

2 リンク機構による生物学的運動の解析

Analysis of Biological Movement Using Two-Link Mechanism

青野 直也^{1†} 森田 寿郎¹ 植田 一博²

Naoya Aono^{1†}, Toshio Morita¹, and Kazuhiro Ueda²

¹ 慶應義塾大学機械工学科

¹Department of Mechanical Engineering, Keio University

² 東京大学大学院情報学環/JST CREST

²Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo & JST CREST

Abstract: Most researches on animacy perception have not addressed whether we perceive animacy or not from the movement of a structural object. We thus focused on two-link mechanism, as the simplest mechanism of structural objects, and experimentally tested whether observers perceived animacy or not from open-close movement of a two-link rigid arm. We also specified the important physical quantities of movement from which they clearly perceived animacy. As results, we found that observers perceived animacy from the movements that had almost the same physical quantities as the movements of real creatures did, such as human walking and birds' flapping their wings.

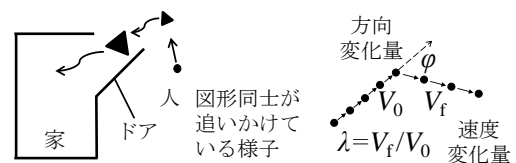
1. まえがき

近年のロボット分野の発展は目覚ましく、一般社会でのロボットの実用化も進みつつある。特に、ホンダの人間型ロボットの ASIMO が開発されて以来、人間型ロボットの研究開発が盛んに行われており、産業技術総合研究所が開発した人との協調・共存型の HRP-2 [1] や、平均的な女性を参考にした HRP-4C [2] などがその代表である。HRP-2 は人が行う日常的な作業や、人との協調作業を目的として制作されており、HRP-4C は人に近い外観を実現し、エンターテインメント分野への応用や人の動作を補助する機械としての応用が期待されている。いずれも、実社会での応用を見越した設計がなされており、「ロボットが人に合わせる」といったコンセプトが求められている。これを実現するための技術の一つとして、人がロボットに対して違和感や恐怖感を覚えなといった生物性や親和性向上の技術が挙げられる。

このような技術を表現するために、ヒューマノイドなどの構造を持った人工物(以下、構造物)に対して、生物性を感じる要因を明らかにする研究が行われている。Miyashita ら [3] はヒューマノイドに人の無意識な振動を加えることで、人に近い振舞いを再現

できるとした。また、Fukuda ら [4] は小型ロボットを用いた実験を行い、対象との相互作用とロボットの運動の両者が生物性の知覚に重要なことを示唆している。このように、人が構造物に対して生物性を感じる要因を明らかにする研究が行われており、特定の種類の運動が生物性の知覚に重要なことが示唆されているが、対象とする構造物が複雑であるため、ゆらぎ等の物理量でしか生物性を感じさせる運動を定義できないという問題がある。

一方で、質点のどのような運動から人は生物性を感じるのかを明らかにしようとする研究もある。例えば、図 1(a) に示す単純な幾何学図形の運動であっても、観測者はあたかも生物であるかのように見なすことが明らかとなっている [5]。また、Tremoulet ら [6] は単純な図形の運動において速度と方向変化量が大きいほど生物性がより感じられることを示しており(図 1(b))、Blythe ら [7] は少数の運動特徴の組合せによって、対象が生物か無生物かのみならず、その意図を推定することもできると主張した。さら



(a) Heider らの実験 [5] (b) Tremoulet らの実験 [6]

図 1 生物性知覚の研究例

1† 現在は東京大学大学院総合文化研究科に所属。

に, Gaur ら[8]は生物性の判別に使われる物理特徴として, 速度, 方向変化の鋭さ, 運動エネルギーの増加を挙げている. このように生物性を感じる要因である運動特徴を速度や方向変化などの物理量によって特定する研究は行われているが, 質点という単純な対象を扱っているため, ヒューマノイドなどの構造物への応用は難しいと考えられる.

このように, ある対象に対して生物性を感じる要因を明らかにする研究は, 質点か複雑な構造物かという両極の対象しか扱っていないと考えられる. 実世界における構造物で, 質点として捉えられる対象は存在しない. 一方, 構造物は系内運動を行うためパラメータによって絶えず形態を変化させる. そのため, 構造物の姿勢を決定する内部のパラメータを, 質点の運動を定義した時と同様に, 運動の明確な物理量で定義する必要がある. しかし, ロボットのような複雑な構造対象を用いた場合, 系内運動の定義は難しいと考えられる.

そのため, 本研究では最も単純な構造物である 2 リンク機構の開閉運動に対して人はどのような生物性を感じるかを調べ, その際に重要となる運動の物理量を分析した.

2. 生物性領域の確認実験(実験 1)

2.1 目的

2 リンク機構は開閉動作といった系内運動と重心の移動といった系外運動を扱うことができる. 1 章で述べたように, 今回は最も単純な構造物である 2 リンク機構を実験に用いたため, 質点でも扱える系外運動ではなく, 構造特有の運動である系内運動のパラメータに着目した. 図 2 に示すような開閉動作による角度 θ_f , 角速度 ω , 周波数 f を考え, これらのパラメータ条件が生物性にどのような影響を与えるかを実験的に検討することを目的とした.

2.2 方法

2 リンク機構の開閉角度 θ_f と角速度 ω の組合せに対して生物性を感じられる領域を特定するために, スティックピクチャの動画を用いた実験を行った.

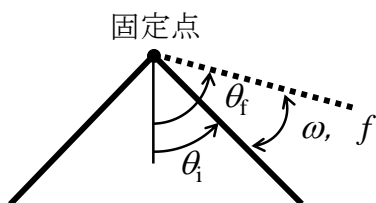


図 2 2 リンク機構のパラメータ

パラメータの条件として, 開閉角度 θ_f は 15° から 15° 刻みで 180° までの計 12 種類, 角速度 ω は $\pi/12, 2\pi/12, 3\pi/12, 6\pi/12, 9\pi/12, 12\pi/12$ rad/s の計 6 種類を用意し, 合計 72 種類の条件で実験を行った. 開閉は固定点を中心に初期姿勢角 $\theta_i = 0^\circ$ から最大開き角 θ_f まで開き, θ_i まで閉じる動作を 1 周期とした. また, 角速度 ω は常に一定のもとで実験を行った.

これらの条件を満たす動画を実験参加者 12 人に対して提示し, 生物性と動作の印象を評価してもらった. 実験参加者は 1 人ずつディスプレイの前に座り, ランダムな順番で再生された 72 種類の動画を評価した. 評価方法とし, 動作に対して生物性を感じたかという生物性評価と, どのような動作に感じたかという印象評価の 2 種類を行った. 生物性は生物性を感じない(1 点)から生物性を感じた(5 点)までの 5 段階評価で, いずれかの点数に印をつけてもらった. また, 印象評価では動画を見て何かの動作に感じた場合は, その内容を自由に記述してもらった. 動画ごとに得られた生物性の評価点数より全実験参加者の平均を算出し, この点数を生物性の評価指標とした. 今回の研究では, この生物性の評価指標が高かったパラメータ条件を, 生物性を感じられる条件として定義した.

2.3 結果

図 3 に, 角度 θ_f と角速度 ω の組合せに対する生物性評価について, すべての試行の平均点数 μ と標準偏差 σ を示した. 正規分布を前提として, 全体の平均点数から $-2\sigma, -\sigma, +\sigma, +2\sigma$ 以上外れた値をもつ条件を色分けして示している. 色が黒い箇所ほど生物性を感じられる領域を示しており, 白い箇所ほど生物性を感じられない領域を示している.

平均点数 $\mu = 2.54$, 標準偏差 $\sigma = 0.50$, 角度 $\theta_f = 30^\circ$ で角速度 $\omega = 6\pi/12$ rad/s の時に評価指標の最大値 3.50, 角度 $\theta_f = 150^\circ$ で角速度 $\omega = 2\pi/12$ rad/s の時に評価指標の最小値 1.42 という結果が得られた. また, 分散分析の結果, 角度と角速度の主効果は有意であり ((F(11, 792) = 3.78, $p < 0.01$), (F(5, 792) = 5.05, $p < 0.01$)), 交互作用も有意なことが示された (F(55, 792) = 2.05, $p < 0.01$). これより, 角度 θ_f と角速度 ω の両方が生物性に影響を与えており, 領域によって感じられる生物性に差が現れることがわかった.

角度 θ_f が $15 \sim 30^\circ$ の領域では生物性評価が高く, 記述があった $\mu + 2\sigma$ における印象評価の 78% が人の歩行運動に関するものであった. これより, この領域では人の歩行を想起しやすいと考えられる. また, 角度 θ_f が $120 \sim 165^\circ$ の領域においても生物性の評価が高く, 記述があった $\mu + 2\sigma$ における印象評価の 100% が鳥の羽ばたき運動に関するものであった. こ

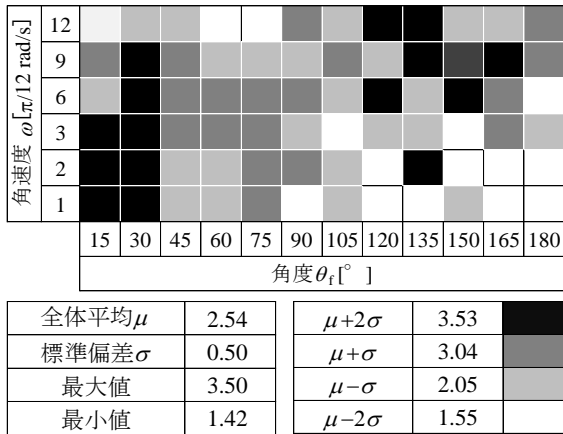


図3 実験1結果

れより、こちらは鳥の羽ばたきを想起しやすい領域であると考えられる。提示した動作は実際の鳥の羽ばたきとは異なるが、角速度 ω の条件によって、実験参加者は鳥の羽ばたきを想起すると考えられる。

以上より、角度 θ_f と角速度 ω の条件によって生物性を感じられる領域が存在することがわかった。今回は特に生物性を感じられた領域として人の歩行、あるいは鳥の羽ばたきと感じられる領域が確認できたため、3章と4章ではこれらの領域に着目した。

3. 歩行領域実験(実験2)

3.1 領域の定義

実験1で得られた結果より、角度 $\theta_f=15^\circ, 30^\circ$ 、角速度 $\omega=\pi/12, 2\pi/12, 3\pi/12, 6\pi/12$ rad/sにおいて人の歩行に感じられる領域を歩行領域として定義する。また、実験1では便宜的に角速度 ω を用いたが、開閉動作を考えるにあたって、これ以降の実験では周波数 f をパラメータとして用いた。

次に、スティックピクチャの動画と人の歩行との対応を考える。歩行中に、どちらかの足の踵が着地してから同じ足の踵が再び着地するまでを1ストライド、その長さをストライド長と呼ぶ[9]。今回は図4に示すように、スティックピクチャの開いた状態から閉じて、また開く動作を1周期とし、これを人の歩行の1ストライドと対応させて考えた。

3.2 目的

実験1より、スティックピクチャの開閉動作に対して、人の歩行に感じる領域が存在していることがわかったため、さらにパラメータの条件を詳細にして、この領域について検討することが目的である。そのパラメータの条件として、実際の歩行に近い角度 $\theta_f=15^\circ$ 、周波数 $f=1.0\text{Hz}$ [9,10]の周辺に設定し、

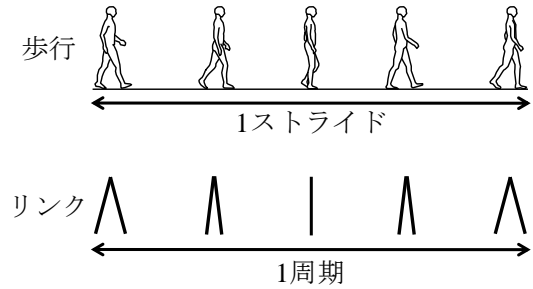


図4 人の歩行とリンクの対応関係

人が実測値に近い動作パラメータを持つ動画に対してどのように生物性を知覚するかを検討した。

3.3 方法

歩行領域では角度 θ_f を 5° から 5° 刻みで 25° まで、周波数 f を 0.5Hz から 0.5Hz 刻みで 3.5Hz までに設定した。開閉は固定点を中心に初期姿勢 $\theta_i=0^\circ$ から最大開き角 θ_f まで開き、 θ_i まで閉じる動作を1周期とした。周波数 f は常に一定の条件下で実験を行った。

これらの条件を満たす動画を実験参加者9人に対して提示し、生物性評価と印象評価をしてもらった。今回は、35種類の動画を2試行ずつ計70試行の実験を実施し、1人の実験参加者において動画ごとに2データずつを得た。なお、実験参加者に対して同じ動画が存在することは知らせずに1人ずつディスプレイの前に座ってもらい、ランダムに再生された動画を評価してもらった。

評価方法として、生物性評価(詳細に確認するため7段階とした)と印象評価を採用した。また、実験の最後に人が歩行をどのように認識しているかという調査を行った。目安となる 10° 刻みの印が付いた用紙を実験参加者に与え、自身がイメージする歩行時の角度 θ_f に線を引いてもらった。なお、実験参加者に対しては自由に線を引くように指示を与えた。

3.4 結果

図5に、歩行領域の生物性評価について、すべての試行の平均点数 μ と標準偏差 σ を示した。横軸に周波数 f 、縦軸に角度 θ_f をとった。表の見方は図3と同様である。平均点数 $\mu=4.24$ 、標準偏差 $\sigma=0.50$ であり、角度 $\theta_f=15^\circ$ で周波数 $f=1.0\text{Hz}$ の時に評価指標の最大値4.89、角度 $\theta_f=20^\circ$ で周波数 $f=3.5\text{Hz}$ の時に評価指標の最小値3.00という結果を得た。

また、分散分析の結果、周波数の主効果は有意であったが($F(6, 595) = 11.56, p < .01$)、角度の主効果と交互作用は有意でなかった($F(6, 595) = 1.41, p = 0.23$)、($F(24, 595) = 1.04, p = 0.42$)。このことより、歩行領域において生物性は、角度 θ_f ではなく周波数 f に依存していることがわかった。

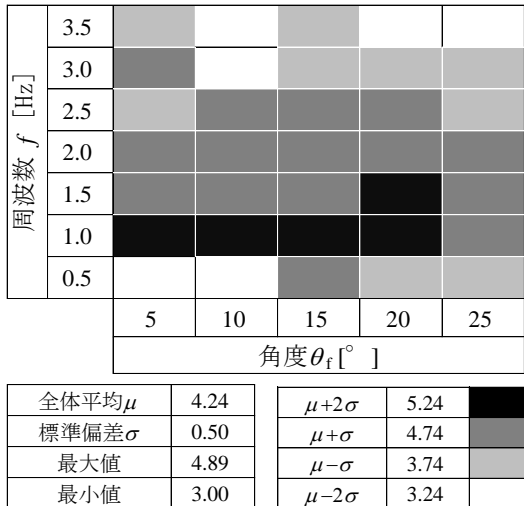


図5 実験2結果

表1 角度認識結果

参加者	1	2	3	4	5	6
角度[°]	40	40	50	64	55	53

参加者	7	8	9	平均	SD
角度[°]	45	50	60	50.3	9.3

図5より歩行領域では5~20°の1.0Hz帯で生物性が強く感じられていたことがわかった。生物性を感じられた領域において、記述されていた印象評価の81%が人の歩行に関するものであり、特に角度 $\theta_f = 15^\circ$ で周波数 $f = 1.0\text{Hz}$ では100%がそうであった。これより、人はこの領域を歩行領域と知覚していると考えられる。また、角度 $\theta_f = 15^\circ$ で周波数 $f = 1.0\text{Hz}$ の時に評価指標の最大値を示しており、これは実測値に極めて近い値であることがわかった。そのため、人は実在する生物の運動に近い運動の物理量に対してセンシティブに生物性を感じていると考えられる。

しかし、角度 θ_f をどのように認識しているかの評価を示した表1を見ると、実測値の30°よりも大きな値として認識している実験参加者がほとんどであり、個人差も大きいことがわかった。そのため、人は歩行運動を意識的なレベルで認識しているわけではなく、無意識的に知覚していると考えられる。

4. 羽ばたき領域実験(実験3)

4.1 羽ばたきに関する定義

4.1.1 動作の定義

これまでの開閉動作とは異なり、図6に示すような水平面に対して上下対称となるスティックピクチャの動画を作成した。最大開き角 θ_f と初期姿勢角 θ_i

の差を開閉角度 ϕ_f と定義した。上下対象動作は中心を固定点として動作を行い、初期姿勢角 θ_i から最大開き角 θ_f まで開き、 θ_i まで閉じる動作を1周期とした。また、動作1周期を周波数 f とし、様々な値に設定して実験を行った。

4.1.2 羽ばたき周波数

文献[11]によれば鳥の羽ばたきは図7のような分布を示す。図7に示すように、昆虫の周波数は100~1000Hz付近に分布している。また、ハチドリの周波数は100Hz付近であるが、その他の普段目にする機会がある鳥の周波数は、体長の大小はあるものの1~8Hz付近に分布している。8~10Hzの周波数で羽ばたき、普段目にするような鳥はあまり見受けられないことになる。

8~10Hzにおける鳥の羽ばたき運動に関する認知的なモデルを人は持っていないと考えられる。しかし、図7より蝶や蛾の周波数は10Hz付近であるため、鳥ではなく蝶や蛾の羽ばたき運動に関する認知的なモデルを持っている可能性がある。そのため、8~10Hzの動作を見た際の印象評価として、生物性を感じない、または蝶や蛾に感じられるといった回答が挙げられると予想できる。これより、実験3では周波数 $f = 1\sim 10\text{Hz}$ の動作に対して人はどのように知覚するかを検討した。

4.2 目的

実験1の結果より、実際の羽ばたき運動でないにも関わらず、角度 $\theta_f = 120\sim 165^\circ$ 、角速度 $\omega = 6\pi/12, 9\pi/12, 12\pi/12 \text{ rad/s}$ 付近で鳥の羽ばたきと感ずる領域が存在しているということがわかった。そのため、スティックピクチャの動作が実際の羽ばたき運動に近く、パラメータが実測値に近い条件の時に、人はどのように生物性を知覚するかを検討した。

4.3 方法

実験1で得られた結果をもとに、開閉角度 ϕ_f を40°から20°刻みで140°までの計6種類に設定した。また、周波数 f は図7より鳥の羽ばたきとして多く実在する1, 2, 4, 6Hzとほとんど実在しない8, 10Hzの計6種類の条件で設定した。周波数 f は常に

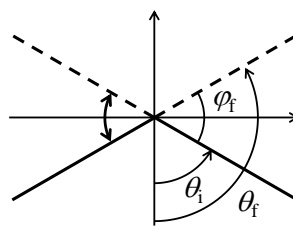


図6 羽ばたき動作定義

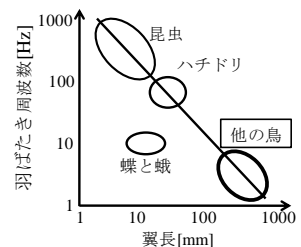


図7 羽ばたき周波数

一定の条件下で実験を行った。

これらの条件を満たす動画を実験参加者 5 人に対して提示し、評価してもらった。今回は、36 種類の動画を 2 試行ずつ計 72 試行用意し、一人の実験参加者において動画ごとに 2 データずつを得た。なお、実験参加者に対して同じ動画が存在することは知らせずに 1 人ずつディスプレイの前に座ってもらい、ランダムな順番に再生された動画の評価してもらった。評価方法は実験 2 と同様であった。

4.4 結果

図 8 に、羽ばたき領域の生物性評価について、すべての試行の平均点数 μ と標準偏差 σ を示した。平均点数 $\mu=3.77$ 、標準偏差 $\sigma=1.19$ であり、開閉角度 $\varphi_f=80^\circ$ で周波数 $f=2$ 、4Hz の時と開閉角度 $\varphi_f=120^\circ$ で周波数 $f=2$ Hz の時に評価指標の最大値 5.30、周波数 $f=10$ Hz で開閉角度 $\varphi_f=40, 120, 140^\circ$ の時と、周波数 $f=8$ Hz で開閉角度 $\varphi_f=40^\circ$ の時に評価指標の最小値 1.80 という結果を得た。また、分散分析の結果、周波数の主効果と角度の主効果は有意であったが ($F(5, 324) = 61.22, p < .01$), ($F(5, 324) = 5.63, p < .01$)), 交互作用は有意でなかった ($F(25, 324) = 0.73, 0.82$)。

図 8 より 80, 100° の 1, 2, 4Hz 付近で高い生物性を感じられていることがわかった。記述があった $\mu+2\sigma$ における印象評価の 100% が鳥の羽ばたき運動に関するものであった。そのため、図 7 に示したように羽ばたきの周波数 f が 1~8Hz の範囲に実在するため、この周波数帯域が羽ばたきに関する認知的なモデルのパラメータだと考えられる。また、実際の羽ばたき運動に近い時でも、ある特定の角度 φ_f でのみ生物性を感じるということがわかった。そのため、実験参加者間で個人差はあるものの、周波数 f と角度 φ_f の両方が羽ばたき運動を知覚する際に重要なパラメータである可能性を示唆している。

さらに、図 8 より 8, 10Hz ではどの開閉角度 φ_f でも生物性を感じられないことがわかった。この原因として、図 7 に示したように 8~10Hz 付近で羽ばたく鳥があまり存在していないため、これらの周波数 f が羽ばたきに関する認知的なモデルのパラメータになっていない可能性が挙げられる。そのため、人は実際の鳥の運動パラメータに対して非常にセンシティブに生物性を感じていると考えられる。ただし、蝶や蛾は 8~10Hz で羽ばたくため、人はそのような認知的なモデルを持っていないとは言いきれない。

以上より、人は実際に存在する生物の運動パラメータに対して非常にセンシティブであり、そこに生物性を強く感じるということがわかった。特に、人の歩行と同様に、周波数が生物性に大きな影響を与えていると考えられる。

周波数 f [Hz]	10						
	8						
	6						
	4						
	2						
	1						
		40	60	80	100	120	140
		角度 φ_f [°]					
全体平均 μ	3.77	$\mu+2\sigma$	6.15				
標準偏差 σ	1.19	$\mu+\sigma$	4.96				
最大値	5.83	$\mu-\sigma$	2.59				
最小値	1.83	$\mu-2\sigma$	1.40				

図 8 実験 3 結果

5. 議論

実験 1 では運動の物理量の組合せから、特定の生物性を感じられることがわかった。また、実験 2, 3 では人の歩行と鳥の羽ばたき運動に着目した結果、人は実際の運動パラメータに近い動作に対して非常にセンシティブであり、そこに生物性を強く感じていることがわかった。これらを踏まえ、構造物の運動から知覚される生物性について議論を行う。

ある目的を構造物で実現するために、生物の持つ特徴や運動を参考に試みは数多くある。例えば、HRP-4C は人と協調作業を行うという目的があり、人に合わせるために人の動作に近付けるという目標があった。これを実現するために、人の歩行動作や全身動作をモーションキャプチャで計測し適用することで、人に近い動作を実現している。また、当時の最高速度 300km を目指した新幹線 500 系の問題解決にも生物の特徴が応用されている [12]。1 つ目はパンタグラフによる騒音を小さくするために、フクロウの羽の形状を応用することでこの問題を解決した。2 つ目に、高速でトンネルに入る時に、トンネルの反対側の出口付近で大きな音が発生する現象があった。カワセミが水中に飛び込む姿から着想を得て、その先端形状を新幹線に採用することで、この問題は解決された。このように、構造物の問題点を解決するために、生物の特徴的な形状や動作がしばしば利用されている。しかし、生物の特徴を生かすデザインは多々あるものの、そのデザインが生物性を感じさせるかどうかに関する議論は心理学やロボット研究以外の分野ではあまり見受けられない。

生物性を議論する研究として、1 章で簡単に述べたように質点の運動に着目したものがある。それらの一連の研究では、単純な幾何学図形の運動であるにも関わらず、その図形に生物性や意図性を感じる

現象が報告されている。この現象では、質点自体の特徴ではなく、質点の運動特徴により生物性を感じているということが指摘されている[13]-[15]。また、速度や方向変化の角度[6]や、運動エネルギーの増加[8]などの運動特徴によって生物性を感じることが明らかにされている。

一方で、ロボットを用いた生物性の研究もなされている。1章で述べた通り、人の無意識の振動[3]やロボットとの相互作用とロボットの運動が持つゆらぎ[4]が生物性の知覚に重要だとされている。しかし、ロボットを対象とした多くの研究では、全体の運動により生物性を規定しているが、ロボットという構造物の系内運動に着目した研究は見当たらない。

このように、生物性を感じる要因を明らかにする研究で扱う対象は、質点か複雑な構造物であるロボットかという極端なものであり、本研究はその間を埋めるものと位置づけられる。また、質点では運動の明確な物理量が特定できているが、構造物になると全体の運動特徴でしか運動を捉えられないといった問題点もあった。本研究によって、構造物としては最も単純である2リンク機構を用いることで、どのような動作によって、人は構造物に生物性を感じるのかを明らかにでき、その時の動作に関わる要因を物理量で明確にすることができたといえる。

山中俊二研究室[16]では、生物の形状を模倣せずに、人工物に生物らしい動作を実現させることを試みた **Flagella** というロボットを製作した。その背景として、人工物の特性上効率的な構造によって、生物らしい人工物を作る方法が確立できれば、ロボット技術の応用範囲が広がるという考えがある。また、生物性の研究とは異なるが、大澤ら[17]は振舞いを非常に簡略化した2軸ロボットを用いて、人への意図伝達が可能であるかを検討し、そのような単純な構造物でも意図伝達は十分に可能なことを示唆している。今回、我々の研究も構造物をどのように動かすと生物性を感じるかというものであり、単純な構造から複雑な構造へと繋げるための研究である。単純な構造物である2リンク機構においても、あるパラメータの条件によって生物性が感じられ、かつそのパラメータの条件は実在の生物の運動パラメータに極めて近いという知見は、構造物に対して生物性を付与する際に有用だと考えられる。

6. むすび

本研究では、最も単純な構造物である2リンク機構を用いて、生物性を感じる運動の条件を調べる実験を行った。角度や周波数といった物理量の組合せにより、ある特定の生物を感じられる領域が存在し、

実在する生物の運動の物理量に極めて近い動作に対して人はセンシティブに生物性を感じることがわかった。これより、単純な構造物でも生物性を持った運動を実現できることが示され、動く構造物に生物性を付与するための基盤が示唆できたと考えられる。

参考文献

- [1] 横井一仁: 人間型ロボット HRP-2, 日本機械学会誌, Vol. 109, No. 1051, pp. 438-439 (2006)
- [2] 金子健二他: サイバネティックヒューマン HRP-4C の開発—プロジェクト概要からシステム設計まで”, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 7, pp. 853-864 (2010)
- [3] T. Miyashita, H. Ishiguro: Human-like natural behavior generation based on involuntary motions for humanoid robots, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 48, iss. 4, pp. 203-212 (2004)
- [4] H. Fukuda, K. Ueda: Interaction with a moving object affects one's perception of its animacy, *International Journal of Social Robotics*, Vol. 2, No. 2, pp. 187-193 (2010)
- [5] F. Heider, M. Simmel: An experimental study of apparent behavior, *Am. J. Psychology*, Vol. 57, No. 2, pp. 67-70 (1944)
- [6] J. Feldman, P.D. Tremoulet: Perception of animacy from the motion of a single object, *Perception*, Vol.29, pp. 943-951 (2000)
- [7] P.W. Blythe, P.M. Todd, G.F. Miller: How motion reveals intention: categorizing social interactions, In Gigerenzer, G., Todd, P.M. & the ABC Research Group(Ed.), *Simple heuristics that make us smart*, New York, Oxford University Press (1999)
- [8] V. Gaur, B. Scassellati: Which motion features induce the perception of animacy?, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference for Development and Learning*, Bloomington, Indiana (2006)
- [9] 山崎信寿, 鈴木隆雄, 河内まき子, 楠本彩乃, 西沢哲: 足の事典, 朝倉書店, 東京 (1999)
- [10] 中村隆一: 歩行の基礎知識-神経生理を中心として-, *理学療法*, Vol. 1, pp. 5-15 (1984)
- [11] エアロ・アクアメカニズム研究会: エアロアクアバイオメカニクス—生き物に学ぶ泳ぎと飛行のしくみ—, 森北出版, 東京 (2010)
- [12] 岡崎章: 感性デザインとは-デザインを知る、感性を知る, *デザインコンパス*, 茨城 (2009)
- [13] B. Rime, B. Boulanger, P. Laubin, M. Richir, K. Stroobants: The perception of interpersonal emotions originated by patterns of movement, *Motivation and Emotion*, vol. 9, no. 3, pp. 241-260 (1985)
- [14] N. Bloom, C. Veres: The Perceived intentionality of groups, *Cognition*, Vol. 71, iss. 1, pp. B1-B9 (1999)
- [15] B.J. Scholl, P.D. Tremoulet: Perceptual causality and animacy, *Trends in Cognitive Sciences*, Vol. 4, iss. 8, pp. 299-309 (2000)
- [16] 慶應義塾大学 SFC 研究所 成果報告書, <http://www.kri.sfc.keio.ac.jp/report/mori/2009/c-055/>
- [17] 大澤博隆, 桑山裕基, 今井倫太, 山田誠二: 2軸のアクチュエータのみを用いた意図伝達モデルの検討, 第25回人工知能学会全国大会予稿集 (2011)