T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 論題(和文) | 哺乳類型/昆虫型ロボットにおける静歩行の消費パワー解析 |
| Title(English) | Power Consumption Analysis of Mammal-Type and Insect-Type Robots During Static Walking |
| 著者(和文) | 角田 柊平, 難波江 裕之, 鈴森 康一, 遠藤 玄 |
| Authors(English) | Shuhei Tsunoda, Hiroyuki Nabae, Koichi Suzumori, Gen Endo |
| 出典(和文) | ロボティクス・メカトロニクス講演会2021講演論文集, , , |
| Citation(English) | Proceedings of the 2021 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, , , |
| 発行日 / Pub. date | 2021, 6 |

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

# 哺乳類型/昆虫型ロボットにおける静歩行の消費パワー解析

Power Consumption Analysis of Mammal-Type and Insect-Type Robots During Static Walking

○学　角田　柊平（東工大）　　正　難波江　裕之（東工大）
正　鈴森　康一（東工大）　　正　遠藤　玄（東工大）

Shuhei TSUNODA, Tokyo Tech, tsunoda.s.ad@m.titech.ac.jp
Hiroyuki NABAE, Tokyo Tech
Koichi SUZUMORI, Tokyo Tech
Gen ENDO, Tokyo Tech

The leg configurations of multi-legged robots are classified into mammal and insect types based on the arrangement of the degrees of freedom. However, few studies have quantitatively compared the two leg configurations. We compared the power consumption of static walking while changing body height and foot trajectory. The results of the analysis showed that the insect-type configuration is able to reduce the power consumption over a wide range of foot positions. These results indicate that the insect-type configuration is suitable for situations where the ground is rough and a stable continuous power supply is not expected, such as at disaster sites, due to their ability to reduce the power consumption even in various walking postures.

***Key Words*:** Legged Robot, Power Consumption, Mammal-Type Configulation, Insect-Type Configulation

## 1　緒言

歩行ロボットは接地点を離散的に選択できるという特徴を持つことから，車輪式の移動機械が通常進入できないような不整地環境で使用することができる．さらに，クローラ式の移動機械とは異なり，瓦礫のような不安定な地面を破壊してしまう危険が小さく，凹凸や傾斜のある環境でも歩行ロボット自体が安定な土台となることができるという点から，災害現場などでの活躍が期待されている．その中でも，4 本以上の脚を持つ多脚ロボットは，歩行動作中に 1 本の脚を地面から離しても，残りの 3 本以上の脚で胴体を支持することができるため，安定で比較的制御のしやすい構造であると言える．

多脚ロボットはその自由度配置から，Spot[1] のような胴体の下方向に脚が位置する哺乳類型の構成と，TITAN-XIII[2] のような脚を横に張り出した姿勢をとる昆虫型の構成の 2 種類に大きく分類することができる．図 1 に，1 本の脚あたり 3 つの自由度を有する四脚ロボットの場合におけるそれぞれの脚構成の概略図を示す．四脚ロボットにおいては，近年新たに開発されているロボットの多くが哺乳類型の構成をとっている一方，六脚ロボットにおいては，そのほとんどが昆虫型の構成となっている．しかし，それぞれの構成の性能についての比較を定量的に行った研究はあまり見られない．

我々の研究グループでは，歩行ロボットの消費エネルギーを削減するためには，自重を支えるためのトルクを出力するアクチュエータと歩行に必要な速度を出力するアクチュエータを分けることで，アクチュエータがブレーキとして働いて負のパワーを生じることを防ぐ GDA (Gravitationally decoupled actuation) を達成することが重要であると提唱している．そして，昆虫型の構成において，脚を横に広げる歩行姿勢をとった場合に，GDA が達成され，消費エネルギーを削減できるということを示している [3].

また，Sanz-Merodio らは脚を付け替えることで両方の脚構成をとることができる六脚ロボット SILO6 を開発し，歩行時の消費エネルギーの比較を行った [4]．その結果，シミュレーションと実機での実験の両方において，哺乳類型の構成の方がエネルギー効率が良くなるということを示している．しかし，この研究では，胴体高さや足先軌道といったパラメータはあらかじめ固定して比較を行っているため，それぞれの脚構成で歩行時の姿勢を変えた場合の消費エネルギーの変化の仕方については明らかにされていない．

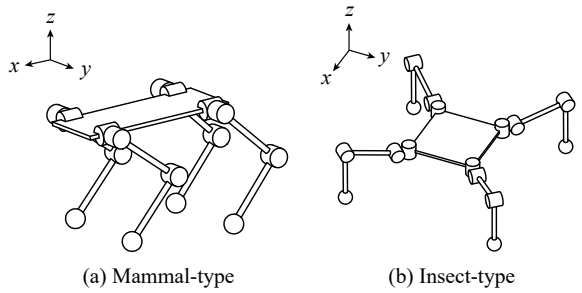


**Fig.1** Schematics of two types of leg configulations.

激しい凹凸があり不安定な足場で歩行ロボットを使用する際には，足先が接地できる点が限られ，消費エネルギーを最小にする姿勢で常に歩行できるわけではないため，様々な姿勢でも歩行時の消費エネルギーを小さく抑えられるかという点も重要になる．

本研究では，これらの点を明らかにするため，哺乳類型と昆虫型のそれぞれの脚構成における消費パワーの定量的比較をより詳細に行うことを目的とする．具体的には，胴体高さや足先軌道を変化させながら，異なる脚構成の多脚ロボットが静的な歩行をする場合の消費パワーの比較を行っていく．

## 2　消費パワー解析の条件

本研究では，それぞれの脚が 3 自由度シリアルリンクから構成される多脚ロボットについて，消費パワーの計算を行っていく．図 1 のように進行方向を $x$ 軸（ロール軸），鉛直上方向を $z$ 軸（ヨー軸），これらに垂直な方向を $y$ 軸（ピッチ軸）と定める．3 つの関節は胴体側から順に Joint 1, 2, 3 として，それぞれの回転方向は胴体側から順に，哺乳類型ではロール，ピッチ，ピッチ，昆虫型ではヨー，ロール，ロールとする．関節を曲げる向きはすべての脚において，哺乳類型では Joint 3 が $x$ 軸負の向きに，昆虫型では Joint 3 が外側に突き出るような向きとする．

消費エネルギーの計算は図 2 のような，1 本の脚を取り出したモデルについて行った．各関節をつなぐリンクの長さを $l_1, l_2, l_3$

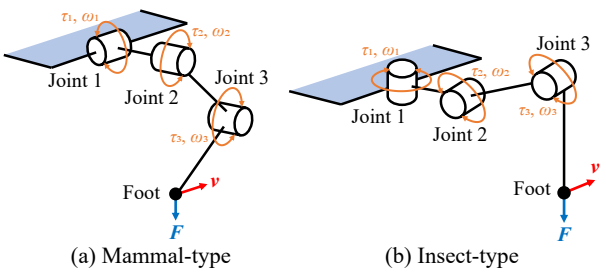


**Fig.2** The model of the leg mechanism.

**Table 1** Assumed paremeters of the leg mechanism.

| | | |
|---|---|---|
| Length of the links | $l_1$ | 50 mm |
| | $l_2$ | 175 mm |
| | $l_3$ | 175 mm |
| Body Height | $h$ | 125, 225 mm |
| Foot forth | $F$ | 2.5 kgf |
| Foot velocity | $v$ | 0.8 m/s |

**Table 2** Specifications of the motor used for the leg mechanism.

| | |
|---|---|
| Rated output | 28 W |
| Maximum continuous torque | 22.48 mNm |
| No load speed | 13300 rpm |
| Torque constant $K_t$ | 19.25 mNm/A |
| Teminal resistance phase to phase $R$ | 2.182 Ω |

とし，Joint 1 から足先までの鉛直方向の距離 $h$ をロボットの胴体の高さとする．各関節の角速度は Joint 1 から順に $\omega_1, \omega_2, \omega_3$，各関節の出力トルクは $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ とする．これらの関節での出力により，足先には力 $\boldsymbol{F}$ と速度 $\boldsymbol{v}$ が発生し，足先の力 $\boldsymbol{F}$ はロボットの自重によって足先が受ける床反力とつり合う．脚のリンクや関節の質量は胴体部分の質量と比べて十分に小さいことから無視できるものとして，本研究では，比較的簡単な準静的解析により計算可能な静的歩行について取り扱うものとする．このとき，脚機構は立脚期のみでエネルギーを消費することになる．計算を簡単にするため，立脚期の間の $h$，$\boldsymbol{F}$，$\boldsymbol{v}$ は一定とする．

モデルの各パラメータは TITAN-XIII[2] の値を参考にした上で，哺乳類型の構成としても問題ないよう $l_2$，$l_3$ の長さを均等にし，表 1 のように定めた．哺乳類型のロボットでは胴体を高くした姿勢，昆虫型のロボットでは胴体を低くした姿勢がよく見られることから，胴体高さは $h = 125, 225$ mm の 2 つの値について検討する．各関節の駆動は TITAN-XIII[2] で用いられている日邦電機製のブラシレス DC モータ FX1206-11 を使用すると仮定した．そのスペックは表 2 に示す通りである．減速比はすべての関節で 150 : 1 とした．

脚機構の単位時間当たりの消費エネルギーである消費パワー $P$ は，準静的な解析を行うことから，電流の時間変化による項を無視すると，モータのトルク定数を $K_t$，端子間抵抗を $R$，各関節の減速比を $\xi_i$ として，

$$P = \sum_{i=1}^{3} \left\{ \alpha_i \tau_i \omega_i + \frac{R}{{K_t}^2} \left( \frac{\tau_i}{\xi_i} \right)^2 \right\} \tag{1}$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 & (\tau_i \omega_i \geq 0) \\ 0 & (\tau_i \omega_i < 0) \end{cases} \tag{2}$$

と求められる．式 (1) の第一項は各関節の機械的仕事による消費パワー，第二項はモータでの熱損失による消費パワーを表している．第一項でモータが負の仕事をする場合でも，回生システムを備えていない限りそのエネルギーは失われてしまう．通常，回生システムを歩行ロボットに搭載することは難しいことから，式 (2) のように，機械的な消費パワーは正となる場合のみ計算に加える．

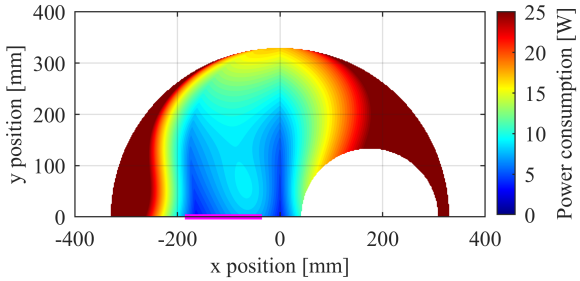


**Fig.3** Total power consumption at each foot position when walking in the $x$ direction in the mammal-type leg mechanism. ($h = 125$ mm)

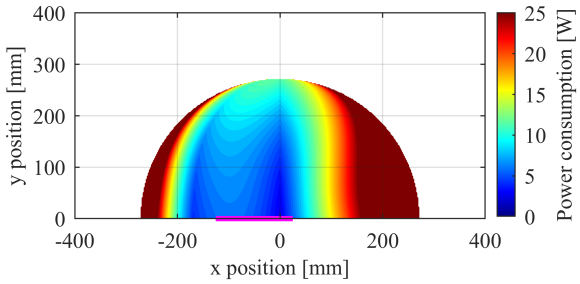


**Fig.4** Total power consumption at each foot position when walking in the $x$ direction in the mammal-type leg mechanism. ($h = 225$ mm)

## 3　解析結果および考察

脚機構の足先が，ある位置を所定の速度 $\boldsymbol{v}$ で通過する場合の消費パワーを計算し，その結果を分布図で表した．このように表すことで，どのような足先軌道を選択すると，歩行中の消費パワーを減らすことができるのかが明らかになる．ロボットが図 1 の $x$ 方向，すなわち前方向に進むときの消費パワーを求め，哺乳類型の構成について，$h = 125$ mm での結果を図 3 に，$h = 225$ mm での結果を図 4 に示し，昆虫型の構成について，$h = 125$ mm での結果を図 5 に，$h = 225$ mm での結果を図 6 に示した．ここで示した結果は胴体の左側にある脚についての計算結果であるが，右側の脚に関しても同様の結果が得られる．グラフの $xy$ 座標の原点は Joint 1 の位置にとっており，消費パワーの計算は胴体の外側にあたる $y \geq 0$ mm の範囲で行っている．この解析では，膝関節にあたる Joint 3 を曲げる向きを固定していることから，哺乳類型で胴体を低くする姿勢をとると，関節が地面と接触する場合がある．図 3 では，この場合の足先位置は可動範囲外として，消費パワーの計算は行っていない．

どちらの構成においても，胴体高さを低くすると足先の可動範囲は外側に向かって広がっていく一方，消費パワーの小さくなる濃い青色の領域は胴体高さが高い方が広くなる．また，この消費パワーが小さくなる領域は，胴体高さに関わらず，昆虫型の構成の方が広くなっており，広い足先位置の範囲にわたって消費パワーが小さくなっていることがわかる．この領域では，トルクを出力するモータと角速度を出力するモータが分かれ，GDA が達成されるために，各モータの機械的仕事による消費パワーが小さくなっていると考えられる．そしてこの結果から，昆虫型の構成

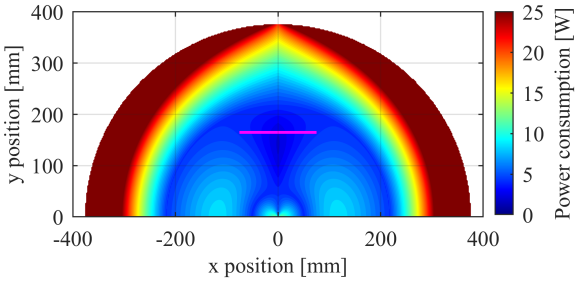


**Fig.5** Total power consumption at each foot position when walking in the $x$ direction in the insect-type leg mechanism. ($h = 125$ mm)

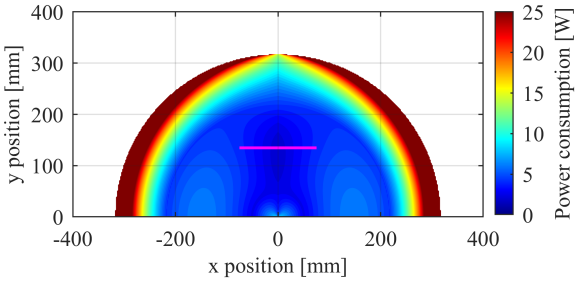


**Fig.6** Total power consumption at each foot position when walking in the $x$ direction in the insect-type leg mechanism. ($h = 225$ mm)

では，劣悪な路面状況によって接地できる点が限られ，歩行時の姿勢が制限されるような場合でも，消費パワーを小さく抑えることが可能であると言える．

さらに，それぞれのグラフにおいて，歩幅を 150 mm としたときに，1 歩分の消費エネルギーが最小となる軌道をピンクの線で示している．参考として，この軌道を通って歩行する場合の脚機構の姿勢を図 7 に示す．この足先軌道は，実際のそれぞれの構成の歩行ロボットでよく見られる歩行姿勢と概ね一致しており，哺乳類型の構成には，ロボット全体の幅を減らすことで狭い箇所にも進入できる，昆虫型の構成には，支持多角形を広くとることで安定な歩行ができるという利点がある．足先がこの軌道を通って歩行をした場合の消費パワーの時間平均は表 3 のように求められ，胴体高さの値に関わらず，昆虫型の方が消費パワーが小さくなるということがわかった．昆虫型の構成では，消費パワーの小さくなる領域が進行方向と同じ $x$ 軸方向に広がっているため，この範囲内で足先を動かすことにより，歩行軌道全体において消費パワーを抑えることが可能になっていると考えられる．

## 4　結言

本稿では，哺乳類型と昆虫型のそれぞれの脚構成において，静的な歩行をする場合の消費パワーの比較を，胴体高さや足先軌道といったパラメータを変化させながら行った．その結果，昆虫型の構成では，広い足先位置の範囲において，歩行時の消費パワーを小さく抑えることができるということがわかった．このことから，昆虫型の構成の多脚ロボットは，十分な電源供給が望めない状況下で，足先の接地点が制限される不整地を歩行することになるような，災害現場などでの利用に適していると考えられる．今後は，それぞれの脚構成において，動解析を考慮した消費パワーや，出力可能な最大の速度と力についても，定量的な比較を進めていきたい．

## 参考文献

[1] “Spot® | Boston Dynamics,” [Online], Available: https://www.bostondynamics.com/spot 2021 年 3 月 7 日 参照.

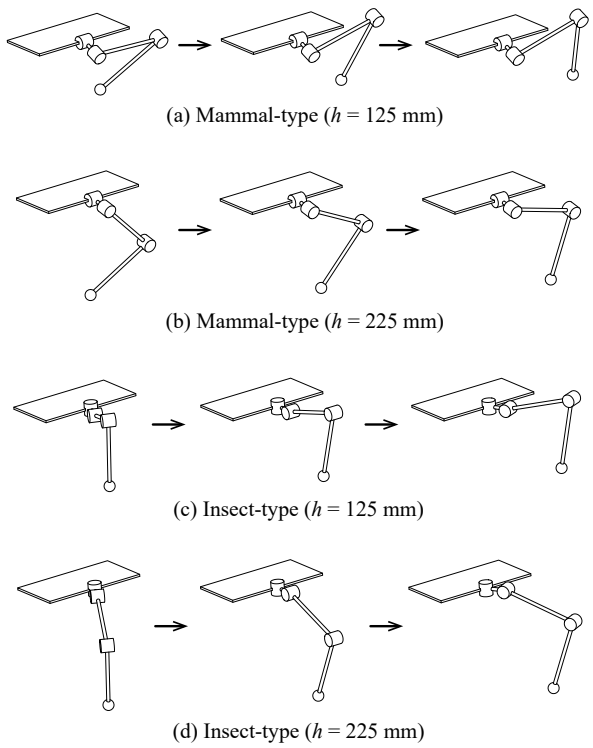


**Fig.7** Postures of the leg mechanism when walking through the foot trajectory that minimizes power consumption.

**Table 3** Average power consumption of the leg mechanism when walking through the foot trajectory that minimizes power consumption.

| | $h = 125$ mm | $h = 225$ mm |
|---|---|---|
| Mammal-type | 6.40 W | 5.13 W |
| Insect-type | 3.60 W | 3.20 W |

[2] S. Kitano, S. Hirose, A. Horigome and G. Endo, “TITAN-XIII : sprawling-type quadruped robot with ability of fast and energy-efficient walking,” *ROBOMECH Journal*, Vol. 3, No. 1, pp. 1–16, 2016.

[3] K. Arikawa and S. Hirose, “Mechanical design of walking machines,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Vol. 365, pp. 171–183, 2007.

[4] D. Sanz-Merodio, E. Garcia and P. Gonzales-de-Santos, “Analyzing energy-efficient configurations in hexapod robots for demining applications,” *Industrial Robot*, Vol. 39, No. 4, pp. 357–364, 2012.