピストルから離れた位置に軸を通す必要があるが、HR の場合ではストック上に貫通穴を開けることで足り、ブラケットを用意する必要はない。

以下の図と式は *Theory of Machines and Mechanisms, Fifth Edition, New York Oxford, OXFORD UNIVERSITY PRESS* [0]内の 12.10 Measuring Mass Moment of Inertia から無断借用した。

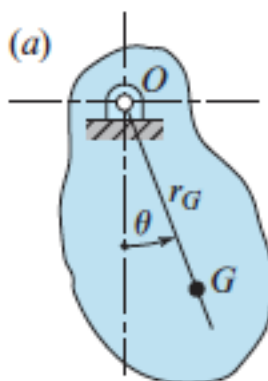


Fig. 1.0a 剛体振り子の仕掛け

$$I_O = mgr_G \left(\frac{\tau}{2\pi} \right)^2. \quad (12.102)$$

Eq. 1.0 剛体振り子の周期から慣性モーメントを求める式

1.1 測定装置の製作：

固定天井部として断面が 38mm x 89mm の木材に厚さ 3.0mm のスチール板2枚を並行にねじ止めし軸受けとした。

軸として 1/4inch のネジの二箇所によすり加工で 60° ナイフエッジを設けた。



Fig. 1.1a 2 個の 60° ナイフエッジ Pivot を持つ 1/4inch ネジを加工して作った軸
この部品は質量が 2.10grams もあるが芯から半径 3mm 以内に質点が分布してゐるので慣性
モーメント測定では無視できる.

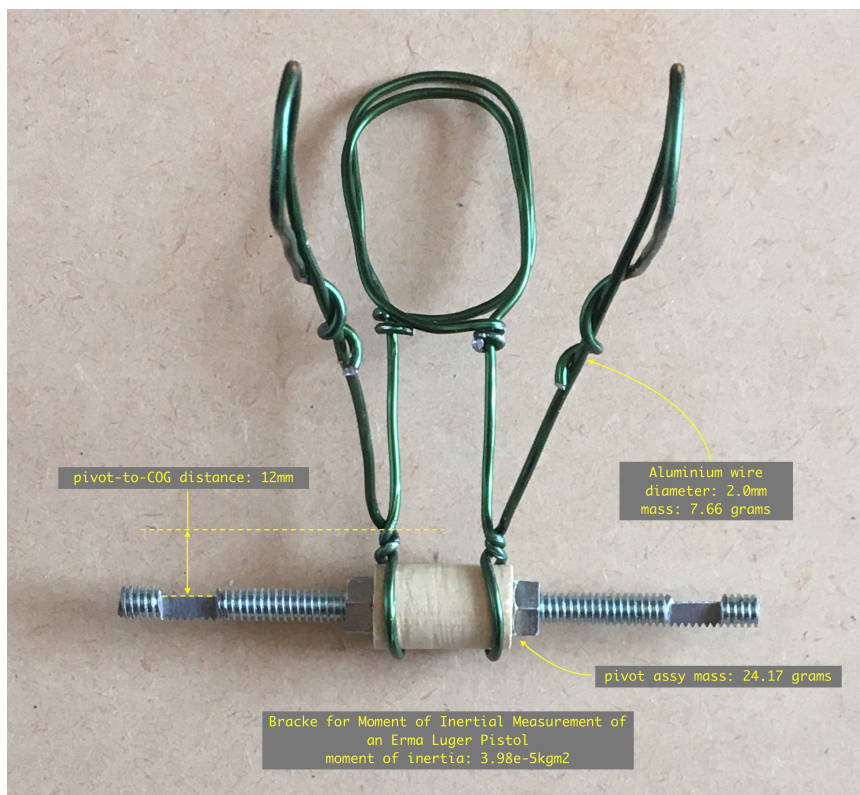


Fig 1.1b ピストルの場合の手首関節位置を軸とすためのブラケットの例

1.2 測定準備と測定誤差の予測：

1.2.1 準備：

手頃な天井円板固定先として高さ約 80cm の作業機を選び、その上におもり(約 5kg の ammo box)で軸受板を固定した。

被測定物である LP500 ハンドライフルのストック上の手首関節位置に 6.35mm の貫通穴を開けた。Erma Luger には Al 針金で作ったブラケットをはめ手首関節位置が軸になるようにした。



Fig. 1.2.1a(左) 軸受と LP500 ハンドライフルのストックに穴を開けて通した軸

Fig. 1.2.1b(右) ブラケットが付いた状態の Erma Luger

1.2.2 測定誤差の予測：

手首関節位置を軸とするために HR のストックには貫通穴を開けそこに約 24 grams のナイフエッジ付きシャフトを通し2個のナットで固定したが、これらが慣性モーメントの測定結果に与える誤差は 1.0% 未満だと確信できる。

Erma Luger の軸のために取り付けたブラケットのみの慣性モーメントは無視できるか否か準備段階では不明だったので、測定してみた。結果は $3.98 \times 10^{-5} [\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ だった。Tab. 2.2 測定結果にある Erma Luger の慣性モーメント値はブラケットが付き状態での実測値

0.01553285 からこのブラケットのみの分 3.98×10^{-5} を差し引いた 0.01549305 を有効数字3桁にしたものであるが、実はこのブラケット分はあまりに小さい値($\div 3.98 \times 10^{-5}$ 0.0155 $1/100$) = 0.26%)なので補正する必要がないことが後になつてわかつた。

1.2.3 ピボットでの運動エネルギーロス

前回の3本の紐でプラットフォームを吊つた捻じれ振り子では運動の自由度が多すぎて回轉運動ばかりでなく僅かな直線運動もしており、回轉運動の成分の振幅が小さくなると直線運動の成分と見分けが困難になりヒトの目で確実にカウントできるのは 50-100 往復が限度だつた。またプラットフォームから出た3本の梁が受ける空気抵抗も心配であつた。

今回の剛体振り子の装置では揺れる方向が一直進方向にしか運動しないので励起時の振幅がちいさくても 200 往復をカウントすることも可能だつた。軸受がスチール製のナイフエッジであることや(最先端で 2.5 - 5mm と云ふ)小振幅での測定が可能なのでピボットでの運動エネルギーロスは前回の捻じれ振り子の場合より小さいに違ひない。

2.0 測定方法の検証：

上述の装置と計算式がおよそ正しいか否かをチェックするために(約 30cm のバルサ板の先に半径 2cm の丸い“質点”と呼べるほどの錘から成る)単順な形状の剛体振り子の慣性モーメントの計算で求めた値と測定で求めた値を比較した。



Fig. 2.0 検証用単順振り子

r = 324mm, mass = 285grams 剛体振り子(physical pendulum)の慣性モーメント(I) は, バルサ板の質量は 2.76grams で錘の 1/100 弱と小さいので無視すると, $I = mr^2$ と云ふ極めて単純な計算で求まる. m と r に 285e-3 と 324e-3 をそれぞれ代入して,

```
> ( * 285e-3 (expt 324e-3 2))  
0.029918158
```

約 0.0299[kg·m²] となる.

次にこの剛体振り子を重力加速度 9.8[m/s²] の環境で振動させた時の周期(τ)を測定すると 1.15sec だった. この時の慣性モーメント I₀はEq. 1.0 の式から求まる

Eq. 1.0 剛体振り子の周期から慣性モーメントを求める式を Common Lisp の関数で表すと,

```
;;  
;; moment of inertia measurement by means of physical pendulum  
;;  
(defun moi-by-phyPendulum (m g r tau)  
  ( * m g r (expt ( / tau ( * 2 pi) ) 2 )));  
;;
```

上記の関数に振動周期 1.15[sec] その他引数を渡すと

```
> (moi-by-phyPendulum 0.285 9.8 0.324 1.15)  
0.0303146
```

約 0.0303[kg·m²] となる.

異なる方法で得られたこれら二つの値を比較すると今回の装置で得られる測定値が含む誤差は, 振り子の周期をヒトがストップワッチを見ながら 100 - 200 往復の振動から測ると云ふあやうさはあるが 1.5% 前後と云へる.

2.1 ブラケットを付けたことにより生じる誤差の考察

ブラケットを付けたことにより生じる誤差の考察は 1.2.2 測定誤差の予測 ですすでに述べました.

2.2 実測

CMC製造のErma Luger .380(ACPか?) の亜鉛製不可發射モデルとWalther LP500 を改造した HR のそれぞれで手首関節のまわりの慣性モーメントを測定してみた。

この CMC製造の亜鉛製不可發射モデルは寸法と質量においては実物とほぼ同じに作られてゐると思はれる。マガジンには .380 ダミーカートリッジが3個入った状態で 881 grams だった。

2.3 測定結果：

結果は Table 2.2 のとおり。残念ながら今は AP の姿の Walther LP500 は手元に存在しないので測定できない。

	Erma Luger	Walther LP500 HR	Walther LP500 AP
overall length[m]	0.205	0.810	0.420
mass[kg]	0.881	1.063	0.945
distance between wrist joint and gun's COG[m]	0.122	0.171	0.171
moment of inertial[kg・m²]	0.0155	0.0556	n.a.

Tab. 2.3 測定結果

測定中の振り子の動きのムービーを [立川ライフル射撃協会 web 頁/寫眞集](#) の中の ”ハンドガンをホールドする手の手首関節まわりの慣性モーメント測定/捻じれ振り子の動き(Moment of Inertia Measurements)” に置いてあります。

2.4 測定結果に対する感想：

手首関節まわりの慣性モーメントは重心まわりのそれよりも、想像してみた通り、大きい値だ。HR では、前回測定した重心のまわりの値 0.0246[kg・m²] の約倍である。Erma Luger の前回の値 0.00288[kg・m²] との比は 3倍である。

4 課題:

近日中に AP の推薦申請を行い、AP の姿の Walther LP500 についても測定をしたい。処は立つてゐる。

5 補足:

今回測定した HR 化された Walther LP500 は銃砲店による改造からさらに、重心が(理想とわたしが思ふ位置より)あまりにも後ろにあつたのでストックをくり抜いたりおもりをエアースリンダーの先端につけました。この様子は [立川ライフル射撃協会 web 頁/記事集/ハンドライフ](#)(HR) をエアーストistol(AP)の氣分で撃つための改造履歴に書いてあります。今回測定に供した HR 化された LP500 はこの記事のリリースから2年弱の間にさらにストックの軽量化とそれに伴ふエアースリンダー先端につけた錘の減量がされてゐます。これらの軽量化で現在の総重量は 1.063kg になつてゐます。

6 参考文献：

[0] *Theory of Machines and Mechanisms, Fifth Edition, New York Oxford, OXFORD UNIVERSITY PRESS*

おわり