

Jansen 機構の解析と最適化

2016SC055 森下雅大

指導教員：杉浦洋

1 はじめに

1.1 背景

近年、オランダの芸術家 Theo Jansen の作品「Strand Beast」が注目を浴びている。風を受けた Strand Beast は、驚くほど滑らかに動き出し、その姿はまるで生物のように奇妙な動きにも感じられる。この作品は、アメリカ航空宇宙局 NASA でも取り上げられる程、興味深い機構構造を持っている [1,2]。私は、簡素な作りながらもスムーズかつ複雑な動きをしているこの作品に興味を湧き、計算ツールの Mathematica を用いて解析を始めた。

1.2 アプローチ

Strand Beast の歩脚を構成する Jansen 機構はリンク機構であり、機構学で扱われる対象である [3]。リンク機構について整理し、それに基づき Jansen 機構を解析する。この結果を踏まえて Jansen 機構の動作の精度を調べ、歩脚としての適切性を確認する。必要なら、その最適化を行う。

2 Jansen 機構

図 2 はヤンセン機構の設計図である。11 本のリンクの長さ $b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, m$ とクランク軸 O を原点とした、固定軸 B の座標 (a, l) が指定されている。以上を形状パラメータと呼ぶ。

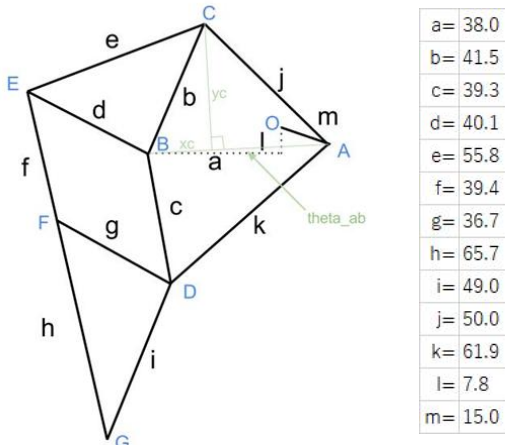


図 1 Jansen 機構設計図

クランクシャフトは等速回転すると仮定する。クランクシャフトの回転角を θ とする。二足歩行の 1 歩行周期は、第 1 脚が接地している第 1 フェーズと第 2 脚が接地している第 2 フェーズの 2 つのフェーズからなる。第 1 フェーズが始まる回転角 θ を接地タイミング θ_0 と呼ぶ。第 2 フェーズは、 $\theta = \theta_0 + \pi$ から始まる。

上記 13 個の形状パラメータに加え、クランクシャフトの初期角度 θ_0 の合計 14 個のパラメータを調整し、二足歩行の Strand Beast の最適設計を目指す。

3 評価方法

接地フェーズにおいては、歩脚先端 G が等速水平運動することが望ましい。その条件は、

$$\begin{cases} \ddot{x}(\theta) = 0, \\ \dot{y}(\theta) = 0 \end{cases} \quad (\theta_0 \leq \theta \leq \theta_0 + \pi) \quad (1)$$

である。これに対する達成度を

$$V = \alpha V_{xx} + \beta V_y, \quad (2)$$

$$V_{xx} = \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \pi} \ddot{x}(t)^2 dt, \quad (3)$$

$$V_y = \int_{\theta_0}^{\theta_0 + \pi} \dot{y}(t)^2 dt \quad (4)$$

で評価する。

V , αV_{xx} , βV_y の値の評価について、 αV_{xx} は着地した歩脚の水平運動の等速性（以下等速性と呼ぶ）を表す。 αV_{xx} が小さいほど、等速性が良い。 βV_y は着地した歩脚の運動の水平性（以下水平性と呼ぶ）を表す。 βV_y が小さいほど、水平性が良い。 $V = \alpha V_{xx} + \beta V_y$ は総合評価値であり、我々の最適化における目的関数である。もちろん、 V が小さいほど歩脚の性能が良い。 V が最小となるリンク長の組を求めて、最適化を行う。

α , β は正の重みで、 V_{xx} , V_y のどちらを重視するかを表す。 αV_{xx} と βV_y の大きさが同じオーダーになるように $\alpha = 1/3$, $\beta = 10$ で実験を行う。また、無意味な相似形の探索を避けるためにリンク長 $m = 15$ を定数として固定し、他のリンク長を変化させる実験を行う。

4 直線探索アルゴリズム

評価値 V のリンク長と θ_0 に関するグラディエントを計算し、直線探索法を用いて最適化を行う。今回の実験では、各パラメータに関する V の偏微係数を求め、偏微係数の絶対値が最大のパラメータを直線探索で最適化する。また、リンク長を最適化したあとで、必ず接地タイミングの最適化を行なった。これを繰り返して、評価値の最適化を行う。

5 Jansen 機構の最適化

まず初めに、Holly Number のリンク長の Jansen 機構 (JansenHN) で評価を行った。このリンク長での接地タイミングは $\theta_0 = 4.828$ 。評価値は

$$(\alpha V_{xx}, \beta V_y, V) = (118.7, 87.0, 205.8)$$

となった。この評価値を基準値とする。歩脚先端 G の軌道と \ddot{x}, \ddot{y} グラフは図 2,3 である。第 4 節の直線探索を繰り返し、Jansen 機構の最適化を行った。

直線探索を 1 回行った結果を示す。この時、最も偏導関数の絶対値が大きかったリンク長 a を最適化した。このリンク長での最適接地タイミングは $\theta_0 = 4.828$ 。評価値は

$$(\alpha V_{xx}, \beta V_y, V) = (110.6, 25.5, 136.1)$$

となった。JansenHN の評価値と比べて、 V_{xx} はもとの 93.1%、 V_y は 29.3%、 V は 66.1% となった。歩脚先端 G の軌道と \ddot{x}, \ddot{y} グラフは図 4,5 である。水平性、等速性とも改善された良い歩足となった。 G の軌道は低く、おとなしい歩き方になった。

さらに 15 回直線探索を繰り返した。このリンク長での最適接地タイミングは $\theta_0 = 4.807$ 。評価値は

$$(\alpha V_{xx}, \beta V_y, V) = (89.5, 6.34, 95.9)$$

となった。JansenHN の評価値と比べて、 V_{xx} は 75.4%、 V_y は 7.2%、 V は 46.6% となった。歩脚先端 G の軌道と \ddot{x}, \ddot{y} グラフは図 6,7 である。水平性、等速性はさらに改善されたが、 G の軌道が交差し、歩足として使えないものとなった。

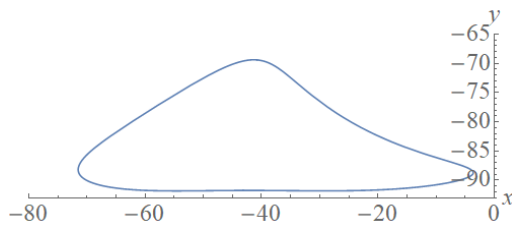


図 2 歩脚先端 G の軌道 (Holly Number)

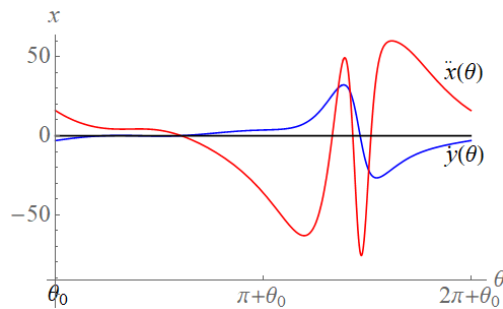


図 3 \ddot{x}, \ddot{y} グラフ (Holly Number)

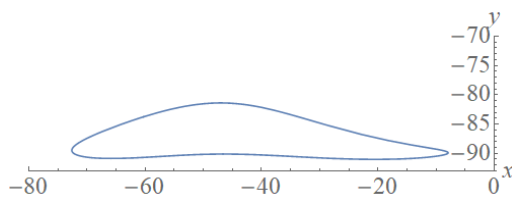


図 4 歩脚先端 G の軌道 (探索 1 回目)

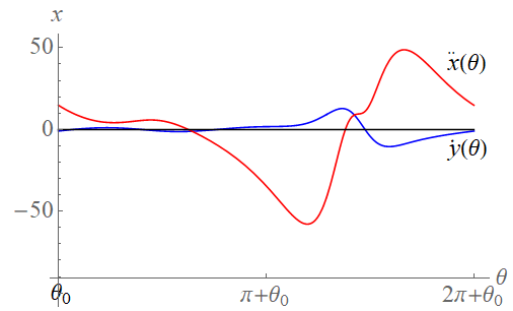


図 5 \ddot{x}, \ddot{y} グラフ (探索 1 回目)

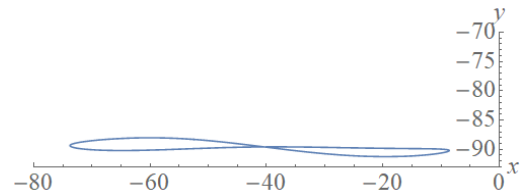


図 6 歩脚先端 G の軌道 (探索 16 回目)

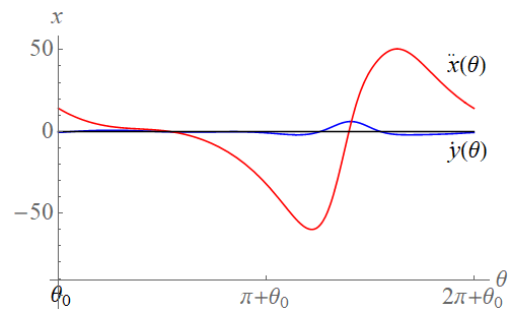


図 7 \ddot{x}, \ddot{y} グラフ (探索 16 回目)

6 おわりに

本研究では、Jansen 機構を数値シミュレーションを用いて最適化し、より精度の高い Jansen 機構の設計を考察した。JansenHN の評価値に比べて、等速性・水平性の両方に改善が見られ、精度の高い歩行脚が設計できた。

しかし、評価値 V を改善しようとする、脚軌道全体が低くなり、足先が地面を削る現象が見られた。これを防ぐために、適切な制約条件を加えて最適化することや歩脚リンク機構に対する定量的評価法の定め方を変えること、またリンクの特性を調べ最適化の工夫を行うことが今後の課題である。

参考文献

- [1] 大人の科学マガジン編集部, 大人の科学マガジン Vol. 30 テオヤンセンのミニビースト, 学習研究社, 2011 年
- [2] 大人の科学マガジン編集部, 大人の科学マガジン テオ・ヤンセン式二足歩行ロボット, 学習研究社, 2012 年
- [3] 安田 仁彦, 改訂 機構学, コロナ社, 1983 年