

学位論文題名

An Experimental Analysis of Mechanical Design of the Wind Receptor Hair in Cricket-Reverse engineering of biological design

(昆虫気流感覚器の機械設計に関する計測と解析)

学位論文内容の要旨

近年、新しい情報処理システムを生物から学ぼうという気運が高まっている。地球上には実に多様な生物が棲んでおり、それぞれ独特の構造と機能をそなえて環境に適応している。すなわち周囲の環境との相互作用の結果、環境からの淘汰圧を受けて、それぞれの生物はより生存に適した神経系、つまりセンサ・情報処理・制御システムを持つようになったと考えることができる。このような進化の過程は、工学的には試作品の実用評価と設計変更の繰り返しに対応する。現存する生物の感覚器-神経系の構造と機能を調べることは、実環境からの評価に堪えたセンサ・情報処理・制御システムの設計例を明らかにすることであるとともに、設計変更や評価基準の歴史(進化)を明らかにすることにもなる。

生物の感覚器-神経系から工学的な設計例を学ぶ上で、昆虫は非常に魅力的な動物である。それぞれの刺激に対して特殊化した感覚器を持つこと、脊椎動物に比べてシステムを構成する素子すなわち神経細胞数が極端に少なく解析しやすいことが、大きな理由である。また昆虫は我々に比べて桁違いに小型であることから、非常に小型の機械(マイクロマシン)を設計する際の良い指針を与えてくれると期待されている。本論文では非常に小型の生物センサの一例として昆虫の気流感覚器に着目し、気流に対する機械応答特性を計測し、粘性流に関する Stokes 理論を用いて機械系としての諸量を推定し、その設計を明らかにすることを試みた。

コオロギやバッタといった直翅目昆虫、ゴキブリなどは腹部後端に尾葉と呼ばれる2本の突起を持つ。尾葉上には数百本の糸状の感覚毛が放射状に密生している。感覚毛は長さ30-1500 μm 、根元の直径で1-9 μm の幅で様々なサイズのものがあり、いずれも体の周囲の空気の動きを検出する気流センサとしての役割をはたしている。感覚毛はその基部を板バネで支えられて空気中に突出しており、その根元の皮下にそれぞれ1個の感覚細胞を持つ。感覚毛が気流の粘性力を受けて傾くと、その基部が感覚細胞の先端へ機械的な圧縮を加える。感覚細胞はその機械歪に反応して活動電位パルスを生じ、中枢神経系へ信号として送る。多数の感覚細胞から送られた神経信号は中枢で処理されて外界の気流に関する情報となり、最終的には外敵からの逃避などの行動として出力される。気流感覚を発達させた動物は、視覚に頼ることなしに、近くで動く物体を検出することができる。本論文は、このコオロギの気流感覚神経系のうち、気流から感覚細胞までのインターフェースである感覚毛を機械的な気流速度センサとみなして、その設計を解析した結果を述べてある。

本論文は5章からなる。

第1章では本研究の背景として、外界の物理量に対してそれぞれ特殊に感度を向上させた昆虫のセンサの様々な例を解説し、特に機械受容器についての一般的な分類および特徴を概観した。更に、生物の感覚器のメカニズムを明らかにすることは、実在するセンサシステムの設計に学ぶという意味で工学にとっても重要であることを述べた。

第2、3、4章では、実際の生物センサとしてコオロギの気流感覚器の機械特性の計測と解析を行っている。2章ではレーザドップラ速度計を用いて刺激気流とそれに対する感

覚毛の揺れ角速度を計測し、様々な長さの感覚毛で気流応答特性を測定している。気流感覚毛のサイズが極端に小さいためその速度も小さく、レーザドップラ速度計の通常のノイズレベルに埋れた程度の信号強度しか得られない。信号対雑音比を大幅に改善するため、入力信号としてガウス白色雑音 (500 Hz 帯域制限) で気流を駆動し、感覚毛の揺れ速度についての計測器出力との相互相関関数から、入出力間のインパルス応答を求める方法を用いた。この方法で観測時間と入力信号のパワースペクトル密度をあげて信号対雑音比を改善できた。様々な長さの感覚毛の気流流速-感覚毛角変位間の周波数領域伝達関数を測定した結果、全ての感覚毛はバンドパスフィルタ特性を示した。その最適周波数は感覚毛の長さにはほぼ逆比例して変わり、160-600 μm の短いもので100-200 Hz、600-900 μm では50-80 Hz、1000-1500 μm の最も長いものでは30-60 Hzであった。また、いずれの長さの感覚毛も振幅特性に鋭い共振点を持たず、位相特性の勾配もゆるく、強い制動を受けた機械系であることがわかった。

3章では気流感覚毛の正確な形状を走査型電子顕微鏡により調べた結果を記している。これは、第2章で得たデータに基づいて、第4章で感覚毛の機械的なパラメータを求めるのに先だって、感覚毛が気流から受ける粘性トルクの理論値を正確に算出するためである。感覚毛の先端から基部へ向かって、いくつかの場所でその直径を計測し、先端からの距離との関係を求めた。計測の結果、感覚毛は従来考えられていたような単純な円錐型ではなく、直径が先端からの距離の1/2乗に比例して太くなる、非常に細長い回転方物面の形状を持つことが明らかとなった。同様の測定をゴキブリの気流感覚毛についても行ったところ、コオロギの場合と同じ結果を得た。

第4章では、2章で得た感覚毛の運動特性に基づいて、感覚毛の機械設計を推定している。感覚毛を、その基部をバネで支えられた倒立振子とみなして、その運動を特徴づける機械的パラメータ、つまり感覚毛の根元まわりの慣性モーメント(I)、毛を支えるバネの硬さ(S)、根元まわりの角運動に対する内部抵抗(R)の3つをを最小自乗法で逆算した。その際、気流が感覚毛を駆動する粘性力は、粘性流体中で横方向に振動する円柱が示す複素機械インピーダンスに関する Stokes (1851) の理論に3章で得た感覚毛の直径をあてはめて求めた。長さ160 μm から1500 μm におよぶ様々な感覚毛についてI、R、Sを求めた結果、Iは感覚毛の長さの4.32乗、Sは1.67乗、Rは2.77乗といずれも明確なサイズ依存性を持つことを明らかにした。内部抵抗Rは本研究で初めて測定されたもので、予想外に大きな値を示した。内部抵抗Rの本体は不明であるが、その値と長さ依存性はStokesの複素機械インピーダンスの実部で決まる気流-感覚毛間の粘性摩擦抵抗の値に近い。すなわち、気流から感覚細胞までの機械系はインピーダンス整合しており、気流から感覚細胞へのエネルギー伝達効率も最大となっている。このことから、内部抵抗Rは感覚細胞による機械エネルギーの吸収を表していると考えられる。

第5章では本研究の結果を要約し考察を加えた。今回測定・解析した気流感覚毛の構造はすべて、いくつかの細胞の合成・分泌活動によって作り上げられる。この構造を実現するに至った進化の過程での実際の淘汰圧が何であるかは不明であるが、機械パラメータに長さ依存性を持たせて2桁にわたる周波数帯域をカバーするフィルタアレイを実現していることが明らかとなった。また、今回求めた内部抵抗Rの値を用いて感覚細胞の反応に必要な最低のエネルギーを推定すると、常温における熱擾乱ゆらぎ kT に近いことも明らかにした。すなわち、この気流感覚細胞は長年にわたる感度の向上の結果、熱雑音ゆらぎに出合っているらしいことも明らかとした。このような熱雑音源を含む感覚器の動作の解析は今後の研究として残された。以上、本研究は、比較的単純な生物センサの設計を工学的に計測・解析し、さらに内部のメカニズムとして情報工学的に検討すべき問題点も明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 下 澤 楯 夫
副 査 教 授 狩 野 猛
副 査 教 授 山 本 克 之
副 査 教 授 河 原 剛 一
副 査 教 授 宮 永 喜 一

学位論文題名

An Experimental Analysis of Mechanical Design of the Wind Receptor Hair in Cricket-Reverse engineering of biological design

(昆虫気流感覚器の機械設計に関する計測と解析)

近年、工学設計を生物から学ぶ気運が高まっている。生物の進化の過程を工学的に見れば、試作品の実環境評価と設計変更の繰り返しに対応する。現存する生物の感覚器・神経系の構造と動作を調べることで、実環境からの評価に堪えたセンサ・情報処理・制御システムの設計例を明らかにできる。

昆虫は、刺激に特殊化した感覚器を持つ一方で、神経細胞数が脊椎動物に比べて極端に少なく、工学的に解析しやすい。また昆虫は、我々に比べて桁違いに小さく、非常に小型の機械を設計する際の良い指針を与えてくれる。本研究は、非常に小型の生物センサとして昆虫の気流感覚器に着目し、その機械力学設計を解析している。気流感覚器は、気流からの粘性力を受けて傾くと、中枢神経系へ信号を送る。気流感覚を発達させた動物は、視覚に頼ることなしに、近くで動く物体を検出できる。本論文は、コオロギ気流感覚毛の気流に対する機械応答特性を計測し、粘性流に関する Stokes 理論を用いて機械系としての設計を解析しており、5章より成る。

第1章では、本研究の背景として、外界の物理量に対してそれぞれ特殊に感度を向上させた昆虫の感覚器を解説し、機械受容器の分類および特徴を概観している。

第2章では、コオロギの気流感覚器の動特性を計測している。レーザドプラ速度計を用いて刺激気流とそれに対する感覚毛の揺れ角速度を計測し、様々な長さの感覚毛で気流応答特性を明らかにした。気流感覚毛のサイズは極端に小さく、低速度でノイズに埋れたレーザドプラ信号しか得られないことから、入力信号としてガウス白色雑音を選び、計測器出力との相互相関からインパルス応答を求める方法で計測に成功している。様々な長さの感覚毛について、気流速度から感覚毛の角変位までの伝達関数を求め、感覚毛が最適周波数が長さにはほぼ逆比例して変わるバンドパスフィルタ

特性を持つことを明らかにした。いずれの感覚毛も鋭い共振を持たず、位相特性の勾配もゆるやかで、強い制動を受けた2次の機械系であることも示した。

第3章では、気流感覚毛の正確な形状を走査型電子顕微鏡により調べている。これは、第2章の計測データに基づいて第4章で感覚毛の機械設計を解析する際に、感覚毛が気流から受ける粘性トルクの理論値の算出に使われている。計測の結果、感覚毛は、直径が先端からの距離の $1/2$ 乗に比例して太くなる細長い回転放物面の形状を持つことを明らかにした。同様の測定をゴキブリの気流感覚毛についても行い、コオロギの場合と同じ結果を示している。

第4章では、第2章で計測した感覚毛の運動特性に基づいて、感覚毛の機械設計を推定している。感覚毛を、その基部をバネで支えられた倒立振子とみなして、その運動を特徴付ける機械定数すなわち感覚毛の根元まわりの慣性モーメント、毛を支えるバネの硬さ、根元まわりの角運動に対する内部抵抗の3つを最小自乗法で逆算した。気流が感覚毛を駆動する粘性力は、粘性流体中で横方向に振動する円柱が示す複素機械インピーダンスに関する Stokes(1851)の理論を用いて算出している。長さ $160 \mu\text{m}$ から $1500 \mu\text{m}$ におよぶ感覚毛について、これら3つの機械定数を求め、いずれも明確なサイズ依存性を示すことを明らかにした。内部抵抗は本研究で初めて測定されたものである。内部抵抗の値と長さ依存性は、Stokes の複素機械インピーダンスの実部で決まる気流-感覚毛間の粘性摩擦抵抗の値に近く、この機械系が気流から感覚細胞へのエネルギー伝達効率が最大となるインピーダンス整合にあること、内部抵抗が感覚細胞による機械エネルギーの吸収を表していることを明らかにしている。

第5章では、本研究の結果を要約し考察を加えている。気流感覚毛が機械定数に長さ依存性を持たせて2桁にわたる周波数帯域をカバーするフィルタアレイを実現していることを示し、さらに、内部抵抗の値を用いて感覚細胞の応答に必要な機械エネルギーを推定すると、常温における熱擾乱ゆらぎ kT に近いこと、すなわち気流感覚細胞は、感度の向上の末に熱雑音に直面していることも明らかにしている。以上、本研究は、比較的単純な生物センサの設計を工学的な立場から計測・解析し、内部メカニズムの情報工学的考察にも及んでいる。

これを要するに、著者は天与の小型流れセンサである昆虫気流感覚器の動特性を明らかにするとともに、力学的解析を行ってその機械設計についての新知見を得たものであり、生体情報工学および機械工学に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。