

仮想物理空間上における多脚生物モデルの 進化的歩行動作獲得シミュレーション

中嶋晃彦¹ 染谷博司²

概要: 陸上には様々な脚数の生物が存在する。ムカデやゲジなどの無脊椎動物の中には、脱皮をし、欠損した脚を再生する種も存在する。他方、クモは2本までの欠損では、欠損なしの個体と比べて、捕食や巣を作る能力に差がみられない。しかし3本以上の欠損では、それらに異常がみられた。このことから脚は活動に非常に重要だと考えられる。しかし脚数と歩行動作の安定性の関係は分かっていない。そこで本研究では、脚数と歩行動作を行う際の脚の動き、胴体の安定性の面から、自然界で観察される生物の脚数に至った、進化的経緯を調査する。仮想物理空間上で、遺伝的アルゴリズムを用いて仮想生物モデルを進化し、平面の場合と傾斜をつけた場合における歩行動作の変化を脚数毎に観察した。傾斜の有無、角度の違いや脚数の違いによって歩行動作に差が生じることを確認した。

キーワード: 遺伝的アルゴリズム, 歩行動作, シミュレーション

Evolutionary Walking Motion Acquisition Simulation of Multi-Legged Creature Models in Virtual Physical Space

AKIHIKO NAKAJIMA^{†1} HIROSHI SOMEYA^{†2}

Abstract: There are creatures with a variety of leg numbers on land. Some invertebrate species, such as centipedes and house centipede, molt and regenerate when missing legs. On the other hand, spiders show no difference in their ability to feed or build webs when up to two legs are missing compared to individuals with no missing legs. However, spiders with three or more legs missing shows abnormalities in these abilities. This suggests that legs are very important for activity. However, the relationship between the number of legs and the stability of walking motion is not known. This study investigates the evolutionary process that led to the number of legs in creatures observed in nature, terms of the number of legs, the motion of legs during walking motion, and the stability of the body. Virtual creature models were evolved using a genetic algorithm in a virtual physical space and observed the changes in walking motion for each number of legs when the floor was flat, and it was inclination. It was confirmed that differences in walking motion occurred depending on the floor was flat or inclination, differences in the angle and differences in the number of legs.

Keywords: genetic algorithms, walking motion, simulation

1. はじめに

陸上には数多くの生物が生息する。ムカデやゲジなど、無脊椎動物の中には、脚を失った場合、脱皮を繰り返すことで脚を再生する種も存在する。他方、クモは脚を再生せず、1, 2本の脚の欠損であれば、通常の個体と比較しても巣を作る能力や捕食能力に差がみられない。ただし、2本以上の脚を欠損したクモはほとんどおらず、3本欠損したクモが作る巣は、欠損が0本から2本のクモと比べて粗末であった。なお、野生に生息するクモでは10%以上の個体において8本のうち1本以上の脚を欠損している[1]。また、6脚ロボットにおいて、1本の欠損を想定した5脚歩行についての研究[2]や、5脚と6脚の生物の歩行動作を、コンピュータシミュレーションを用いて比較した研究[3]も報告されている。前者は、6脚静歩行中のロボットが脚を欠損した際、一部のパラメータのみ変更し、5脚の脚位相を

調整して静歩行を継続する。これを適応ウェーブ歩容として提案した。後者は、脚関節の回転を最適化した結果、5脚の生物の8秒間の移動距離が、6脚の生物の移動距離を上回った。既存研究[4]では、ほとんどの昆虫が交互三脚歩行を行うのに対し、フンコロガシは、後ろの左右2脚を引きずり、前の4脚のみを用いて、ギャロップ歩行を行うことを報告した。なお後ろの2脚は推進力には寄与しない。このフンコロガシは、交互三脚歩行も可能であるものの、通常はそれより低速なギャロップ歩行を行う。また、移動手段として、主に飛行をする種であっても歩行することはある。以上から生物の脚は非常に重要な役割をもち、脚数に関わらず歩行は可能であると考えられる。しかし脚数の多寡と歩行動作の安定性の関係はわかっていない。先行研究[5]では、仮想物理空間上の平面の環境において、6, 10, 12, 18, 24, 48本脚で実験を行い、前進距離と歩行動作を比較した。歩行動作は、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA) によって獲得した。初期集団を15個体、エリートを5個体、交叉で10個体を生成した。しかし、選択圧が強すぎることや、平面のみの実験では不十分と考え

¹ 東海大学
Tokai University
² 東海大学
Tokai University

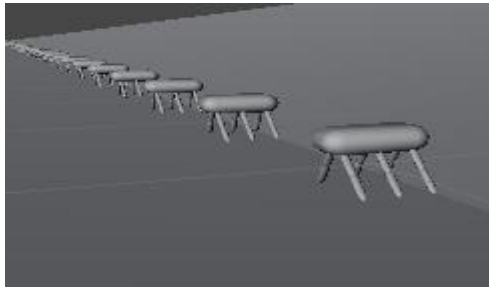


Figure 1. 実験空間

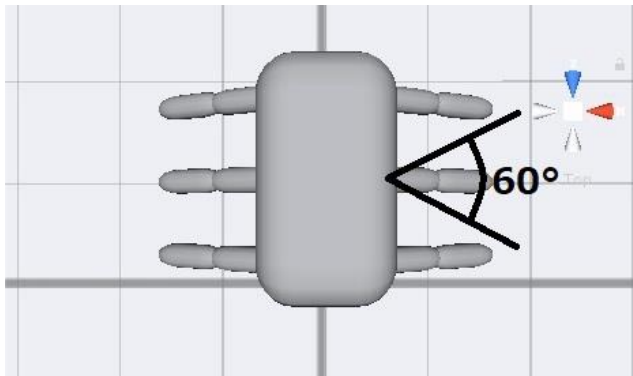


Figure 2. 6本脚モデル（上面図）

られる。

そこで本研究では、先行研究を踏まえ、仮想物理空間上で、多脚生物モデルにおける歩行動作を、GAによって獲得する。パラメータの再調整を行い、空間上に障害物として傾斜を設置した。その上で、自然界で観察される脚数で、安定した歩行を行うに至った進化的経緯を調査する。なお、ここでの安定した歩行とは、転倒等で胴体が地面に接触せず、跳躍しない歩行を指す。

2. 実験

物理演算が可能なゲームエンジンである Unity[6]を用い、3次元仮想物理空間上でモデルの歩行動作をシミュレーションする。空間上には障害物として、0度から3度刻みで9度までの傾斜を設置する。このとき、Figure 1において左上から右下へ、平面と傾斜の境界線があり、傾斜は右肩上がりに設置する。モデルの形状はFigure 2のように6本脚を基にし、物理法則を適用可能なコンポーネントである RigidBody を適用する。他の脚数のモデルについては、脚数と比例して胴体の長さを設定する。また、脚の長さや太さは全てのモデルで統一し、モデルに対して前後左右均等に配置する。関節は脚の付け根にのみ設定し、回転角を制御可能なコンポーネントである Character Joint を適用する。回転範囲は前後方向に60度、上下方向に30度とする (Figure 2, Figure 3)。脚の動作は、持ち上げる、前に動かす、下におろす、後ろに動かす、という最低4動作必要と考えられるため、4動作を1ループに設定し、10秒間繰

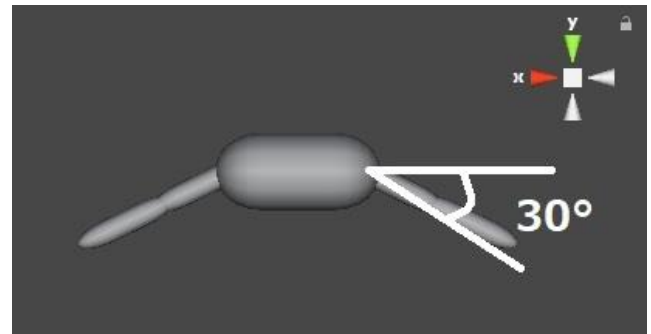


Figure 3. 6本脚モデル（上面図）

り返す。これを1世代として200世代まで進化する。個体の選択にはエリート保存を用い、次世代へ上位2個体残す。残りの38個体は交叉で生成する。突然変異率は1%である。初期状態として、モデルに対して左右方向一列に40個体を配置する。歩行動作は前後方向へ一斉に行う。初期位置から、より前方へ離れた個体が高い評価値を出すよう設定する。後方へ動く個体や転倒する個体は、後方への移動距離や転倒回数に応じて、ペナルティとして負の評価値を加える。この条件で6, 10, 12, 18本脚において傾斜を各角度に設定し、4回ずつ、合計16回実験を行う。

3. 実験結果および考察

各脚数の1回目から4回目の実験における世代ごとの評価値の平均値を、傾斜の角度毎に、Figure 4に示す。なおFigure 4(d)については、6本脚13世代までの評価値が著しく低く、グラフの形状比較がしづらいため14世代以降のデータをまとめた。Figure 5は、世代ごとの評価値の平均値を、脚数ごとにまとめたグラフである。まず、6本脚、10本脚の場合や、12本脚で傾斜が6度、9度の場合にグラフの起伏が激しいが、これは脚をうまく動かさずに転倒する個体が多いことを表している。

さて、傾斜がどの角度の場合も、6本脚の評価値が最も低く、次いで18本脚の評価値が低い。6本脚のモデルは、転倒せずに歩行を行う個体が少なく、ペナルティによって評価値が伸びづらかったと思われる。18本脚のモデルは、転倒する個体は少なかったものの、それぞれの脚を効率的に動かせないためと考えられる。また、12本脚を除いて、どの脚数においても、200世代目で最も評価値が高いのは、6度の場合である。ただし、0度と6度の場合の評価値の差は、9度の場合と比較して大きくない。つまり傾斜が0度より大きく、6度以下であれば、平面と同様の歩行動作であっても、比較的前進しやすいといえる。

次に、動作を確認すると、脚数の半分程度の脚を1組として、交互に動かす動作を獲得した個体も存在した。6本脚のモデルでは、転倒する個体が多数であったものの、中には胴体を前後に揺らすことで前進する。しかし進行距離は伸びづらかった。また、脚数が増えるにつれて、1度す

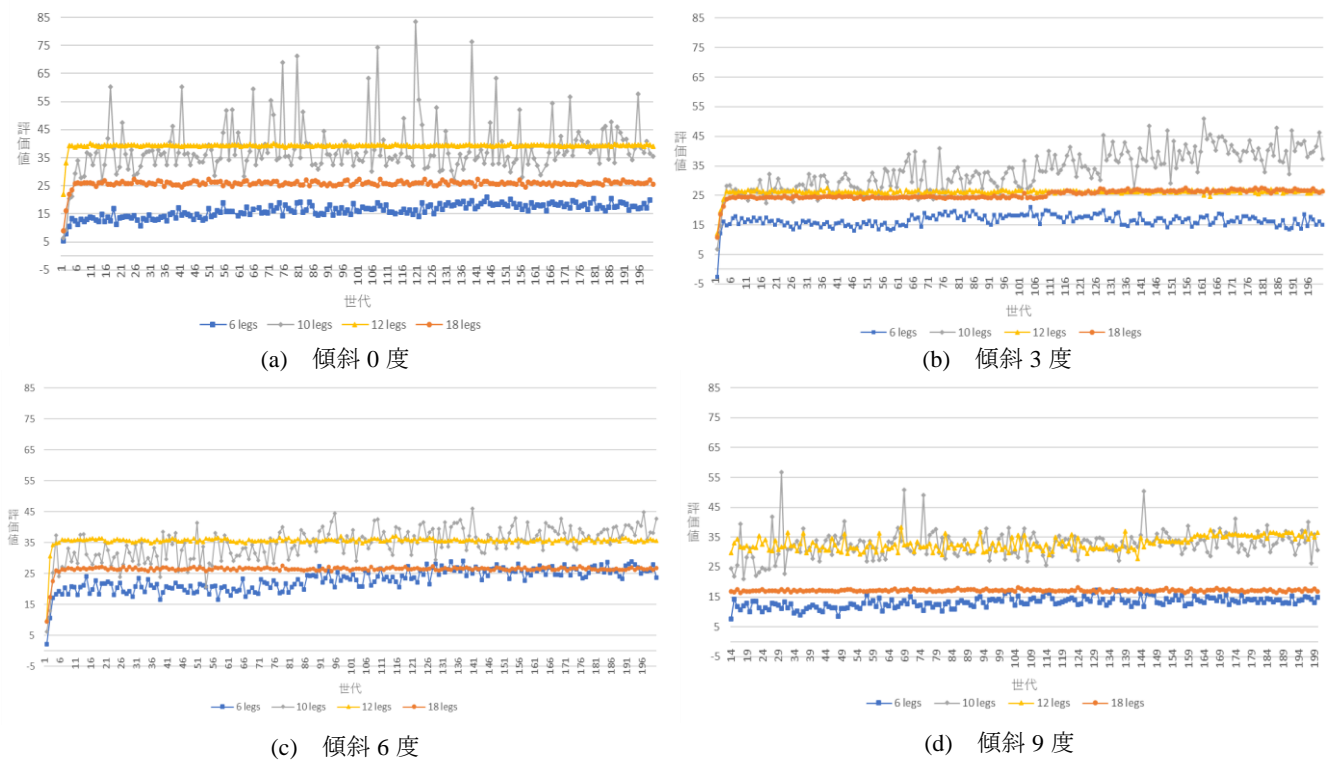


Figure 4. 傾斜の角度ごとの評価値の推移

すべての脚を後方へ折りたたみ、起こす勢いで前進する動作がみられた。脚数が増えると、それぞれの脚を効率的に動かさなければ進行距離は伸びづらい。しかし、胴体の重さと、胴体を脚で持ち上げる高さによっては、落下の衝撃で弾むことが、他の動作に比べて進行距離が伸びやすい。このことから上記の動作を獲得したと考えられる。

さらに、脚数に着目すると、6, 10 本脚では 200 世代目の評価値が最も低いのは 9 度で、評価値が最も高いのは 6 度の場合である。18 本脚においても 9 度の場合に評価値が最も低くなるのは共通している。特にこの脚数では傾斜が 0 度から 6 度までの評価値と、9 度の評価値を比較すると、明らかに 9 度のみ評価値が低いことがわかる。12 本脚では、評価値が最も高いのは 3 度、評価値が最も低いのは 6 度の場合であるが、0 度と 3 度、および 6 度と 9 度の評価値は僅差である。したがって、12 本脚を考慮しても、6 度程度までは平面の場合と比較的近い歩行動作で前進可能である。しかしそれより傾斜が大きくなると、前進しづらくなることがわかる。

ところで、モデルの脚数を比較すると、それぞれ 3, 5, 6, 9 対の脚をもつ。グラフでは 10 本脚が最も不安定であり、唯一 3 の倍数ではない脚数である。さて、自然界において、2 本脚や 4 本脚などで安定した歩行を行う生物は多数存在する。しかし実験では、6 本脚でも既存の生物のよ

うな安定した歩行をすることはなかった。2 本の脚をもつ人間や、4 本の脚をもつ猫などの脊椎動物は、半規管と耳石器などの平衡器官によってバランスをとることができる。また、昆虫やクモなどの無脊椎動物は触毛やジョンストン器官などの機械的受容器官によって平衡感覚を保つ。しかし本研究で扱ったモデルには平衡感覚を担う部分が存在しないため、これが原因のひとつと考えられる。

4. 結論

今回の環境では、脚数が 6 本、10 本の場合は歩行動作が安定せず、転倒する個体が多数であった。ただし、胴体を地面から浮かせた動作を獲得した個体も存在した。12 本以上では、ある程度歩行動作は安定するものの、傾斜が大きくなると、評価値を伸ばすのが難しかった。しかし、歩行動作自体は脚数が多くなるにつれて安定する傾向があり、評価値は 18 本脚が最も安定した。脚数の観点では 10 本脚、12 本脚付近に安定した歩行動作が可能かどうかの閾値があるが、考察でも述べたように、3 の倍数ではない対の脚数における実験を行い、その差を確認する必要がある。また、脚数に関わらず、傾斜が 9 度の場合に、他の角度と比べて評価値が低い傾向がある。ただし、ただ前進するだけでなく、よりよい歩行動作を学習によって獲得することや、少ない脚数での歩行動作の獲得を考えると、転倒や後方移

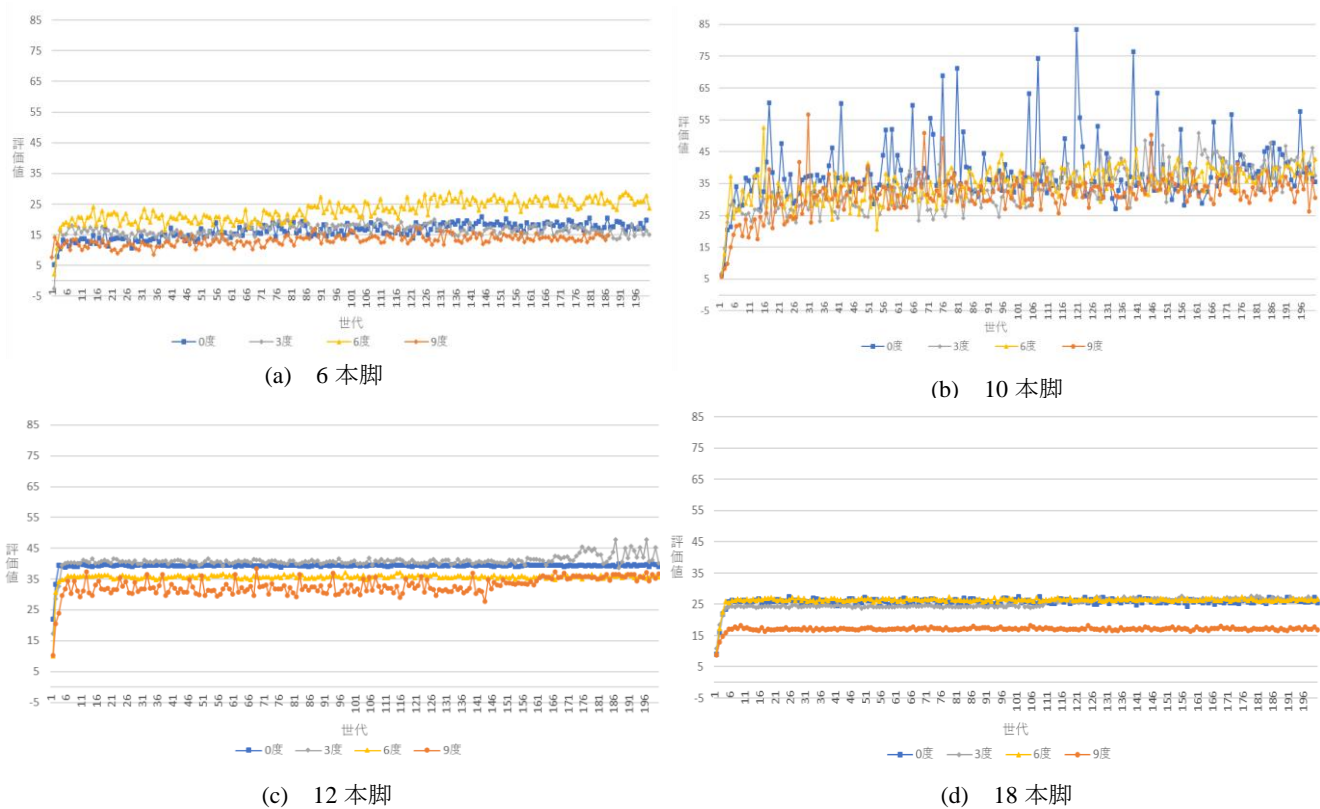


Figure 5. 脚数ごとの評価値の推移

動へのペナルティのみでは不十分であることが考えられる。モデルに自身の胴体の状態を検出する機能をつけることが必要不可欠であり、この有無が自然界でみられる脚数で安定した歩行を行うことが可能かどうかの差であると考えられる。

参考文献

- [1] “Spider Evolved Spare Legs”, NATIONAL GEOGRAPHIC, 2011, <https://www.nationalgeographic.com/animals/article/110603-spider-s-spare-legs-webs-science-animals>, (参照 2020- 11)
- [2] 稲垣克彦, 小林尚登:「脚の欠損を考慮した 6 脚歩行機構の適応ウェブ歩容」, 日本ロボット学会誌, Vol.13, No.8, pp.1122-1129 (1995)
- [3] 石川卓規:「個性的な生物のシミュレーション」, 東海大学情報理工学部情報科学科卒業論文, (2015)
- [4] Jochen Smolka, Marcus J.Byrne, Clarke H.Scholtz, Marie Dacke : “A new galloping gait in an insect”, Current Biology, Volume 23, Issue 20, Pages R913-R915, (2013)
- [5] 中嶋晃彦, 染谷博司:「仮想多脚生物モデルの進化的歩獲得シミュレーション」, 計測自動制御学会 第 34 回自律分散システムシンポジウム予稿論文集, p.55 (2022)
- [6] “Unity ユーザーマニュアル”, Unity Documentation, 2019, <https://docs.unity3d.com/ja/2019.4/Manual/UnityManual.html>, (参照 2021-06)