

2015 年度 卒 業 論 文

走光性を持つ飛翔生物の
ビジュアルシミュレーション

指導教員：渡辺 大地 講師

三上 浩司 准教授

メディア学部 ゲームサイエンス ゲームイノベーション プロジェクト

学籍番号 M0112310

長野 孝徳

2016 年 3 月

2015年度 卒業論文概要

論文題目

走光性を持つ飛翔生物の
ビジュアルシミュレーション

メディア学部

氏

長野 孝徳

指導

渡辺 大地 講師

学籍番号：M0112310

名

教員

三上 浩司 准教授

キーワード

走光性、飛翔生物、ビジュアルシミュレーション、
コンパス、マッハバンド、オープンスペース

賛諺の“飛んで火に入る夏の虫”は、自ら進んで危険や災いの中へ飛び込んでいくことの例えである。昆虫が光源に引き寄せられるように近づく現象は、古来から人々に認知されていたことが分かる。この現象は走光性と呼ばれる。走光性とは、生物が光による刺激に反応して移動する習性のことで、この性質を持つ生物は光に誘引、または光から逃避運動を行う。多くの仮説が存在するものの、今日までその習性の詳細は解明されていない。生物の行動についての研究は数多く存在するが、殊に走光性を扱うビジュアルシミュレーションの研究においても、走光性に関する生物学的分析に基づく習性は考慮されていない。そこで、本研究では生物の走光性に関する有力な3種類の説に基づき、飛翔生物のビジュアルシミュレーション手法を提案する。生物の走光性に関する有力な3種類の説とは、オープンスペース理論、コンパス理論、マッハバンド理論である。これらの説は、走光性の性質を三者三様の視点で捉えている。飛翔生物が光源や光源付近へ近づいていく、3種類の理論を考慮した誘引行動の分析と、それらをシミュレータ上で表現出来ているか考察した。その結果、提案した飛翔生物のビジュアルシミュレーション手法によって、デジタルコンテンツの更なる写実性の向上へ繋がる可能性を見出した。また、3種類の理論を合わせたオリジナルの手法を実装、検証を行い、ある程度写実的な動作を実現した。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	研究背景と目的	1
1.2	論文構成	2
第2章	走光性について	4
2.1	走光性	4
2.2	オープンスペース理論	6
2.3	コンパス理論	7
2.4	マッハバンド理論	8
第3章	走光性を考慮した手法	10
3.1	基本的な制御	10
3.2	オープンスペース理論を考慮した動作	11
3.3	コンパス理論を考慮した動作	11
3.4	マッハバンド理論を考慮した動作	11
3.5	3種類の理論を合わせた手法	12
第4章	検証と考察	14
4.1	オープンスペース理論を考慮した手法の検証	14
4.2	コンパス理論を考慮した手法の検証	15
4.3	マッハバンド理論を考慮した手法の検証	17
4.4	3つの理論を合わせた手法の検証	19
第5章	まとめ	21
	謝辞	22
	参考文献	23

目 次

2.1	オープンスペース理論, コンパス理論, マッハバンド理論の各挙動.	5
2.2	オープンスペース理論の挙動.	6
2.3	コンパス理論の挙動.	7
2.4	マッハバンドの錯視	8
2.5	マッハバンド理論の挙動.	9
3.1	マッハバンド理論による行動範囲	12
4.1	オープンスペース理論シミュレーション開始	15
4.2	オープンスペース理論 2	15
4.3	オープンスペース理論 3	15
4.4	オープンスペース理論 4	15
4.5	コンパス理論シミュレーション開始	16
4.6	コンパス理論 2	16
4.7	コンパス理論 3	16
4.8	コンパス理論 4	16
4.9	コンパス理論 5	16
4.10	コンパス理論 6	16
4.11	コンパス理論 7	17
4.12	コンパス理論 8	17
4.13	パターン A 移動開始	17
4.14	パターン A 移動中	17
4.15	パターン B 移動開始	18
4.16	パターン B 移動中	18
4.17	パターン C 移動開始	18
4.18	パターン C 移動中	18
4.19	パターン D 移動開始	18

4.20	パターン D 移動中	18
4.21	R:マッハバンド寄り 1	19
4.22	R:マッハバンド寄り 2	19
4.23	R:マッハバンド寄り 3	19
4.24	R:マッハバンド寄り 4	19
4.25	R:オープンスペース寄り 1	20
4.26	R:オープンスペース寄り 2	20
4.27	R:オープンスペース寄り 3	20
4.28	R:オープンスペース寄り 4	20

第 1 章

はじめに

1.1 研究背景と目的

諺の“飛んで火に入る夏の虫”は、自ら進んで危険や災いの中へ飛び込んでいくことの例えである。ヒトリガというガ類は、灯火に引き寄せられてその火を体で消してしまう（盗っていく）ことから、火盗蛾という和名の由来となった。“飛んで火に入る夏の虫”の起源は7世紀の中国、ヒトリガは江戸時代と、昆虫が光源に引き寄せられるように近づく現象は、古来から人々に認知されていたことが分かる。この現象は走光性と呼ばれ、今日までその習性の詳細は解明されていない。

デジタルコンテンツにおいて、自然現象をシミュレートすることはリアリティの向上に必要な要素である。例えば、2013年にエレクトロニック・アーツが発売したBattlefield4[1]は、FPSというジャンルに影響を与えない部分でも自然現象の描写がなされている。また、2011年にKONAMIが公表したFoxEngine[2]にも、動植物や自然現象の表現が出来る機能が搭載されている。このことから、自然現象に対する需要は明確である。

生物の行動についての研究も多く存在する。例えば、寺岡ら [3] は、ニホンミツバチの蜂球形成行動と呼ばれる、外敵であるスズメバチに対して球体に近い形状を形成し、ニホンミツバチが発する熱によってスズメバチを蒸し殺す特殊な攻撃行動から、個体の位置によって上昇や下降移動、方

向転換まで扱った boid アルゴリズムの機能追加, 及び変更する手法を提案した. また, 朱ら [4] は, 景観シミュレーションやバーチャルリアリティなどの季節感を向上させる要素として, 空気力学に基づくトンボの飛翔モデルを提案した. このモデルは, 翅の羽ばたきによる力を考慮した飛翔や, トンボの飛翔の特徴である急上昇, 急停止, ホバリング, 急旋回などの動作や, 空間上に制御点を配置することで飛翔経路を容易に定めることができる. これらの研究は, それぞれの習性や生態に則した動作を再現している. 生物の行動についての研究には, 走光性を考慮した手法も存在している. Xinijie Wang ら [5] は, 昆虫の群れをシミュレートするための, 生物学的に妥当な力学モデルを提案した. その内の一つに, ガ類が街灯の周囲に集まる走光性を考慮したシミュレーション手法が存在する.

これらのように, 生物の行動についての研究はいくつかあるが, 殊に走光性を考慮した手法を扱う研究においても, 走光性に関する生物学的分析に基づく習性は考慮されていない. そこで, 本研究では生物の走光性に関する有力な 3 種類の説に基づき, 飛翔生物のビジュアルシミュレーション手法を提案する. 生物の走光性に関する有力な 3 種類の説とは, オープンスペース理論, コンパス理論, マッハバンド理論である. これらの説は, 走光性の性質を三者三様の視点で捉えている. 走光性と, これら 3 種類の詳細は第 2 章で説明する. 飛翔生物が光源や光源付近へ近づいていく, 3 種類の理論を考慮した誘引行動を分析し, それらをシミュレータ上で表現出来ているか考察した. その結果, 提案した飛翔生物のビジュアルシミュレーション手法によって, デジタルコンテンツの更なる写実性の向上へ繋がる可能性を見出した. また, 3 種類の理論を合わせたオリジナルの手法を実装, 検証を行い, ある程度写実的な動作を実現した.

1.2 論文構成

本論文は全 5 章で構成する. 本章では研究背景と目的について述べた. 第 2 章では本手法の根幹である, 走光性の性質について説明する. 第 3 章では走光性を考慮した提案手法について述べる.

第4章で提案手法を用いて表現した, 走光性現象のビジュアルシミュレーションについての評価と考察を行い, 第5章でまとめと今後の展望について述べる.

第 2 章

走光性について

この章では、本研究のビジュアルシミュレーション手法において、必要不可欠である走光性の定義と、その中の有力な説であるコンパス理論、マッハバンド理論、オープンスペース理論について説明する。

2.1 走光性

走光性 (phototaxis) とは、生物が方向性を持つ刺激に反応する先天的な性質である走性の 1 種で、光による刺激に反応して移動する習性のことである。Campan[6] は、走光性には、光に誘引されるような行動をとる正の走光性 (positive phototaxis) と、光から遠ざかるような行動をとる負の走光性 (negative phototaxis) が存在すると説明する。諺の“飛んで火に入る夏の虫”に表れる、灯火に誘引されて火に飛び込んでしまう昆虫の行動は、正の走光性によって引き起こしたものであると言える。また、負の走光性は、ミミズやゴキブリのような、暗所を好む生物が持つ。

昆虫を調査するに当たって、習性を利用したトラップを使用する研究が多い。例えば、ライトトラップを用いて捕獲、調査を行う研究がある。Kato ら [7] は、約数百万個体の昆虫が 20W のブラックライトを用いたライトトラップに誘引したと報告した。八尋 [8] は、約 53,000 個体の昆虫類

を 60W の白熱電球を用いた誘蛾灯で捕獲した。また、粘着トラップを用いる研究もある。柴尾ら [9] は、害虫であるミナミキイロアザミウマの早期発見と防除のために、色彩粘着板と LED を用いて誘引効果を調査した。Park ら [10] は、黄色粘着トラップを用いて、キュウリ温室でワタアブラムシを調査した。

走光性は、その現象について未だ詳細に解明出来ておらず、行動メカニズムや意義に関して、これまで様々な研究が仮説を提案している。そのうちの幾つかは検証を重ねることで理論として呼ばれる。本研究では正の走光性を対象として、中でも有力な仮説である、オープンスペース理論、コンパス理論、マッハバンド理論の 3 種類を扱う。これらは昆虫が光源へ移動する、或いは結果的に光源付近へ移動する点では共通だが、その過程と考え方は異なる。図 2.1 は、3 つの理論にある挙動の違いを示す。

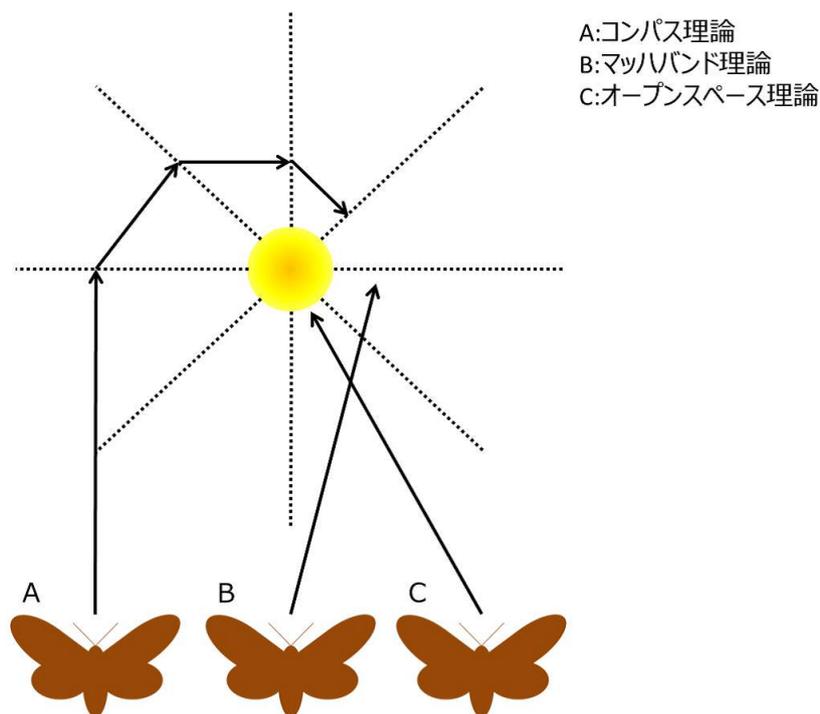


図 2.1 オープンスペース理論、コンパス理論、マッハバンド理論の各挙動。

詳細は後述する各小節にて説明する。

2.2 オープンスペース理論

オープンスペース理論では走光性について、昆虫は光源の明るい部分へ直接移動すると弘中ら [11] は説明している。

この理論では、昆虫は空間内の光源を開放空間 (open space) の指標として捉えている。落ち葉の下や林冠に覆われた林にいる昆虫は、その場所から脱出するために明るい場所へ向かう必要がある。つまり、人工光源に向かって移動する昆虫は、その開放空間を目指して移動している最中である。Mazokhin-Porshnyakov [12] は、昆虫が空間内の明るい部分を開放空間の指標として捉える性質について触れている。図 2.2 は、オープンスペース理論における昆虫の挙動を示す。

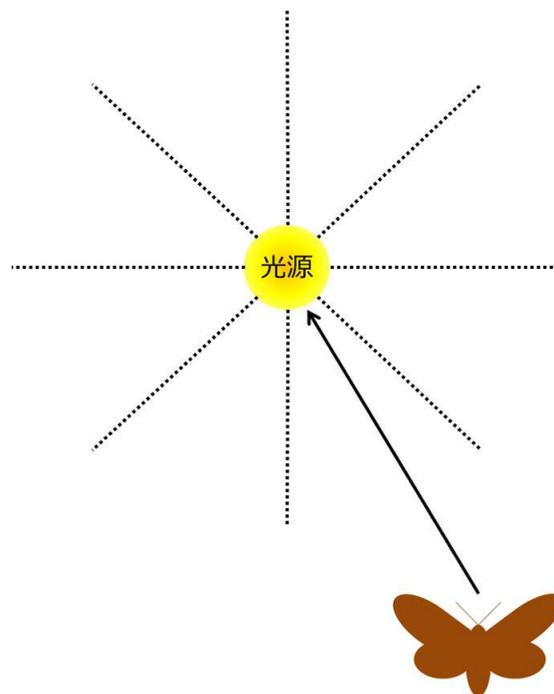


図 2.2 オープンスペース理論の挙動.

2.3 コンパス理論

チョウ目を中心とした多くの昆虫は、月や太陽等の自然光源をコンパスの基準点として利用していることを、Baker[13], Wehner[14] は示した。コンパス理論では走光性について、月や太陽を方向決定の為に視覚目標として利用する昆虫が人工光源を視覚目標と誤認し、光源へ誘引が引き起こされると弘中ら [11] は説明している。

無限遠の光源に対し、一定の角度 α を維持することで、昆虫は直線的に移動する事が出来る。その場合、昆虫が無限遠でない光源を視覚目標として移動すると、定位角度を維持しようと体勢を補正し続け、光源を中心に旋回や螺旋状を描くような運動をする。コンパス理論ではそのように予想する。Buddenbrock の研究 [15] や、Lloyd の研究 [16] では、この性質について触れている。これにより、昆虫が炎や人工光源などの周囲を螺旋、旋回しながら飛翔するメカニズムは説明出来る。図 2.3 は、一定の角度 α を維持して飛翔する、コンパス理論における昆虫の挙動を示す。

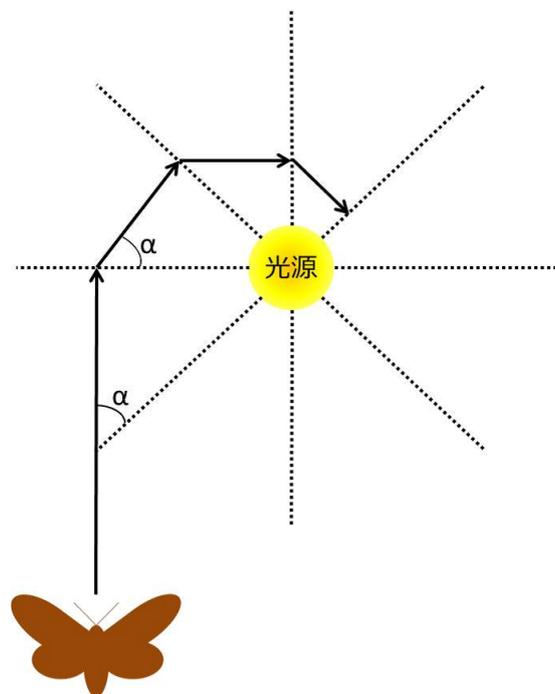


図 2.3 コンパス理論の挙動.

2.4 マッハバンド理論

マッハバンド理論では走光性について、昆虫は錯視によって、最も暗い方向への逃避の為に移動をするはずが、実際は光源付近へ近づく行動をとると弘中ら [11] は説明している。

マッハバンド (Mach bands) とは、濃淡が微妙に異なるグレーの領域が隣接している場合に、暗いグレーの境界はより暗く、明るいグレーの境界はより明るく強調して見え、境界を輪郭として捉えることができる錯視の 1 種である。この現象はヒトの視覚でも観察することが出来る。図 2.4 は、マッハバンドの錯視を示したものである。

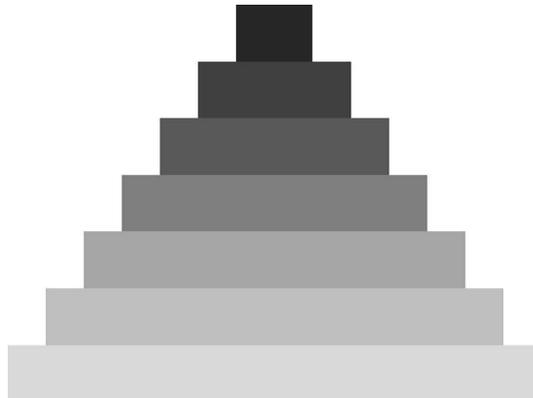


図 2.4 マッハバンドの錯視

マッハバンドやシュブルール錯視 (Chevreul illusion) 等の、明暗対比を引き起こす神経機構は側抑制と呼ばれる。H K. Hartline ら [17] はカブトガニの複眼から側抑制を発見した。昆虫はこの神経機構を持つため、ヒトと同じく錯視を起こすとマッハバンド理論では考える。そのため、昆虫はヒトと同様に光源付近の暗闇が周囲よりも暗く認識し、光源からの逃避行動をとるはずが光源付近へ移動することになる。図 2.5 は、マッハバンド理論における昆虫の挙動を示す。

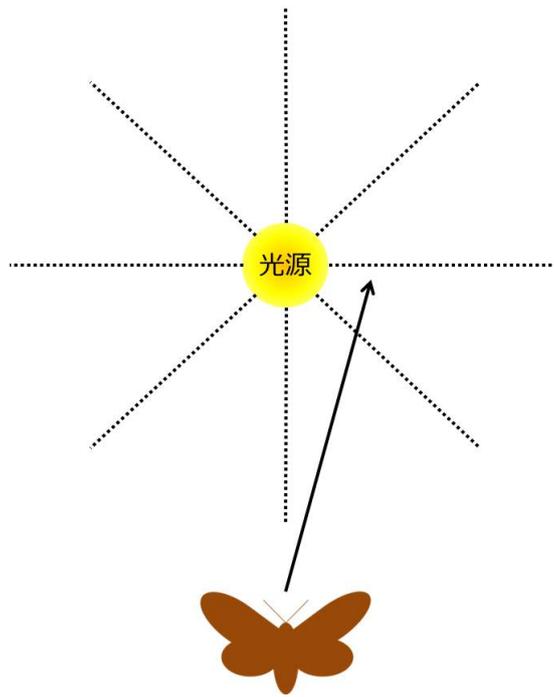


図 2.5 マッハバンド理論の挙動.

第 3 章

走光性を考慮した手法

この章では、2 章で説明した走光性の性質を踏まえ、各理論に基づく動作を考慮した手法及び、3 種類の理論を合わせた手法について説明する。

3.1 基本的な制御

本研究では、飛翔生物の事をモデルと呼ぶ。3 次元空間に固定された右手座標系をグローバル座標系と呼び、モデルはグローバル座標系の中に配置している。グローバル座標系の上方向は $+y$ 方向を指す。グローバル座標系に対してモデルの重心を原点とし、モデルの姿勢によって規定する座標系をローカル座標系と呼ぶ。モデルの進行方向に対して右方向はローカル座標系の $+x$ 方向を指す。モデルにとっての上方向はローカル座標系の $+y$ 方向を指す。モデルにとっての前方向はローカル座標系の $-z$ 方向を指す。モデルにとって前方向を指すベクトルをモデルの方向ベクトルと呼ぶ。方向ベクトルは単位ベクトルであり、グローバル座標系で表す。モデルは基本的に、方向ベクトルに向かってまっすぐ進む。3 次元空間内の距離 1 は、1cm と定める。飛翔生物の移動速度は個体差を考慮せず、一定とする。モデルが前進する場合は 1 フレーム毎に前方向へ距離 1 進めると定める。

3.2 オープンスペース理論を考慮した動作

オープンスペース理論を考慮した動作では、光源へ移動するモデルの前進行動を実現する。

この理論では、単純にモデルの方向を光源 A へ向け、モデルの位置 B から前方向へ前進させることで、光源へ移動するモデルの前進行動を実現することが出来る。

3.3 コンパス理論を考慮した動作

コンパス理論を考慮した動作では、光源を中心としたモデルの回転運動を実現する。本手法では、外積を用いることで回転方向を制御する。

初めに、正規化した方向ベクトルを求める。光源の位置 A からモデルの位置 B との差を算出する。算出した位置ベクトルを正規化した方向ベクトル C を、次の式で示す。

$$\mathbf{C} = \frac{\mathbf{A} - \mathbf{B}}{|\mathbf{A} - \mathbf{B}|} \quad (3.1)$$

次に、グローバル座標系においてモデルの現在位置から、 y 軸と平行に定位角度 α 分反時計回転させた際の方向ベクトル D を求め、C と、D の外積 E を算出する。この式を次に示す。

$$\mathbf{E} = \mathbf{C} \times \mathbf{D} \quad (3.2)$$

この E の数式を利用して、モデルの光源に対する回転方向を決定する。 $E_y > 0$ の場合、モデルからみた光源の位置は左側に存在するので時計回り、 $E_y < 0$ の場合は右側に存在するので反時計回りとする。 $E_y = 0$ の場合は直線上に存在するが、本手法では反時計回りとする。

その後、モデルを定位角度 α 分回転させ、現在位置から前方向へ前進させることで、光源を中心としたモデルの回転運動を実現することが出来る。

3.4 マッハバンド理論を考慮した動作

マッハバンド理論を考慮した動作では、光源の近くへ移動するモデルの前進行動を実現する。

まず、光源の近くを設定する為に乱数 R を用意する。Hsiao[18] によると、光源から約 15cm から 45cm 離れた位置に多くの定位行動が確認出来た。よって、 R の範囲を 15 から 45 の間に設定する。図 3.1 はこの行動範囲を示したものである。

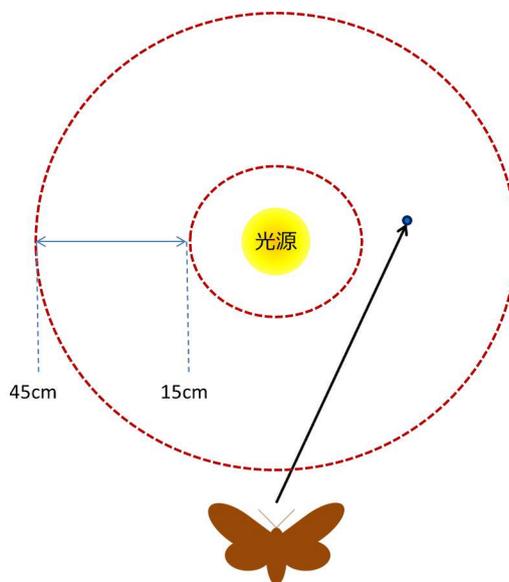


図 3.1 マッハバンド理論による行動範囲

次に、 x, y, z 成分にランダムな値を与えたベクトル V を用意し、正規化する。その後、 V に乱数 R を掛け、光源の位置 A に足した注視点 H を設定する。式は次の通りである。

$$H = A + RV \quad (3.3)$$

モデルの方向を H へ向け、現在位置から前方向へ前進させることで、光源の近くへ移動するモデルの前進行動を実現することが出来る。

3.5 3種類の理論を合わせた手法

3種類の理論を合わせた手法では、前述したコンパス理論、マッハバンド理論、オープンスペース理論を合わせた独自の動作を実現する。2章で述べたように、走光性という性質は解明されておらず、有力である3種類の理論も完全ではない。そこでコンパス理論の回転運動と、マッハバンド、

オープンスペース理論の光源とその付近への移動行動を合わせることで、リアリティのある動作を再現する。

初めに、マッハバンド理論で提案した手法を用いてモデルが注視する点 H を設定する。その際用いた乱数 R は可変で、オープンスペース理論やマッハバンド理論を考慮した範囲に設定することが可能である。 R を 0 に近づけた場合はオープンスペース理論を考慮した動作、 $15 \leq R \leq 45$ の範囲に近づけた場合はマッハバンド理論を考慮した動作となる。光源への移動行動を実現するために、移動させる前のモデルの姿勢を確保して注視点 H へ向け、前方向へ前進させて確保した姿勢に戻す。

その後、コンパス理論で提案した手法でモデルの回転運動を行う。光源の位置 A を注視点 H に変更し、モデルの位置 B との差を設定した正規化方向ベクトル C を算出する。次に式を示す。

$$C = \frac{H - B}{|H - B|} \quad (3.4)$$

以降はコンパス理論と同様に処理することで、コンパス理論の回転運動と、マッハバンド、オープンスペース理論の光源とその付近への移動行動を実現できる。

第 4 章

検証と考察

この章では、コンパス理論、マッハバンド理論、オープンスペース理論と、それらを合わせた独自の手法についての検証を行う。本研究では、検証の為にシミュレータを実装した。プログラムは、グラフィックス API の OpenGL[19] をベースとした、3 次元グラフィックスツールキットである、Fine Kernel ToolKit System[20] を用いて開発を行った。

4.1 オープンスペース理論を考慮した手法の検証

オープンスペース理論を考慮した動作では、光源へ移動するモデルの前進行動を実現するかどうかを検証する。

図 4.1 から図 4.4 は、オープンスペース理論を考慮した手法を適用したシミュレータのスクリーンショットである。

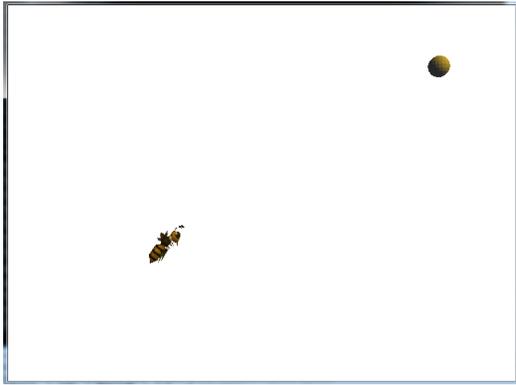


図 4.1 オープンスペース理論シミュレーション開始

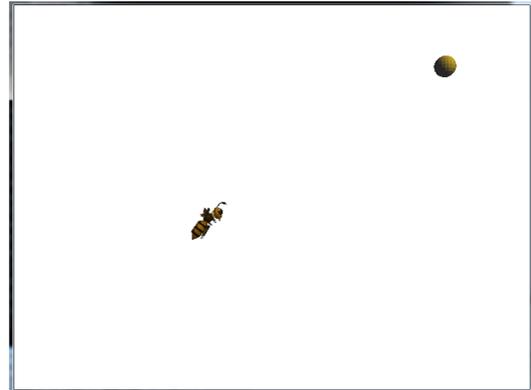


図 4.2 オープンスペース理論 2

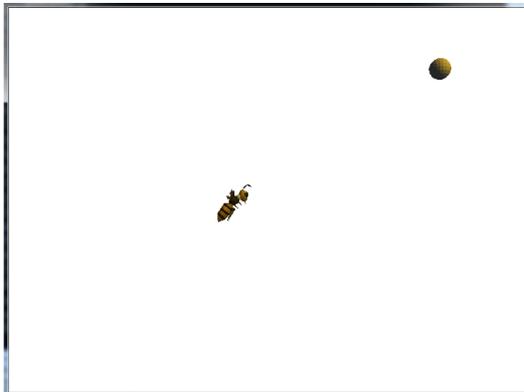


図 4.3 オープンスペース理論 3

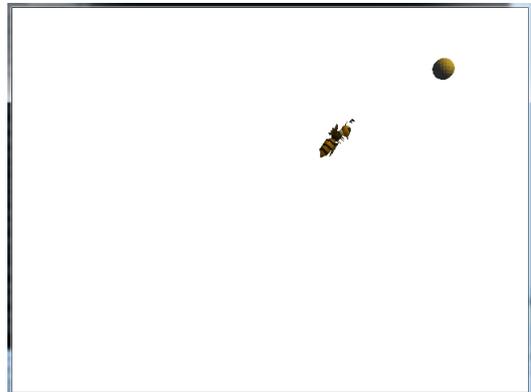


図 4.4 オープンスペース理論 4

モデルは光源を注視し、前進行動をしていることが分かる。

4.2 コンパス理論を考慮した手法の検証

コンパス理論を考慮した手法では、光源を中心としたモデルの回転運動を実現するかどうかを検証する。図中の球体を光源、昆虫をモデルとする。

図 4.5 から図 4.12 の 8 つの画像は、コンパス理論を考慮した手法を適用したシミュレータの、モデルが光源を中心に 1 回転するまでのスクリーンショットである。



図 4.5 コンパス理論シミュレーション開始

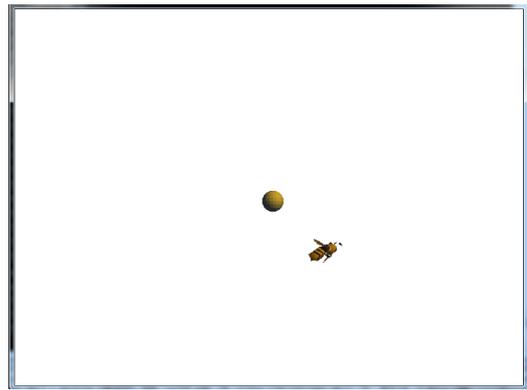


図 4.6 コンパス理論 2



図 4.7 コンパス理論 3



図 4.8 コンパス理論 4

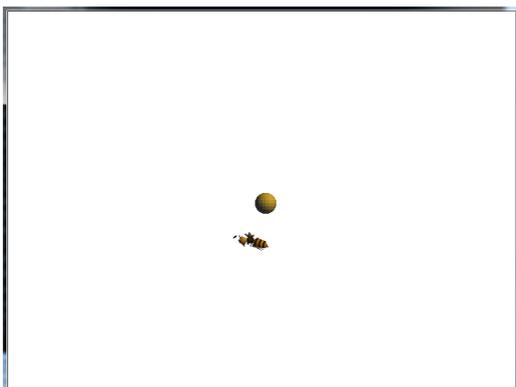


図 4.9 コンパス理論 5



図 4.10 コンパス理論 6



図 4.11 コンパス理論 7

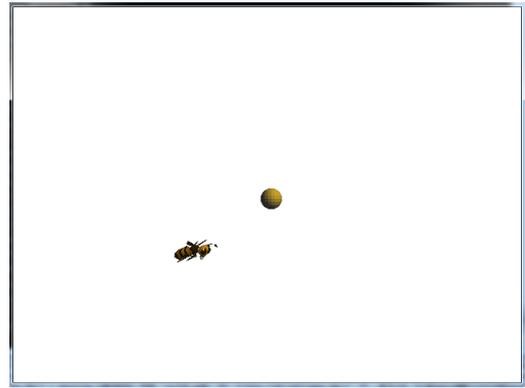


図 4.12 コンパス理論 8

モデルは光源を中心に円運動を描いていることがわかる。

4.3 マッハバンド理論を考慮した手法の検証

マッハバンド理論を考慮した手法では、光源の近くへ移動するモデルの前進行動を実現するかどうかを検証する。図中の球体を光源、昆虫をモデル、八面体をモデルの注視点とする。

ランダムに生成されたモデルの注視点へ前進行動をするかどうか、それぞれ注視点の位置が違うパターン A、パターン B、パターン C、パターン D の 4 回分行った。図 4.13 から図 4.20 は、マッハバンド理論を考慮した手法を適用したシミュレータのスクリーンショットである。図 4.13 と図 4.14 はパターン A、図 4.15 と図 4.16 はパターン B、図 4.17 と図 4.18 はパターン C、図 4.19 と図 4.20 はパターン D の、モデルがランダムに生成された注視点へ前進している様子を示している。



図 4.13 パターン A 移動開始

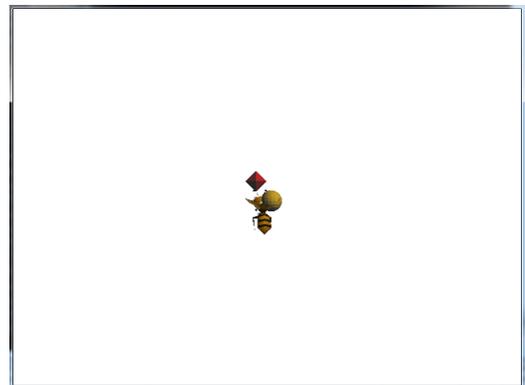


図 4.14 パターン A 移動中



図 4.15 パターン B 移動開始



図 4.16 パターン B 移動中



図 4.17 パターン C 移動開始



図 4.18 パターン C 移動中



図 4.19 パターン D 移動開始



図 4.20 パターン D 移動中

モデルは光源の近くへランダムに生成された注視点へ前進行動をしていることが分かる。

4.4 3つの理論を合わせた手法の検証

3つの理論を合わせた手法の検証では、コンパス理論の回転運動と、マッハバンド、オープンスペース理論の光源とその付近への移動行動を合わせたオリジナルの動作について検証する。図中の球体を光源、昆虫をモデル、八面体をモデルの注視点、円をモデルの軌跡とする。

図 4.21 から図 4.28 は、3つの理論を合わせた手法を適用したシミュレータのスクリーンショットである。ランダムに生成されたモデルの注視点へ前進行動をしつつ、回転運動を行った様子を示す。図 4.21 から図 4.24 は、 R の範囲をマッハバンド理論に近づけた結果、図 4.25 から図 4.28 は、 R の範囲をオープンスペース理論に近づけた結果である。

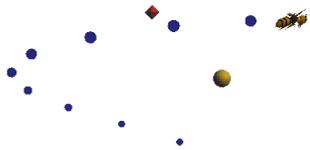


図 4.21 R :マッハバンド寄り 1

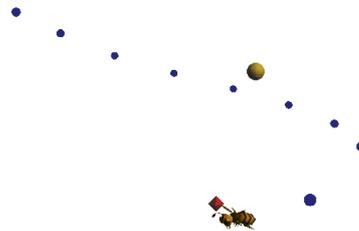


図 4.22 R :マッハバンド寄り 2

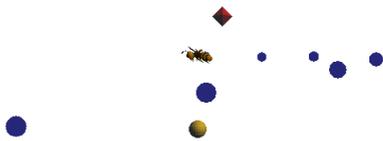


図 4.23 R :マッハバンド寄り 3



図 4.24 R :マッハバンド寄り 4



図 4.25 R : オープンスペース寄り 1



図 4.26 R : オープンスペース寄り 2



図 4.27 R : オープンスペース寄り 3



図 4.28 R : オープンスペース寄り 4

モデルは光源や光源の付近へ移動し、回転運動を行う動きを見せた。また、 R の範囲をマッハバンド理論に近づけた場合は光源の周辺、オープンスペース理論へ徐々に近づけた場合は光源中心に回転運動を行った。3 理論の要素を合わせることで、ある程度リアルな走光性の性質を実現することが出来た。

第 5 章

まとめ

本研究では、生物の走光性に関する有力な 3 種類の説に基づき、飛翔生物のビジュアルシミュレーション手法を提案することを目的とした。動作を再現するために、コンパス理論、マッハバンド理論、オープンスペース理論における昆虫の動作を調査、分析し、シミュレータを実装した。提案した飛翔生物のビジュアルシミュレーション手法によって、デジタルコンテンツの更なる写実性の向上へ繋がる可能性を見出した。また、3 種類の理論を合わせたオリジナルの手法を実装、検証を行ったが、ある程度写実的な動作を実現した。しかし、それぞれの理論について、有力なデータからシミュレータの実装を行ったが、光源の光強度や色、飛翔のメカニズムや移動速度といった、飛翔生物に表れる個々の特性などは考慮していない。また、飛翔生物が光源に衝突した際の軌道変化も本手法では考慮しない。それらを考慮した動作を再現することで、より写実的なビジュアルシミュレーションを実装することが出来ると予想する。

謝辞

本研究を締めくくるにあたり、終始ご指導ご鞭撻を頂きました先生方に心より感謝致します。また、様々な相談に応じて下さった研究室の院生の方々とメンバー、友人達に深く感謝致します。

参考文献

- [1] エレクトロニック・アーツ株式会社. ホーム - Battlefield - EA 公式サイト. http://www.battlefield.com/ja_JP/. 参照:2015.12.01.
- [2] コナミホールディングス株式会社. FOX ENGINE : HD EDITION. http://www.konami.jp/kojima_pro/e3_2011/jp/engine.html. 参照:2015.12.01.
- [3] 寺岡優, 小島啓史, 竹内亮太, 石川友一, 渡辺大地. Boid アルゴリズムを利用したニホンミツバチの集団行動シミュレーション. VC/GCAD 合同シンポジウム 2013, 2013.
- [4] 朱朝江. 村岡一信. 水野尚. 空気力学に基づくトンボのビジュアルシミュレーション. 芸術科学会論文誌, Vol. Vol.2 No.4, pp. 146–155, 2003.
- [5] Xinjie Wang, Jiaping Ren, Xiaogang Jin, Dinesh Manocha. Bswarm: Biologically-plausible dynamics model of insect swarms. *ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, pp. 111–118, 2015.
- [6] Campan, R. Tactic components in orientation. In *Orientation and Communication in Arthropods* (M. Lehrer, ed.) . Birkhauser-Verlag, Basel, Switzerland, pp. 1–40, 1997.
- [7] Kato, M., T. Inoue, A. A. Hamid, T. Nagamitso, M. B. Merdek, A. R. Nona, T. Hino, S. Yamane and T. Yumoto. Seasonality and vertical structure of light-attracted insect

- communities in a dipterocarp forest in sarawak. *Res. Popul. Ecol.*, Vol. 37, pp. 59–79, 1995.
- [8] 八尋克郎. 滋賀県の南東平野部水田のライトトラップで採集された昆虫類の種構成. 日本環境動物昆虫学会誌, 第 18 卷 第 1 号, pp. 43–47, 2007.
- [9] 柴尾学, 田中寛. 色彩粘着板と led を組み合わせたトラップによるミナミキイロアザミウマの誘引特性. 日本応用動物昆虫学会誌, 第 58 卷 第 1 号, pp. 29–32, 2014.
- [10] Park, J. J., J. K. Kim, H. S. Park and K. J. Cho. Development of time-efficient method for estimating aphids density using yellow sticky traps in cucumber greenhouses. *J. Asia Pac. Entomol.*, Vol. 4, pp. 143–148, 2001.
- [11] 弘中満太郎, 針山孝彦. 昆虫が光に集まる多様なメカニズム. 日本応用動物昆虫学会誌, 第 58 卷 第 2 号, pp. 93–109, 2014.
- [12] Mazokhin-Porshnyakov, G. A. Why insects fly to light by night. *Inst. Bio. Physics.* (AN SSSR, Moscow), translated from *Entomologicheskoe Obozrenie*, Vol. 39, pp. 52–58, 1960.
- [13] Baker. The evolutionary ecology of animal migration. *Holmes and Meier Publishers, New York*, p. 1012, 1978.
- [14] Wehner. Astronavigation in insects. *Annu. Rev. Entomol.*, Vol. 29, pp. 277–298, 1978.
- [15] Buddenbrock, W. von. Die lichtkompassbewegungen bei den insekten, insbesondere den schmetterlingsraupen. *Sitzungsber. Heidelb. Akad. Wiss. Math. Naturwiss. Kl.*, pp. 1–26, 1917.
- [16] Lloyd, J. E. Stray light, fireflies, and fireflyers. In *Ecological Consequences of Artificial Night Lighting* (C. Rich and T.Longcore, eds.). Island Press, Washington DC, pp. 281–304, 2006.

- [17] Hartline, H. K., H. G. Wagner and F. Ratliff. Inhibition in the eye of limulus. *J. Gen. Physiol*, Vol. 39, pp. 651–673, 1956.
- [18] Hsiao, H. S. Flight paths of night-flying moths to light. *J. Insect Physiol*, Vol. 19, pp. 1971–1976, 1973.
- [19] OpenGL.org. <http://www.opengl.org/>. 参照:2015.7.01.
- [20] 渡边大地. FK Tool Kit System. <http://gamescience.jp/FK/>. 参照:2015.7.01.