

## 論文の内容の要旨

論文題目 昆虫の高度制御システムの研究

氏名 田中 健作

現在、世界各国で数センチメートルから十数センチメートルサイズの小型飛行体 (MAV: Micro Aerial Vehicle) の研究が行われている。しかし、室外で長時間、安定性と飛行性に優れ且つホヴァリングが可能な MAV は、いまだに開発されていない。主な原因としては推進機構の問題、揚力発生メカニズムの問題、飛行制御の問題が挙げられるが、本研究では飛行制御の問題に取り組んだ。

MAV の飛行制御システムを考える上で、自然界を飛行する昆虫は理想的なモデルと言える。昆虫の歴史は 3~4 億年と言われ、長い進化の過程を経て現在に至っている。その間、昆虫は数多くの自然淘汰の洗礼を受けており、飛行制御メカニズムは極めて洗練されていることが推測できる。歴史がその信頼性を保証しているところに、モデルとしての昆虫の魅力がある。近年、そのような昆虫の飛行制御則を MAV の制御系に取り入れようとする研究者が増えつつある。

しかし、肝心の昆虫の飛行制御則に関して、定量的な解明がほとんど進んでいないのが現状である。現在までこの分野の研究を主導してきたのは生物学者であり、静的な飛行条件下における翅の運動や、それに関わる現象を統計的に処理する研究は数多く行われたが、運動の物理モデルは確立されていない。そこで本研究では、昆虫の高度制御飛行に着目し、周波数応答を測定して制御系の伝達関数モデルを導くことを目的とした。

実験昆虫としてはマルハナバチを用いた。一般にハチ類、あるいはハエ類の昆虫は、視覚情報を用いて飛行を制御する。例えば、上向きに移動する光刺激を与えれば、マルハナバチは自分が落下していると錯覚して、高度を回復させるために上昇飛行をする。逆に、下向きに移動する光刺激を与えれば、マルハナバチは自分が上昇していると錯覚して、下降飛行をする。このような性質を利用して飛行実験を行うために、「光刺激装置」と呼ぶ装置を自作した (図 1)。図 2 のような測定システムを構築し、光刺激装置の内部にマルハナバチを固定して、上下に振動する光刺激を与えた。この時のマルハナバチの応答を、ロードセルを用いて上下方向の力として計測した。光縞の振動数を 5 種類 ( $\omega = 3, 6, 12, 24, 47$  rad/s) に変化させて、周波数応答を測定した。

本実験では、開ループ応答と閉ループ応答の測定を行った。測定システムのブロック線図を図 3 に示す。開ループ応答は、図 3 の SW (図 2 の SW に対応) が開いている時の応答である。この時、光縞はマイクロコンピュータに予め組み込まれたプログラムに従い、上下振動する。閉ループ応答は、SW が閉じている時の応答である。この時、マルハナバチの力の応答がマイクロコンピュータに取り込まれる。マイクロコンピュータはマルハナバチの仮想の高度変化を計算し、光縞の位置変化にフィードバックする。閉ループ系において光刺激装置に表示される光縞の位置は、強制振動とフィードバックの効果を重ね合わせたものとなる。

開ループ応答の測定結果の代表例を図 4 に示す。赤い実線は計測した力の生データ、青い実線は赤の波形をロー・パス・フィルタ処理したデータ、緑の破線は光縞の位置を示す。全ての周波数に対して、マルハナバチが応答していることが分かる。ただし高度制御システムの特性を論じるためには、入出力の次元を一致させることが望ましい。そこで、力の応答から計算される仮想の加速度を 2 階積分し、マ

ルハナバチの仮想の高度を計算した。入力を光縞の高度、出力をマルハナバチの仮想の高度として、両者の振幅比と位相差をボード線図にまとめた (図5)。図5より、ゲイン余裕 (GM) と位相余裕 (PM) の値がともに正であることが読み取れる。本結果は、昆虫の飛行制御の動的安定性を定量的に示した初めてのデータである。更に、得られた周波数特性からマルハナバチの高度制御システムの伝達関数を求めた。ゲイン及び位相のクロスオーバー周波数 ( $\omega_{gc}$ ,  $\omega_{pc}$ ) 付近の一致を重視し、なるべく簡単な伝達関数を同定した結果、(1)式の伝達関数によりマルハナバチの応答を近似できることが分かった。

$$B(s) = \left( \frac{11}{s+5} \right) \cdot e^{-0.02s} \quad (1)$$

図5より、マルハナバチのゲイン・クロスオーバー周波数は  $\omega_{gc,bumblebee} \approx 11$  (rad/s) であり、また昆虫の神経・筋肉系の情報伝達遅れの大きさは  $\tau_{e,bumblebee} \approx 0.02$  (s) と言われているため、(1)式は(2)式のように書ける。

$$B(s) = \left( \frac{\omega_{gc,bumblebee}}{s+5} \right)^2 \cdot e^{-\tau_{e,bumblebee}s} \quad (2)$$

これは、パイロット-航空機系で良く知られている「クロスオーバー・モデル」((3)式) に対応する制御モデルと言える。

$$H(s) = \frac{\omega_{gc,human}}{s} \cdot e^{-\tau_{e,human}s} \quad (3)$$

本研究では、(2)式で表されるマルハナバチの高度制御則を、「2乗クロスオーバー・モデル (Square crossover model)」と名付けた。

「クロスオーバー・モデル」と「2乗クロスオーバー・モデル」を用いて、人間とマルハナバチの制御特性を比較した (図6)。最も顕著な違いはゲイン特性である。人間のゲイン特性が入力周波数に対して -20dB/decade で変化するのに対し、マルハナバチのゲイン特性は -40dB/decade で変化する。その結果、低周波数域のゲインはマルハナバチの方が人間よりも高い。これは、マルハナバチの方が定常特性に優れていることを意味する。一方、高周波数域においては、マルハナバチの方がゲインが小さくなる。これも、雑音の影響を抑えるために望ましい特性と言える。また、速応性の指標となるゲイン・クロスオーバー周波数の大きさは、マルハナバチの場合、パイロット-航空機系の約2倍であることが読み取れる。減衰特性の指標となる位相余裕の値は、マルハナバチとパイロット-航空機系の場合でほぼ等しい。以上より、マルハナバチは、パイロット-航空機系の制御システム以上に定常特性と過渡特性の望ましい両立を果たしていることが分かった。

次に、閉ループ応答の測定結果を示す。閉ループ測定では、フィードバック・ゲイン  $K$  を 1, 0.5, 2 に変化させて測定を行った (図3)。測定結果を(4)式の閉ループ伝達関数と比較した。ただし、 $M(s)$  は力測定システムの伝達関数である。

$$G_K(s) = \frac{K \cdot B(s)M(s)}{1 + K \cdot B(s)M(s)} \quad (4)$$

通常のフィードバックである  $K=1$  の結果を図7に示す。(4)式の伝達関数 ( $G_1(s)$ ) は、ゲイン・位相共に測定結果とほぼ一致することが分かる。 $\omega = 47$  (rad/s)でのゲイン特性がずれるのは、測定結果に誤差が含まれるためだと考えられる。応答があまり小さい時はゲインと位相の読み取りが不可能であるため、データから除外した。 $\omega = 47$  (rad/s)における実際の応答の平均値は図7に示したデータよりも小さいことが考えられ、 $G_1(j\omega)$ の特性に近付くことが推測できる。以上を考慮すると、マルハナバチは(2)式で示した開ループの制御則をほとんど変化させずに閉ループ飛行を行っていることが分かる。

次に、 $K=0.5$ の結果を図8に示す。測定結果と  $G_{0.5}(s)$ 及び  $G_1(s)$ の周波数特性を示した。特に低周波数

域の位相特性に着目すると、 $G_{0.5}(s)$ よりも $G_1(s)$ の方が測定結果との一致が良いことが分かる。また、 $K=2$ の結果を図9に示す。測定結果と $G_2(s)$ 及び $G_1(s)$ の周波数特性を示した。 $G_2(s)$ は共振が大きく不安定である。しかし、マルハナバチは明らかに安定な制御を行っている。位相特性に関しては $G_2(s)$ の方が測定結果に近いが、全体の制御特性は明らかに $G_1(s)$ に近い。以上より、マルハナバチは環境の変化に適応し、自らの制御特性を変化させることで、一巡伝達関数の形を「2乗クロスオーバ・モデル」に整えるように高度制御を行うことが分かった。この性質は、人間が一巡伝達関数を「クロスオーバ・モデル」に従うように適応制御を行う性質と類似している。

最後に、「2乗クロスオーバ・モデル」がMAVの制御系設計に果たす役割を考察した。現在、昆虫の応答特性をMAVの飛行制御に適用しようとしている研究者は他にもいるが、彼らが注目しているのは「motion-detection response」と呼ばれる応答である。これは、昆虫が視対象の移動(optic flow)を検知して、その速度の大きさを一定に保つように飛行制御するというものである。応答はoptic flowの方向によって変化しないのが特徴である。一方で、昆虫の応答には「optomotor response」と呼ばれるものがある。これは、昆虫が視対象の移動方向を検知して、それを追いかけるように飛行するというものである。本研究の測定結果は明らかにoptomotor responseに基づく。これら2つは類似の光刺激に対して現れる異質の応答であり、応答を分岐する要因はいまだに解明されていない。本研究では、昆虫の飛行制御システムとして多重ループの構造を仮定することで、2つの応答の役割を説明した。(図10A)。このモデルを用いて過去の研究を整理すると、optomotor responseは飛行の安定化を目的とした応答であり、motion-detection responseは飛行経路の最適化や速度制御に用いられる応答だと考えられる。このような制御ループはパイロット-航空機系でも同様である(図10B)。パイロット-航空機系の制御ループにおいて「クロスオーバ・モデル」が内部ループの制御則として用いられるのと同様、本研究で求めた「2乗クロスオーバ・モデル」も昆虫の高度制御系における内部ループの制御則だと考えられる。現在、optomotor responseをMAVの制御系に取り入れる試みは少ないが、「2乗クロスオーバ・モデル」をMAVの高度制御システムの基底の制御ループとして組み込むことにより、上下方向の飛行安定性を向上させることが期待できる。

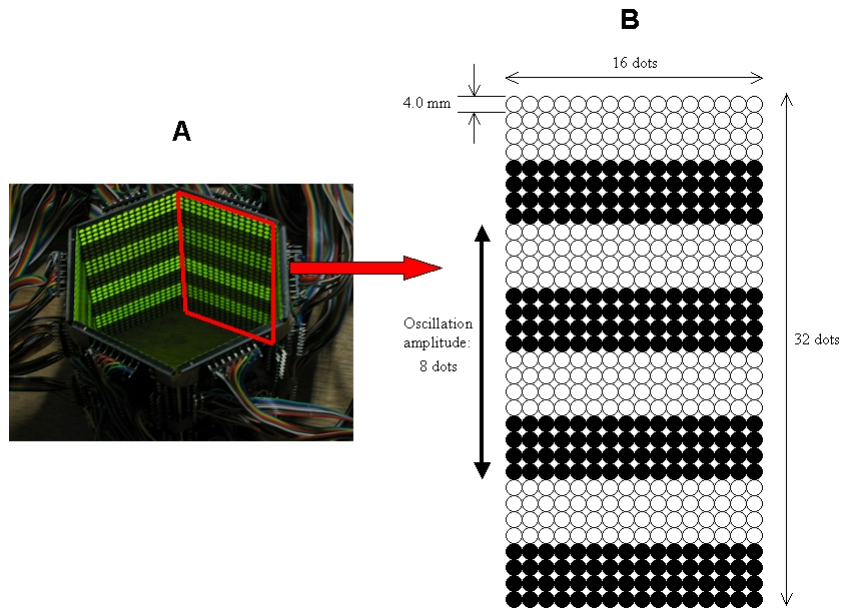


図1 (A) 光刺激装置の外観 (B) ディスプレイを構成する LED の配置と光縞表示

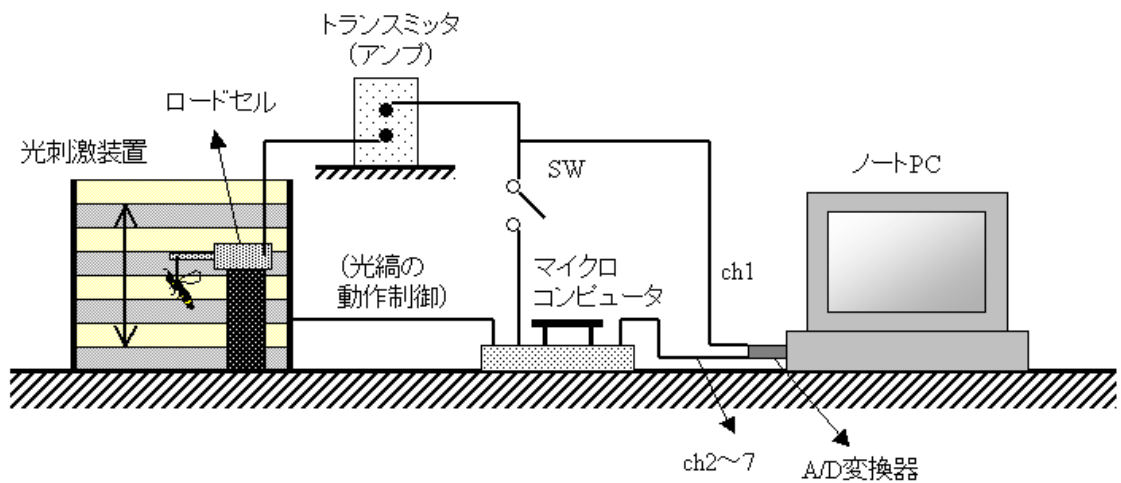


図2 測定システム

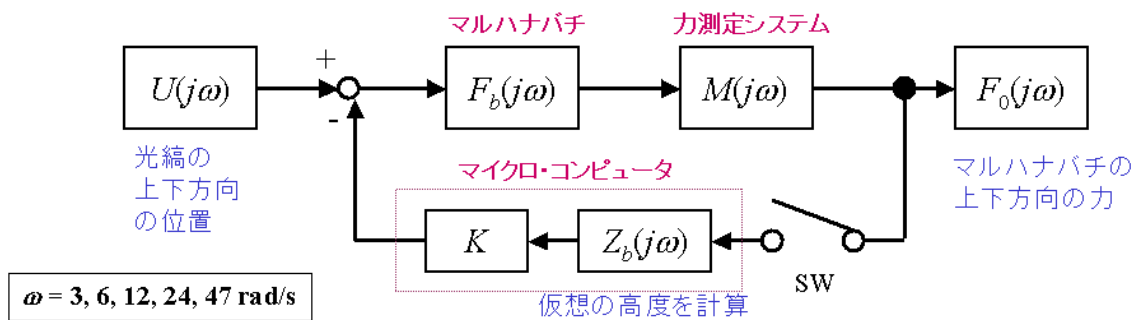


図3 測定システムのブロック線図

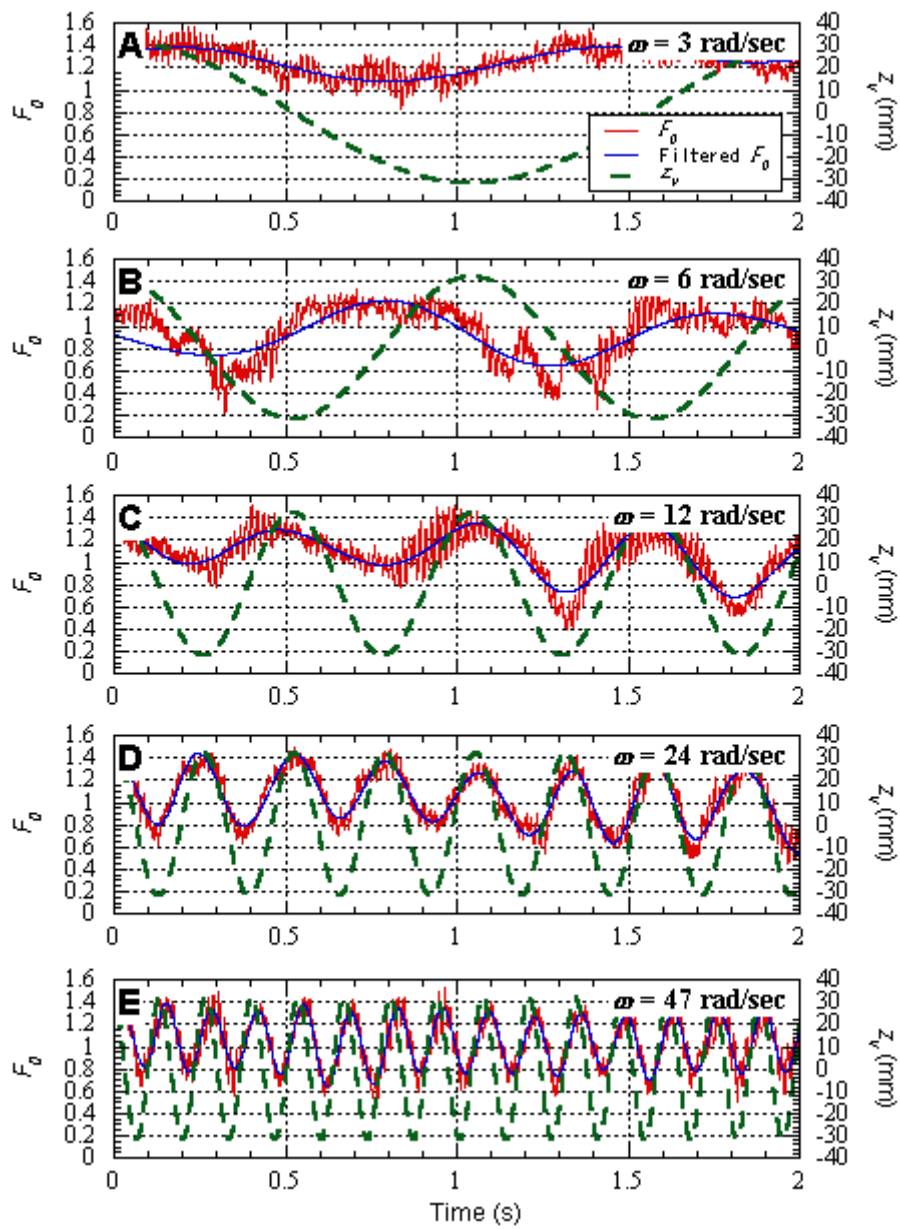


図4 マルハナバチの開ループ応答（光縞振動に対する上下方向の力の応答）

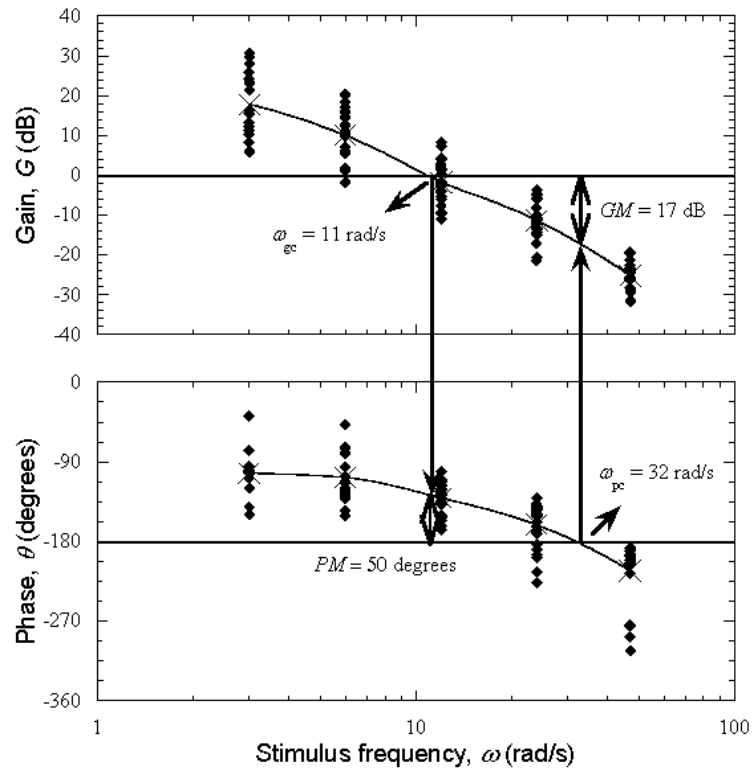


図5 マルハナバチの開ループ周波数応答結果と安定余裕

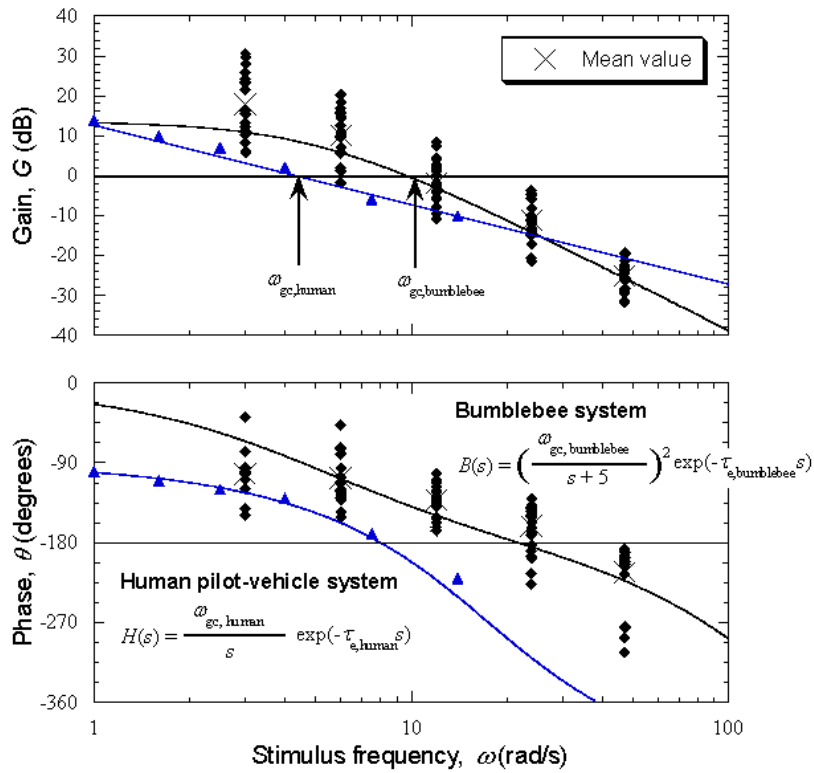


図6 マルハナバチの高度制御システム（2乗クロスオーバー・モデル）とパイロット・航空機系の制御システム（クロスオーバー・モデル）の比較

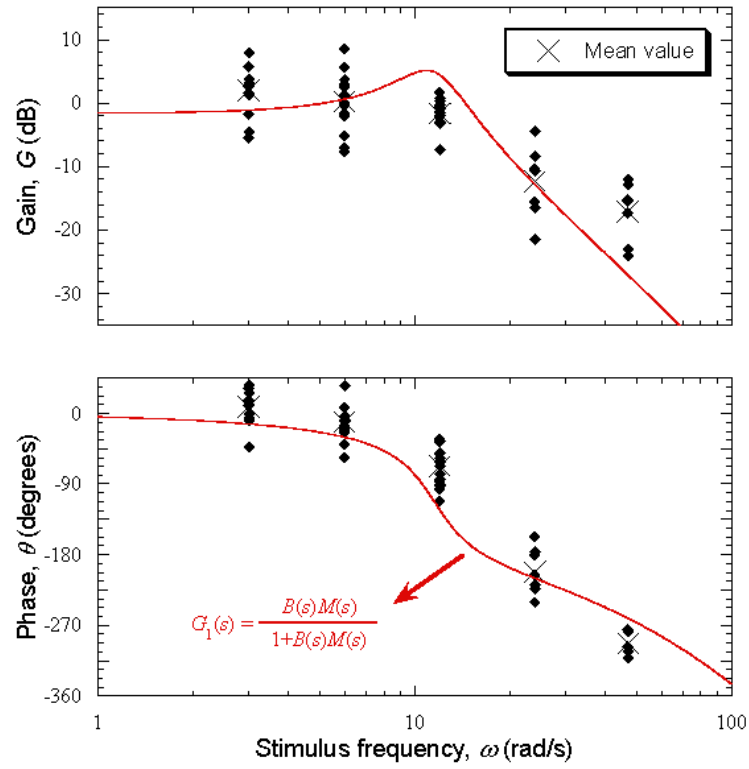


図7  $K=1$  の時の閉ループ応答

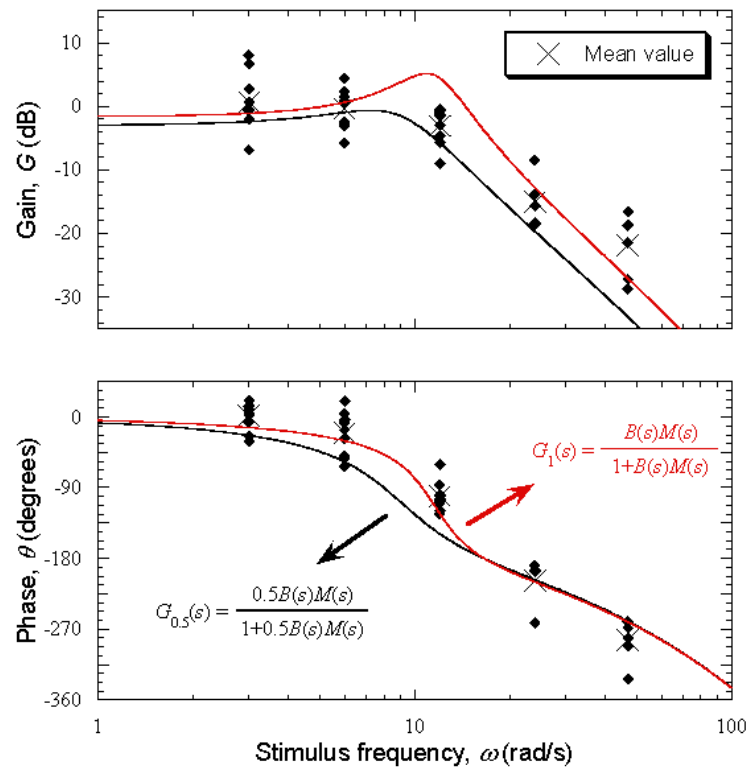


図8  $K=0.5$  の時の閉ループ応答

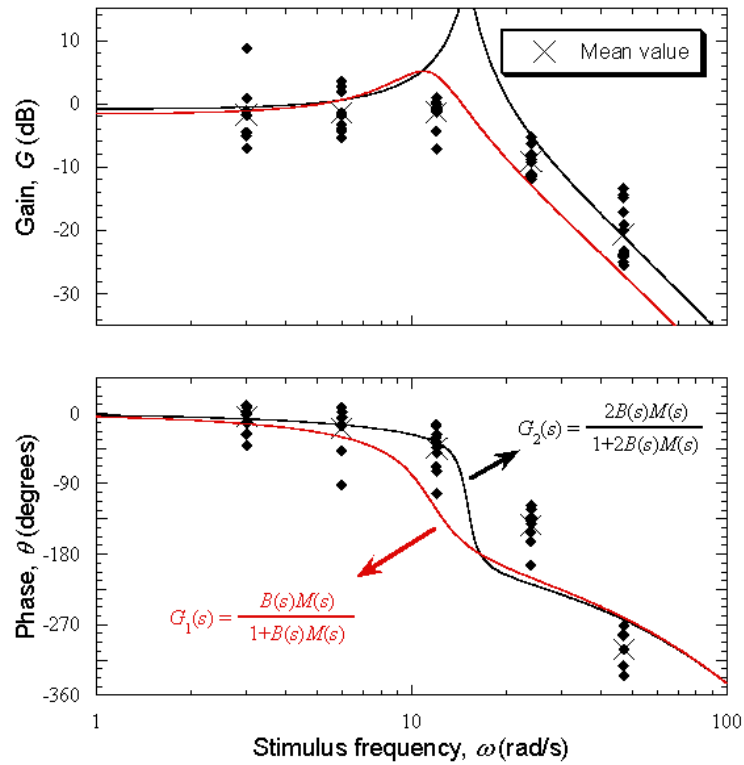
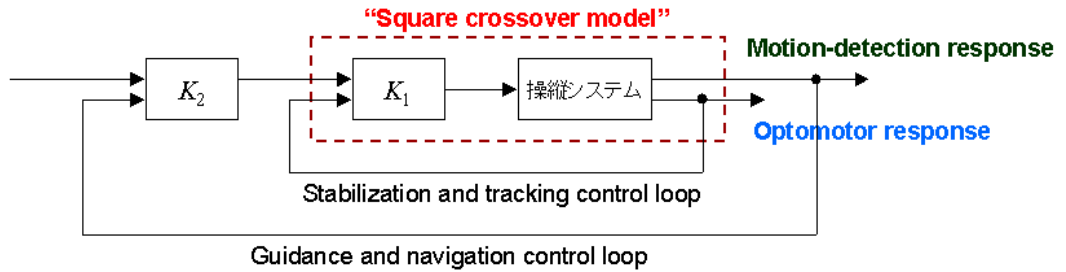
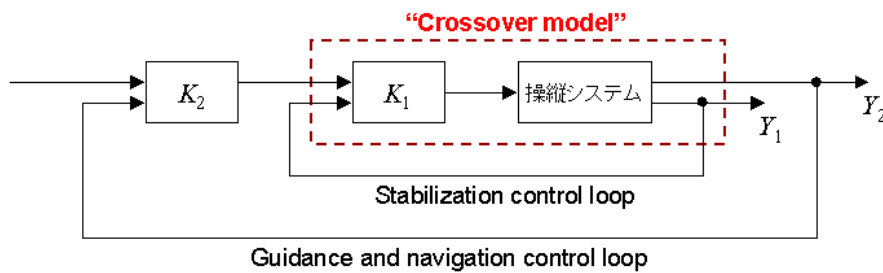


図9 K=2の時の閉ループ応答

昆虫の飛行制御ループの仮定



パイロット-航空機系の飛行制御ループ



<b>K<sub>1</sub>の例</b>	<b>K<sub>2</sub>の例</b>
SAS (Stability Augmentation System)	TMS (Thrust Management System)
CAS (Control Augmentation System)	FMS (Flight Management System)

図10 昆虫の飛行制御ループの仮定, 及び一般の航空機の飛行制御ループ