The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	昆虫視覚系の計算原理に学んだ衝突回避のための単眼ロボットビジョン
Author(s)	奥野, 弘嗣
Citation	大阪大学, 2008, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/1201
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

昆虫視覚系の計算原理に学んだ
衝突回避のための単眼ロボットビジョン

2008年

奥野　弘嗣

内容梗概

本論文は，筆者が大阪大学大学院工学研究科博士後期課程在学中に行った昆虫視覚系の計算原理に学んだ衝突回避のための単眼ロボットビジョン開発に関する研究をまとめたものであり，全7章により構成されている．以下に，各章の内容を要約する．

第1章 序論

本章では，本論文の目的と意義を述べた．まず視覚センサで衝突回避を行うことの意義を述べた．次いで従来の視覚情報処理の特徴と問題点を挙げ，生体の視覚情報処理を模倣することにより実現を目指す視覚センサの特長を明らかにした．

また，本研究が生体機能の中でも特に注目した，昆虫の視覚情報処理，視覚制御運動に関する生理学的・行動学的研究についての概説を行った．次に昆虫を模倣した視覚センサ開発に関する先行研究を紹介し，それらと本研究とのアプローチの違いを明らかにした．

第2章 バッタ視覚神経系における衝突検知

本章では，バッタの視覚神経系において，至近距離に迫った接近物体に対して選択的応答を示す神経細胞 (lobula giant movement detector, LGMD) について述べた．本研究では，この神経系における計算原理を模倣することにより，効率的な衝突検知システムの実現を目指した．過去の研究において提案されたLGMDの神経回路モデルを紹介し，その回路で行われている情報処理について説明した．またこの回路において，遅延を持った側抑制機構が至近距離物体への選択的応答の要因となっていることを解説した．

第3章 衝突検知のための電子回路モデル

本章では，本研究により考案した，バッタLGMDで行われている計算原理を模倣した電子回路モデルについて述べた．物体の様々な運動に対するモデルの応答を，コンピュータシミュレーションを用いて検証した．この結果から，モデルがバッタLGMDと同様，接近物体に対し至近距離で強く応答することを確認し，更に遅延を持った側抑制の時空間特性がモデルの応答特性に与える影響を明らかにした．

第 4 章 ハードウェアの設計とアルゴリズムの検証

本章では，目指す視覚情報処理を効率的に行うために開発したハードウェアについて述べた．フロントエンドには，アナログ回路の利点を生かし，様々な時空間フィルタを瞬時に施すことができるシリコン網膜を用い，その後段には並列情報処理に適し，かつ多目的に扱える FPGA (field-programmable gate array) を配した．

また，第 3 章で考案した電子回路モデルを，一部簡略化した形でハードウェアに実装した衝突検知システムについて述べた．側抑制は隣接一画素に限定し，側抑制のための時空間フィルタは全て FPGA に実装した．応答の測定は LCD(liquid crystal display) に物体の運動を模擬するパターンを提示することで行った．本システムは特定の状況下では至近距離物体への選択性を示すが，状況に応じて適切に動作をさせるためには，柔軟な空間フィルタリングが必要となることを確認した．

第 5 章 アナログ・ディジタル混在型衝突検知システム

本章では，第 3 章で考案した電子回路モデルを第 4 章で開発したハードウェアに実装した衝突検知システムについて述べた．側抑制に求められる空間フィルタは，アナログ抵抗回路網により実現した．ディジタル演算が苦手とする空間フィルタがフロントエンドでなされているため，FPGA における計算コスト及び回路規模は大きく抑えられた．実装システムはシミュレーション動画を用いて評価を行い，至近距離物体への選択的応答を示すことを確認した．接近物体への応答特性は，電子回路モデル同様，側抑制に用いる時空間フィルタによって制御できることを確認した．

第 6 章 実環境応用に向けた衝突検知システムの改良

本章では，本研究で開発した衝突検知システムの，実環境応用について述べた．実環境での検証は，本システムをモータ駆動の小型模型自動車に搭載することにより行った．実環境では，自己振動を始めとして，動画を用いたシミュレーションでは想定していなかった問題が認められたが，適切に対策を施すことにより，実環境でも安定して動作することを確認した．

第 7 章 結論

本章では，本研究で得られた知見を総括した．

目 次

第 1 章　序論 **1**
1.1　衝突回避における視覚の重要性 1
1.2　逐次型画像処理と生体視覚 2
1.3　昆虫の視覚情報処理とその模倣システム 4

第 2 章　バッタ視覚神経系における衝突検知 **13**
2.1　緒言 13
2.2　単眼視衝突検知の光学的背景 13
2.3　神経回路モデルの構成と処理の流れ 15
2.4　神経回路のアルゴリズムとアーキテクチャ 17
2.5　結言 18

第 3 章　衝突検知のための電子回路モデル **21**
3.1　緒言 21
3.2　衝突検知のための視覚情報処理 21
3.3　電子回路モデルの構成と処理の流れ 23
3.4　一次元回路モデルの評価 26
3.4.1　評価方法 26
3.4.2　正面からの接近に対する応答 26
3.4.3　正面以外からの接近に対する応答 31
3.4.4　並進及び離反に対する応答 33
3.5　二次元回路モデルの応答 35
3.6　考察 38
3.6.1　衝突回避システム構築の指針 38
3.6.2　接近以外の動きへの対応 41
3.7　結言 41

第 4 章　ハードウェアの設計とアルゴリズムの検証 **44**
4.1　緒言 44
4.2　実装用ハードウェアの開発 44
4.2.1　ハードウェアの構成 44
4.2.2　シリコン網膜 45
4.2.3　コントロールボード 48
4.3　LGMD 計算原理の簡易実装 50

4.3.1 フレーム間差分動作 50
4.3.2 FPGA における処理の流れ 52
4.4 実装システムの評価 53
4.4.1 評価方法 53
4.4.2 正面からの接近に対する応答 53
4.4.3 正面以外からの接近に対する応答 57
4.4.4 並進及び離反に対する応答 59
4.5 考察 59
4.6 結言 60

第 5 章 アナログ・ディジタル混在型衝突検知システム 62
5.1 緒言 62
5.2 システムの構成と処理の流れ 62
5.2.1 シリコン網膜の制御と出力 62
5.2.2 FPGA における処理 64
5.3 システム出力の評価 66
5.3.1 評価方法 66
5.3.2 正面からの接近に対する応答 66
5.3.3 正面以外からの接近に対する応答 68
5.4 考察 71
5.4.1 並列階層処理の利点 71
5.4.2 アナログ演算とディジタル演算の適性 71
5.5 結言 73

第 6 章 衝突検知システムの実環境応用 75
6.1 緒言 75
6.2 実環境におけるシステムの応答と解析 76
6.2.1 システムの応答 76
6.2.2 変動的応答の解析 76
6.3 実環境応用のための改良 80
6.3.1 輪郭速度検出アルゴリズム 80
6.3.2 異方性を持った速度検出 83
6.4 改良アルゴリズムの実装 83
6.5 改良アルゴリズムの評価 85
6.6 考察 89
6.6.1 焦点 89
6.6.2 生体模倣 90
6.7 結言 91

第 7 章 結論 93

謝辞 94

研究業績 95

第1章　序論

1.1　衝突回避における視覚の重要性

ロボットの自律制御や自動車の安全性向上のために，外界知覚は必須の機能である．このため，一般にロボットや自動車は，多数のセンサを搭載しており，目的に応じてそれらの情報を選択，あるいは組み合わせて用い，様々なタスクを実現している．

この分野において，非常に強く期待されている機能の一つが衝突回避である．この機能の実現のために，様々なセンサを用いた方法が研究・開発されているが，その中でも，視覚センサを用いた方法が有力な選択肢として活発に研究されている [1][2]．視覚情報は外界の情報を豊富に含んでいるため，視覚センサを用いることで，衝突回避だけでなく物体の認識等も行える多機能なシステムの実現が期待できる．

視覚情報以外を利用した衝突回避としては，主に自動車業界において，レーザレーダ，及びミリ波レーダを用いた方式の研究が進められてきた [3][4]．レーダを用いたシステムの利点は，反射強度の高い物体（主に障害物）のみを比較的精度良く検出できる事にあるが，障害物以外の情報を把握できないことは欠点にもなる．例えば，視覚のようにレーン認識が行えないため，カーブ等では前方の障害物に対して衝突回避の必要性を評価できない (図 1.1(a))[2]．また，反射強度のみで対象物を識別する方式であるため，上り坂の始点や下り坂の終点付近では，路面上のマンホールやキャッツアイといった衝突の危険性の無い物体にまで反応し，その識別が困難であるという欠点も持っている (図 1.1(b))[5]．以上の理由から，レーダ単独での障害物回避は困難であると考えられており [6]，近年は，レーダと視覚センサを併用するか或いは視覚センサのみを用いる方式が精力的に研究・開発されている [7][8]．

以上に見られるように，最新の高周波 CMOS 技術を駆使したミリ波レーダ等，高度なセンサが開発されている今日においても，遠い過去から多くの生物が生来的に備えている視覚センサの重要度は非常に高い．視覚に強く依存する生物であるヒトが形成した社会において，機械に自律的に外界を知覚させる際，視覚の重要度が高まる事はある意味当然の帰結とも言える．

そこで本研究では，ロボットや自動車に搭載するための要件を満たす，視覚を用いた衝突回避システムの実現を目的として研究を行った．ここで言及している要件とは，実時間処理，小型，低消費電力，及び環境変化への頑強性である．本章次節以降では，従来の画像処理システムがロボット等への搭載における上記要件の実現に適しない理由を述べ，続いて，生体における視覚情報処理の特長と，これを模倣することの意義を明らかにする．

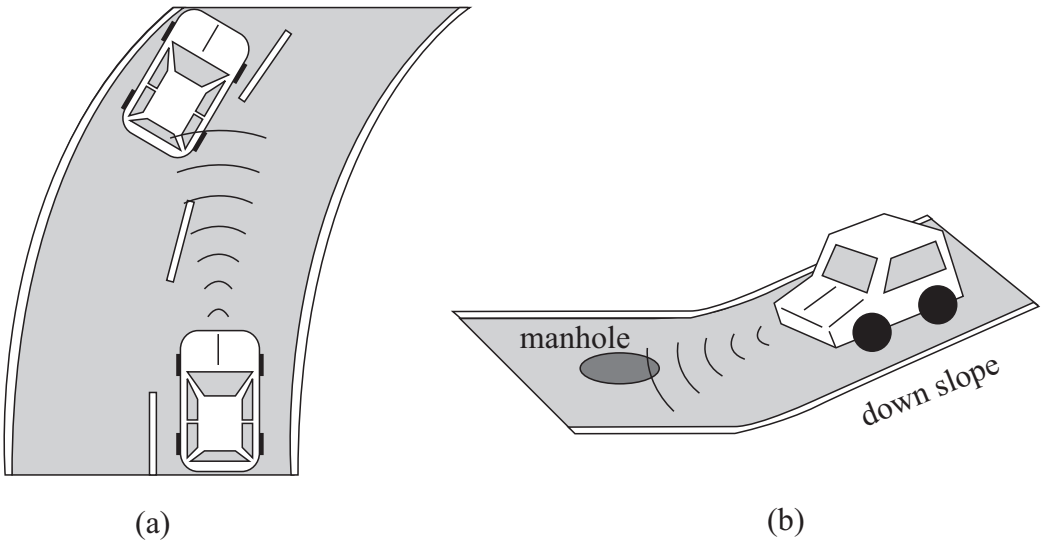


図 1.1: 車載レーダ誤認識の例．(a) ある程度の曲率を持ったカーブでは，隣のレーンの自動車や路側の物体を障害物と誤認識する．(b) 上り坂の始点や下り坂の終点付近では，マンホールやキャッツアイといった反射率の高い路面上の物体を障害物と誤認識する．

1.2 逐次型画像処理と生体視覚

図 1.2(a) に，従来の工学的視覚情報処理システムの構成を示す．システムは主に，CCD (charge-coupled device) もしくは CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) イメージセンサ，A/D (analog-to-digital) 変換器とディジタル計算機から構成される．イメージセンサで受け取られた空間的広がりをもった輝度分布は，A/D 変換されてディジタル計算機のメモリへと格納される．ディジタル計算機では，CPU (central processing unit) がメモリに格納された視覚情報にアクセスし，プログラムに従って逐次的に画像処理が進められていく．このようなノイマン型アーキテクチャをとるシステムは，高い汎用性を持つため，今までに広く用いられてきたが，時空間的に変動する視覚情報を扱うシステムとして，この逐次型演算アーキテクチャは適しているとはいえない．

一般に初期画像処理では，取得した画像に対してノイズ除去のための平滑化や，画像特徴の抽出を容易にするための輪郭強調といった前処理が行われる．図 1.2(b) に示す入力画像に対して，輪郭強調処理を施すと図 1.2(c) に示す画像が得られる．ここで，図 1.2(b) 中の格子は，加重マトリクス [9] と呼ばれる配列である．ディジタル画像処理における前処理では，処理画像の 1 画素の値を求めるためには，加重マトリクスの重みと画素値の積をマトリクスのサイズ分計算し，その総和を計算する必要がある．処理画像全体を得るためには，この処理を画像の全ての画素に対して行わなくてはならない．ここで，画像の画素数を M×N，マトリクスのサイズを L×L とすると，必要となる演算回数は以下の式で表され，マトリクスの大きさと共に 2 乗のオーダーで増加していく．

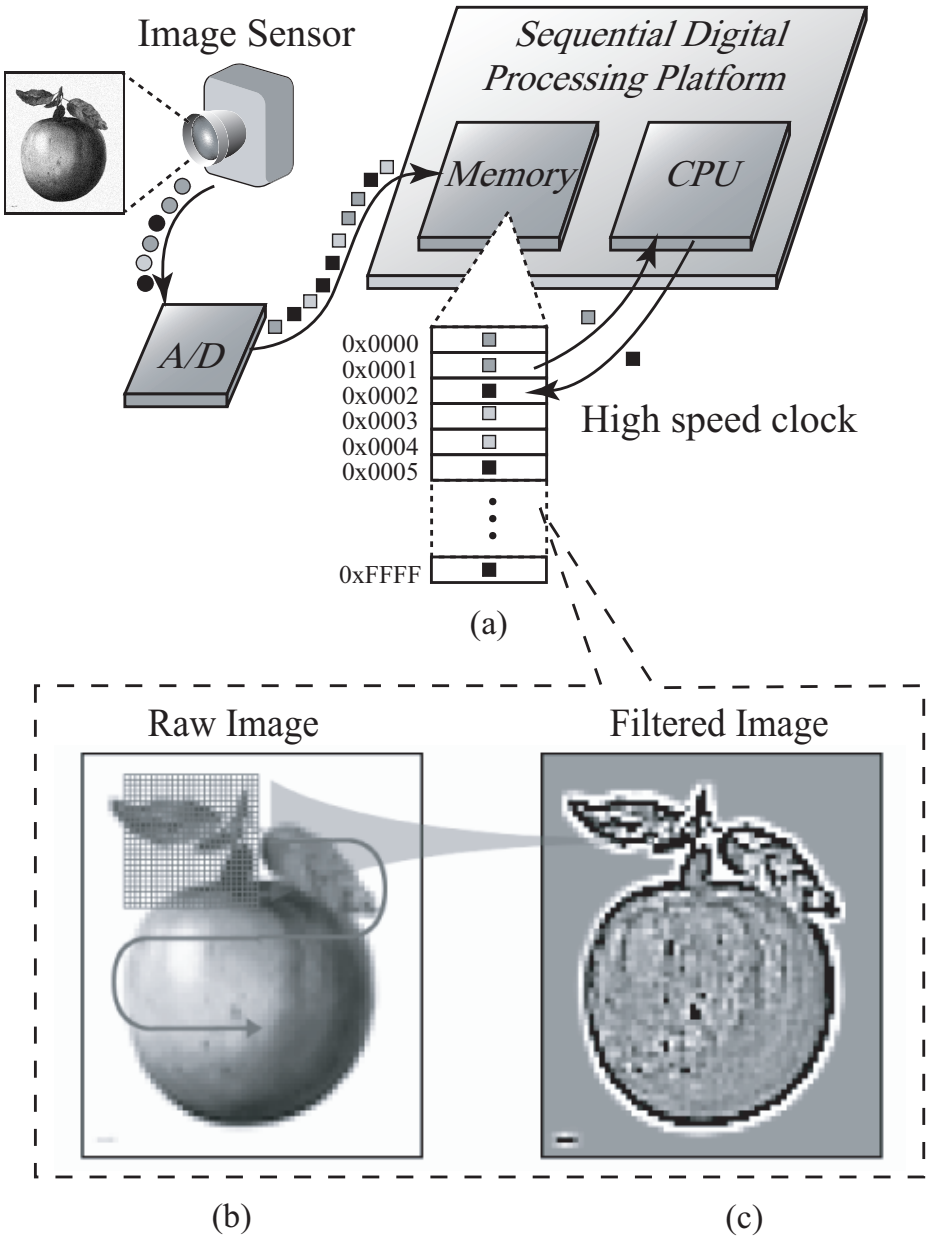


図 1.2: (a) 従来の逐次型視覚情報処理システム．CCD もしくは CMOS イメージセンサで得られた輝度分布は，A/D 変換されてディジタル計算機のメモリへと格納される．ディジタル計算機では，CPU がメモリに格納された視覚情報にアクセスし，プログラムに従って逐次的に画像処理が進められていく．(b) 逐次型視覚情報処理システムにおける処理の様子．処理画像の 1 画素の値を得るためには，加重マトリクス (図中の格子) と画素値の積をマトリクスのサイズ分計算し，その総和を計算する必要がある．(c)(b) の画像に輪郭強調処理を施した画像．

$$
\begin{aligned}
(\text{演算回数}) &= (\text{画素数}) \times (\text{加重マトリクスサイズ}) \\
&= M \times N \times L^2
\end{aligned}
$$

一般に自然画像は，照明条件を始め変化に富んでおり，これを頑強に処理するためにはサイズの大きなマトリクスが必要となる．このため，計算量は莫大なものとなり，これを逐次的に行っていくのは実に非効率的である．

従来の逐次型演算システムで，実時間演算を実現するためには，一回あたりの演算にかける時間を極端に短くする必要がある．このため，非常に高速なクロックレートが求められるが，クロックレートの上昇は消費電力の増大に直結し，さらには放熱機構や大容量電源のためにシステム自体の大規模化を招く．故に，このような逐次演算型のアーキテクチャは，実時間処理，小型，低消費電力，及び環境変化への頑強性といった要件を必要とする場面には適さない [10].

一方，生体は時々刻々変化する視覚環境において，実時間で安定した視覚情報処理を行うことができる．生体の視覚神経回路の構成要素である神経細胞の反応速度は数十 ms のオーダーであり，現在の工学的回路システムを構成する半導体素子に比べて桁違いに遅い．それにも関わらず，外界知覚を実に俊敏に行っている．これは，生体の視覚神経系が，神経回路のダイナミクスを用いて視覚情報を並列的に処理しているためである．空間的広がりをもった視覚情報を，そのまま二次元的に処理するため効率がよい．

本研究では，生体の視覚情報処理の中でも，特に昆虫に注目した．次節では，昆虫の視覚情報処理について概説し，昆虫視覚を模倣した先行研究の紹介を行うとともに，本研究が昆虫を模倣することで実現を目指す視覚センサについて述べる．

1.3 昆虫の視覚情報処理とその模倣システム

図 1.3 に昆虫視覚系の一例として，ハエの視覚中枢の模式図を示す．複眼の網膜上には，視細胞が二次元的に配置し，外界の光強度変化の空間的な分布を捉えている．生体の視細胞は，一定の強度の光を当て続けるとその応答が次第に減衰する「順応」と呼ばれる特性を有しており，このため光強度ではなく光強度変化が捉えられる．視細胞で得られた視覚情報は，網膜の下にある視葉 (optic lobe) と呼ばれる視覚中枢へと伝えられ，餌や捕食者を始めとして，生物学的意義に富んだ情報が抽出される．

視葉において視覚情報は，ラミナ (lamina)，メダラ (medulla)，ロビュラ複合体 (lobular and lobular plate) の三つの領域に順次送られ処理される．これらの領域での視覚情報は，網膜での視細胞の二次元配列を一対一に写しとったまま行われる．このような構造は視野再現構造と呼ばれ，哺乳類の大脳視覚野でも同様の構造が見られる．

視細胞の情報は，まずラミナへと送られる．この領域において，視細胞から直接入力を受ける神経細胞では，その細胞に興奮性応答が起こる空間領域の周辺領域に光が当たると，応答が抑制されるようになっている (図 1.4)．これを側抑制といい，これ

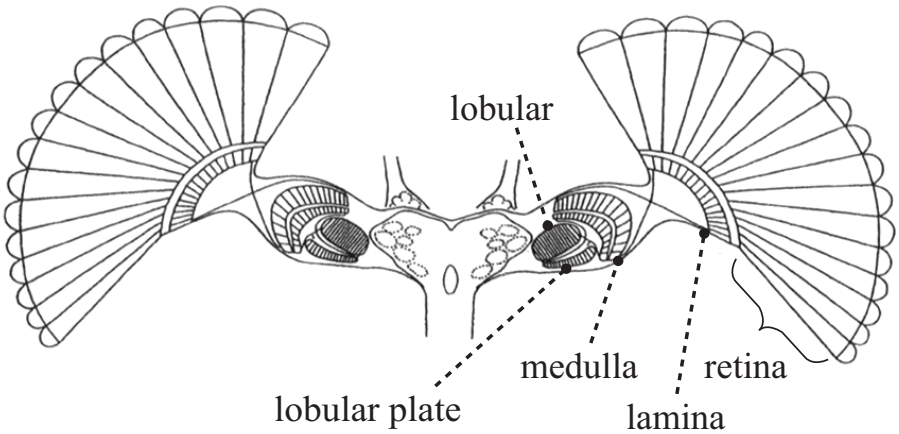


図 1.3: イエバエの視葉の模式図 [11]．眼を含む頭部の断面図．左右の扇形の領域は複眼を示す．

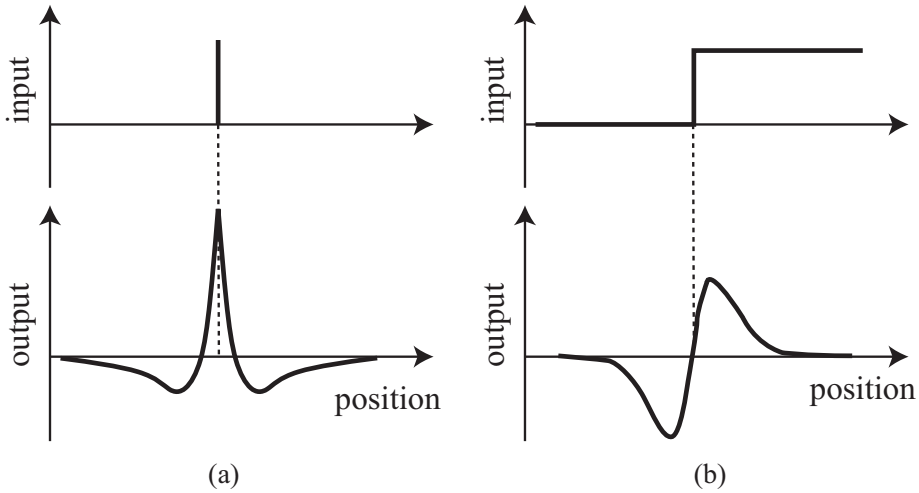


図 1.4: ラミナ出力の空間特性．(a) 網膜から空間的インパルス入力を受けた際のラミナ出力．横軸は細胞の位置を示し，縦軸は細胞の応答強度を示す．信号入力部位の周辺では，負の出力を示す．これを側抑制と呼ぶ．(b) 輪郭領域におけるラミナ出力．輪郭部位で正負に大きく振れる出力を示す．

によって輪郭線の強調等が行われる．メダラでは，ラミナからの出力をもとに，局所での運動方向検知等が行われる．ラミナやメダラの神経細胞が狭い空間領域の情報を取り扱うのと対照的に，ロビュラ複合体では局所的な情報が統合され，より広い空間領域にわたる情報が抽出される．

以上のように視葉では，各領域を構成する並列神経回路によって，視覚情報の取得と同時に処理が行われ，飛行経路選択，逃避，追跡等，多種多様な視覚制御運動に求められる全ての情報が出力される．今日の逐次型ディジタル演算装置が，高速クロックを利用し，莫大なエネルギーをつぎ込んでようやく行う処理を，昆虫は，あの小さな頭部内の限られた神経回路網のみを用いて，極わずかなエネルギーで瞬時に行ってしまうのである．

この小さな視覚制御機械の持つ高効率・多機能性は，古くから多くの研究者たちの興味を引き続けた (総説として [12])．昆虫の視覚制御運動解析において，大きな第一歩を築いたのは Reichardt らである [13]–[16]．彼らは，図 1.5 に示すような実験系を組んで，様々な視覚入力に対するハエの行動を詳細に調査することにより，視葉内部で行われている情報処理について深い洞察を与えた．彼らは視葉内部の様々な神経ネットワークモデルを提案したが，その一つである運動検知モデルの EMD (elementary

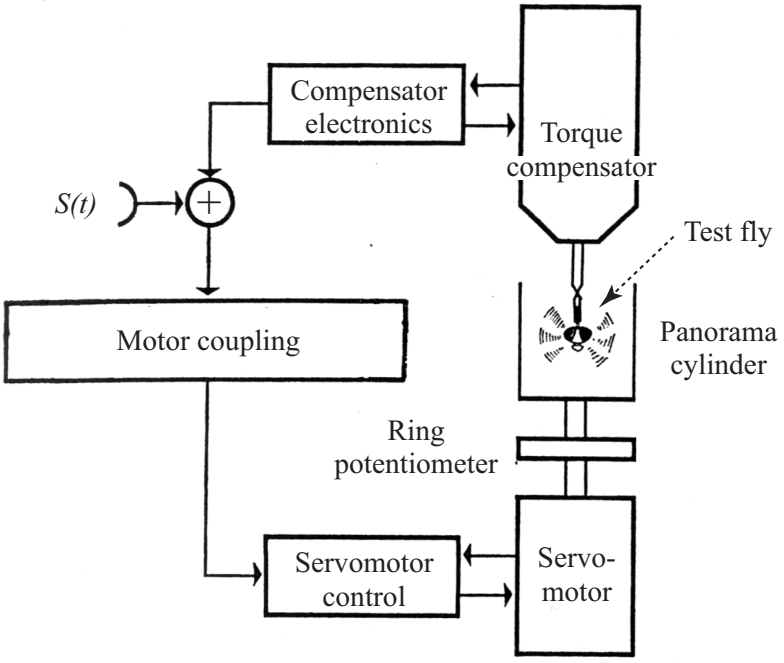


図 1.5: Reichardt らによって考案された，視覚制御運動解析システムの模式図 [13]．視覚刺激用パターンの描かれたシリンダ (Panorama cylinder) の中心にハエ (Test fly) を固定し，ハエの運動によるトルクに従って，モータ (Servomotor) 制御によりシリンダを回転させる．図中の $S(t)$ はシリンダー上に描かれた物体の運動をシミュレートする.，$S(t)$ が 0 の場合，シリンダー上の視覚刺激は，ハエにとって静止した背景をシミュレートする．このシステムにより，視覚刺激に対するハエの行動を定量的に解析できる．

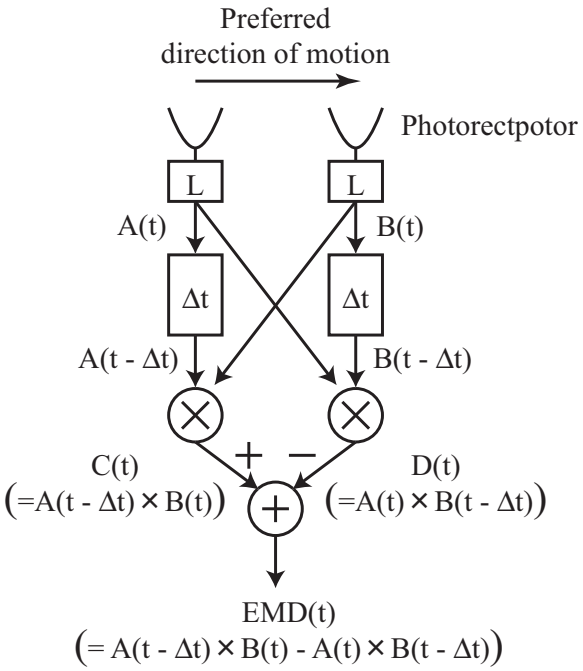


図 1.6: Reichardt らによって提案された運動検知モデル．特定の方向の動きに応答を示す．二つの視細胞で受容した信号はフィルタ L を通り，A(t)，B(t) という二つの出力を生み出す．L は光強度変化に対して瞬間的出力 (持続時間 40-200 ms 程度) を行い，暗から明への変化に対しては正に，明から暗への変化に対しては負に応答する [21][22]．L の出力信号は，Δt の遅延を受けた後，隣の L の出力信号と掛け合わされる (図中 C(t)，D(t))．C(t) と D(t) の差がモデルの出力となる (図中 EMD(t))．このモデルは，二つの視細胞間を Δt で左から右へと横切る運動に対し強く応答する．

motion detector，図 1.6) は，後述する工学的応用システムに大きな影響を与えた．その後，視覚制御運動は，行動レベルだけでなく，神経活動レベルでも研究が進み，衝突回避等いくつかの機能については，その機能を請け負う細胞又は細胞群が特定されるまでに至っている [17]–[20]．

一方，神経模倣に関する先駆的研究を行った Mead らによって，CMOS 回路を用いた神経模倣の手法やその潜在能力の高さを示されて以来 [23]，昆虫のもつ優れた視覚制御を工学的に応用するための研究が，活発に行われるようになった．

昆虫視覚系に学んだ計算原理を実時間視覚制御に応用した第一の試みは，Franceschini らによって行われた [24][25]．彼らは，フォトセンサアレイを用いて図 1.6 に示す EMD のアーキテクチャを模倣した視覚センサを作成した．これを自走型のロボットに搭載して障害物回避実験を行うことにより，生体模倣アーキテクチャの高いポテンシャルを示した．しかしながら，このセンサは集積回路化されていなかったため，比較的大規模なものであった．

次いで，Liu らは EMD を模倣した回路を aVLSI (analog very large scale integrated) 回路に集積化することにより小型化を図った [26]．更にこれを，小型で高速な自走型ロボットに搭載することにより，生体模倣による高速な視覚制御運動を実証した．ま

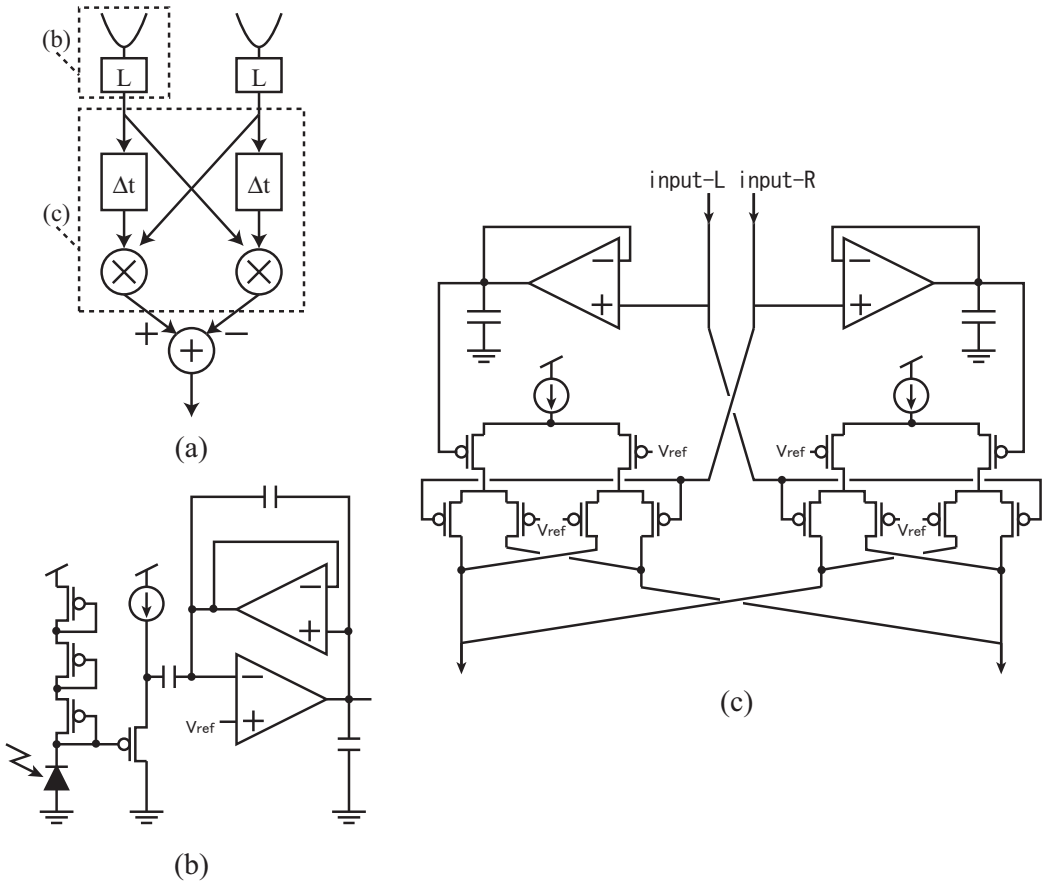


図 1.7: Harrison によって設計された EMD の模倣回路 (動作の詳細は [27] を参照). 本回路における計算値は，回路内の電圧値や電流値として表現されており，計算結果は画像の取得にほとんど遅れる事なく得る事が出来る．(a) EMD のモデル (図 1.6 参照)．(b) 図 (a) 中の (b) で示された部分を模倣する回路．(c) 図 (a) 中の (c) で示された部分を模倣する回路.

た，Harrison は EMD を模倣したセンサを同心円状に配置し，視野の中央から周辺へと拡がる像を捉える事による，衝突回避用 aVLSI 回路を作成した (図 1.7)[27]．この aVLSI 回路も，自走型のロボットを用いて，実環境で高速に動作することが確認された.

上記神経模倣システムでは，神経回路のアーキテクチャを模倣して設計したカスタムアナログ回路の物理特性を用いて，電圧や電流の分布という形で情報表現及び計算が行われる．このため，神経回路における計算同様，画像の取得にほとんど遅れる事なく所望の情報を得ることができ，消費電力も従来の逐次ディジタル演算システムと比較すると圧倒的に低い．しかしながら，このようなアーキテクチャを持ったセンサは，固定された回路によって計算を行うため，汎用性は無きに等しい．また，昆虫の神経ネットワークの中でも，解明されている極一部についてのみ実装しているため，特定の用途限定となっている．このため，別の情報を抽出するためには，他のセンサが別途必要となってしまう.

本章第一節で述べたように，視覚情報は外界の情報を実に豊富含んでおり，そこから多種多様な情報を抽出できることが，視覚センサを用いることの利点の一つである．実際，昆虫を始め多くの生体が，この利点を活用している．上記センサは，実時間・低消費電力・小型といった特長においては大きな進歩であったが，視覚情報を最大限に活用するためには，ここに更に多機能性又は汎用性が求められる．

そこで本研究では，昆虫視覚系の計算原理に学びながらも，神経回路のアーキテクチャをそのままアナログ回路化するのではなく，今日のアナログとディジタルの技術を適切に組み合わせることにより，低消費電力で瞬時に演算が行えるアナログ回路の利点と，プログラマブルで汎用性が高いディジタル回路の利点を合わせ持った，衝突回避のための視覚センサを開発することを目的とした．

参考文献

[1] 宮本幸昌, 谷口泰弘, 宮森高, “車載画像処理用システム LSI による衝突防止システム,” 東芝レビュー, vol. 58, no.12, pp.54–57, 2003.

[2] 佐々木一人, 河本新二, “安全運転を支援する車載画像処理システム,” 東芝レビュー, vol.59, no.4, pp.28–31, 2004.

[3] R. Dixit, “Microwave and millimeterwave applications in automotive electronics,” Journal of The Franklin Institute, vol.335, no.1, pp.13–21, Jan. 1998.

[4] 黒田浩司, 近藤博司, 笹田義幸, 永作俊幸, “ミリ波レーダの小型化と高性能化,” 日立評論, vol.89, no.08, pp.64–67, Aug. 2007.

[5] 西垣戸貴臣, 大塚裕史, 坂本博史, 大辻信也, “予防安全の高度化を実現するセンサーフュージョン技術,” 日立評論, vol.89, no.8, pp.72–75, Aug. 2007.

[6] N. Kawasaki and U. Kiencke, “Standard Platform for Sensor Fusion on Advanced Driver Assistant Systems Using Bayesian Network,” Proc. of 2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.250–255, Parma, Italy, Jun. 2004.

[7] A. Amditis, A. Polychronopoulos, N. Floudas, and L. Andreone, “Fusion of infrared vision and radar for estimating the lateral dynamics of obstacles,” Information Fusion, vol.6, pp.129–141, Jul. 2005.

[8] 島伸和, 馬場崎正博, 秋月義樹, 本田加奈子, 樋口崇, 東田博文, 中村隆一, “運転支援システム用フュージョンセンサの開発,” 富士通テン技報, vol.37, pp.31–39, Jun. 2001.

[9] 田村秀行, コンピュータ画像処理, オーム社, 東京, 2002.

[10] G. Indiveri and R. Douglas, “Neuromorphic Vision Sensors,” Science, vol.288, no.5469, pp.1189-1190, May 2000.

[11] 水波誠, 昆虫–驚異の微小脳, 中央公論新社, 東京, 2006.

[12] M. V. Srinivasan and S. Zhang, “Visual Motor Computations in Insects,” Annu. Rev. Neurosi. vol.27, pp.679–696, Jul. 2004.

[13] W. Reichardt and T. Poggio, “Visual control of orientation behaviour in the fly Part I,” Q. Rev. Biophys., vol.9, no.3, pp.311–375, Aug. 1976.

[14] T. Poggio and W. Reichardt, "Visual control of orientation behaviour in the fly Part II," Q. Rev. Biophys., vol.9, no.3, pp.377–438, Aug. 1976.

[15] W. Reichardt, T. Poggio, and K. Hausen, "Figure-Ground Discrimination by Relative Movement in the Visual System of the Fly Part I," Biol. Cybernet., vol.35, no.2, pp.81–100, Nov. 1979.

[16] W. Reichardt, T. Poggio, and K. Hausen, "Figure-Ground Discrimination by Relative Movement in the Visual System of the Fly Part II," Biol. Cybernet., vol.46, supp.1, pp.1–30, Jan. 1983.

[17] M. Egelhaaf, "On the Neuronal Basis of Figure-Ground Discrimination by Relative Motion in the Visual System of the Fly Part I," Biol. Cybernet., vol.52, no.2, pp.123–140, Jun. 1985.

[18] M. Egelhaaf, "On the Neuronal Basis of Figure-Ground Discrimination by Relative Motion in the Visual System of the Fly Part II," Biol. Cybernet., vol.52, no.3, pp.195–209, Jul. 1985.

[19] M. Egelhaaf, "On the Neuronal Basis of Figure-Ground Discrimination by Relative Motion in the Visual System of the Fly Part III," Biol. Cybernet., vol.52, no.4, pp.267–280, Aug. 1985.

[20] M. Egelhaaf and A. Borst, "A Look into the Cockpit of the Fly: Visual Orientation, Algorithms, and Identified Neuron," J. Neurosci., vol.13, no.11, pp.4563-4574, Nov. 1993.

[21] S. B. Lauphlin, "Matching coding, circuits, cells, and molecules to signals: General principles of retinal design in the fly's eye," Progr. Ret. Eye Res., vol.13, pp.165–196, 1994.

[22] J. H. van Hateren, "Theoretical predictions of spatiotemporal receptive-fields of fly LMCs, and experimental validation," J. Comp. Physiol., vol.171, no.2, pp.157–170, Sep. 1992.

[23] C. Mead, Analog VLSI and Neural Systems, Addision-Wesley, Reading, MA, 1989.

[24] N. Franceschini, J. M. Pichon, and C. Blanes, "From insect vision to robot vision," Philos. Trans. Roy. Soc. Lond. B, vol.337, iss.1281, pp.283–294, Sep. 1992.

[25] N. Franceschini, "Visual guidance based on optic flow: a biorobotic approach," J. Physiol. Paris, vol.98, pp.281–292, 2004.

[26] S. C. Liu and A. Usseglio-Viretta, "Fly-like visuo-motor responses on a robot using aVLSI motion chips," Biol. Cybernet., vol.85, no.6, pp.449–457, Dec. 2001.

[27] R. R. Harrison, "A biologically inspired analog IC for visual collision detection," IEEE Trans. on Circuits and Systems I, vol.52, pp.2308–2318, Nov. 2005.

第2章　バッタ視覚神経系における衝突検知

2.1　緒言

視覚を用いて衝突回避を行うためには，外界の二次元投影情報である視覚情報から，何らかの方法により三次元的な奥行き情報を抽出しなければならない．例えば，我々ヒトを初めとした霊長類や鳥類，肉食動物等の脊椎動物は，両眼に投影された像のずれ（両眼視差）や両眼のなす角度（両眼輻輳角）といった両眼相互作用を用いて，対象物との正確な距離を知覚することができる．

距離の正確な知覚という目的においては，上記の様な両眼情報の統合による高度な処理が求められるが，衝突回避という目的に限った場合，必ずしも両眼を用いた正確な距離の知覚は必要ではない．一眼から得られるより単純な情報で十分な場合が多い [1]–[4]．実際，昆虫を初めとした無脊椎動物の多くは両眼相互作用を利用することが出来ないが [5]，一眼からの視覚情報のみを用いて，衝突経路を接近する物体を認識し，これを回避する優れた能力を備えている [6]．

本研究では，単眼視による衝突回避に関与する細胞群が特定され，またその計算原理が明らかとなっているバッタに注目する．以下，本章では物体接近時における網膜上での像変化について考察し，その変化を如何に利用してバッタが単眼視による衝突回避を実現しているかを説明する．また，本論文で用いる単眼視とは，昆虫が複眼とは別に頭部に持っている単眼 (simple eye) による視覚ではなく，単一眼による視覚 (monocular vision) をさすものとする．

2.2　単眼視衝突検知の光学的背景

物体接近時における網膜上の像変化を考察するため，図 2.1 の様な近軸の系を想定する．直径 D の物体が，焦点距離 f のレンズ光軸上を等速度 v で受光素子に接近する場合を考える．物体–レンズ間距離が $d(t)$ である時に，レンズ後方に設置された受光素子上での像の直径を $a(t)$ とすると，$a(t)$ 及びその時間微分は以下の様に表される．

$$a(t) = \frac{fD}{d(t)} \tag{2.1}$$

$$\dot{a(t)} = -\frac{fD\dot{d(t)}}{d(t)^2} = \frac{fDv}{d(t)^2} \tag{2.2}$$

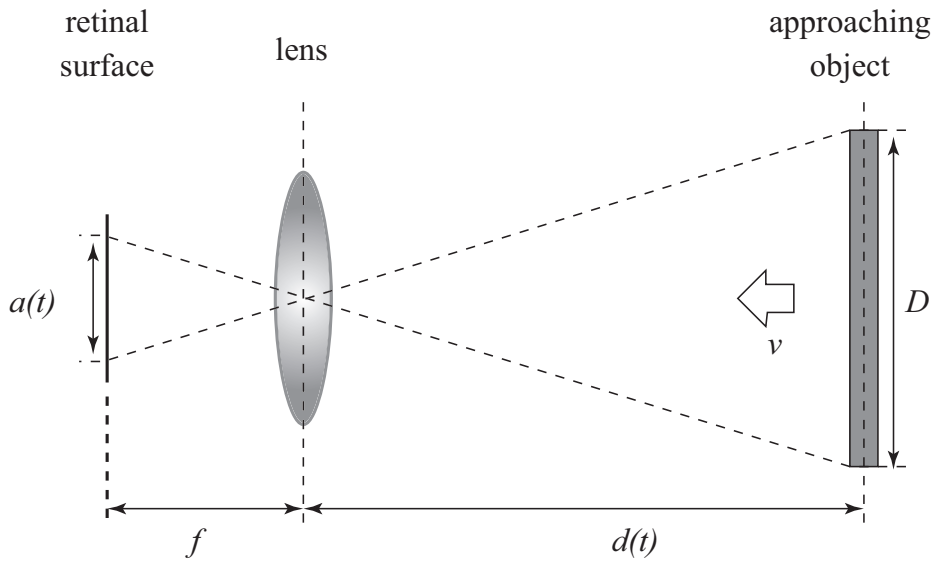


図 2.1: 物体の像が受光面上に投影される様子を示した模式図.

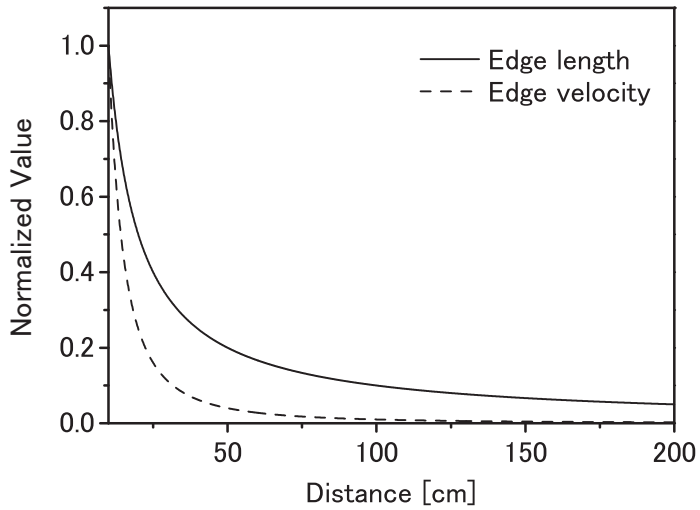


図 2.2: 等速度での物体接近時における像輪郭の長さと移動速度．レンズからの距離を横軸に取り，輪郭の長さを実線で，移動速度を点線で示した．また縦軸はレンズ正面 10cm における値で正規化されている．

ここで，像輪郭の周囲の長さが $a(t)$ に比例すると仮定すると，式 (2.1)(2.2) より，輪郭の周囲の長さ及び移動速度は，物体の接近に伴いそれぞれ d 及び d^2 に反比例して増加することが確認できる (図 2.2)．つまり，これら二つの値は至近距離において急激に増加する．バッタの視覚神経系は，これら二つの手がかりを基に，衝突回避を行っていると考えられている．以降，本論文では，受光面上における像輪郭の，周囲の長さを輪郭長 (edge length)，移動速度を輪郭速度 (edge velocity) と記す.

2.3 神経回路モデルの構成と処理の流れ

バッタ視覚神経系において回避行動を担う神経として，LGMD (lobula giant movement detector)， 及びそのシナプス後細胞である DCMD (descending contralateral movement detector) の 2 つの神経細胞が特定されている [7]–[12]．これらの神経細胞は衝突経路を接近する物体に対し選択的に反応を示すことが確認されており，その反応の起点となる LGMD の入力機構については，その特性を適切に説明できる神経回路モデルが提案されている [16]．以下では，神経回路モデルに沿って，LGMD の接近物体への選択的反応の原理を説明する．

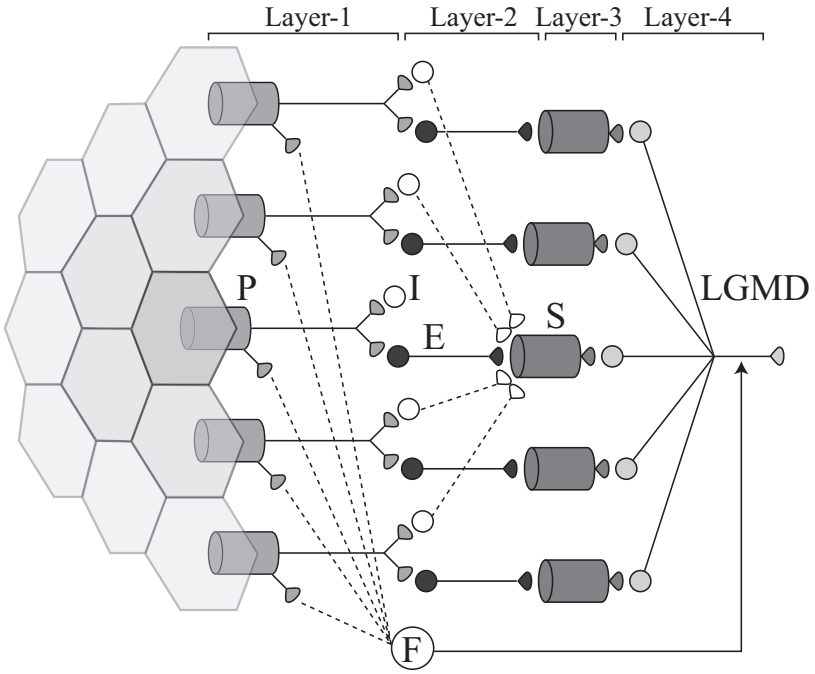


図 2.3: Rind らによって提案された LGMD の神経回路モデル [16].

図 2.3 に，Rind らによって提案された LGMD の神経回路モデルを示す．モデルは四層の神経回路ネットワークにより構成されている．第一層から第三層までは，均一な構造をした細胞群が網膜領域全体に配置された視野再現構造となっており，第四層によりこれらの出力を統合する．実際，LGMD は網膜領域全体に拡がる樹状突起を有しており，この広範な受容野全体で，多数の細胞からの興奮性入力を受ける [13].

まず視覚情報は，光強度変化に対しパルス的興奮を示す第一層 P ユニットにより取得される (図 2.4 実線)．P ユニットの興奮性応答は非常に短時間であるため，輪郭の通過に対して極めて正確に反応する (図 2.5) [14][15]．第二層の E 及び I ユニットは，P ユニットから興奮性応答を受け取る．E ユニットは一定の減衰率を伴った興奮を即第三層 S ユニットへ伝達し (図 2.4 点線)，I ユニットは一定の遅延時間をおいて，E よりも長い時定数の減衰率を伴った抑制性応答を，側方の S ユニットへと伝達する (図 2.4 破線)．I ユニットによる側抑制は近傍のユニットほど強く，距離と共に減衰する

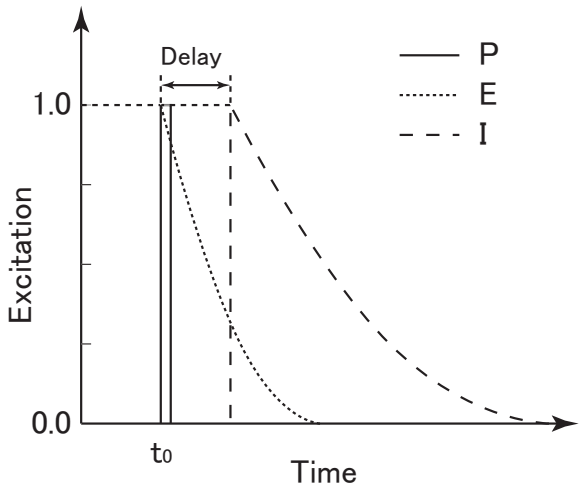


図 2.4: LGMD の神経回路モデル (図 2.3) における各ユニットの，応答の時間特性．時刻 t_0 において光強度変化が起こった場合の応答を示している．実線は第一層 P ユニットの応答を，点線は第二層 E ユニットの応答を，破線は第二層 I ユニットの応答を，それぞれ示す．光強度変化に対しパルス的に応答を示す P ユニットの信号を受け，E ユニットが即応答するのに対し，I ユニットは一定の遅延時間後に応答する．

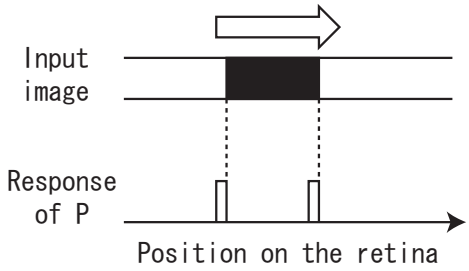


図 2.5: P ユニット応答の空間特性．入力画像 (Input image) は白い背景下で黒い物体が右向きに移動している様子を示している．物体輪郭の通過を捉えた P ユニットのみが瞬間的に応答する．背景–物体間のコントラストの極性が反転しても，応答は同様である．

(図 2.6 点線)．第三層では S ユニットが，同一位置からの興奮と周辺からの抑制を線形的に加算し，一定の閾値以上ならばその値を興奮性応答として第四層へと伝える．最後に，第四層において LGMD が全 S ユニットの応答を線形的に加算し，この値を神経回路全体の反応として出力する．また，図の下部にある F ユニットを介したフィードフォーワード抑制経路が存在するが，これは，背景光の急激な変化等，視野全体の変化に対する反応を抑制する．

この構造では，網膜上を移動する輪郭速度と，側抑制の伝達速度の大小関係が出力強度に大きな影響を与える．抑制の側方への伝達が輪郭の移動よりも速い場合 (図 2.6(a))，興奮性応答を受け取る前に側抑制が拡散するため，第三層 S ユニットの反応

は抑制される事となる．逆に輪郭の移動が抑制伝達より速くなると (図 2.6(b))，S ユニットは強い興奮を示す．この時，興奮する S ユニットの数に従った応答強度が第四層出力として得られる．

前節で考察した通り，輪郭速度は至近距離において急激に増加する．さらに輪郭長も伸びるため，多数の S が興奮する事となり，その結果 LGMD が強く応答する．以上の様な原理でバッタ視覚情報統合神経は，高速で移動する輪郭領域を抽出することにより，至近距離に迫った接近物に対し選択的に反応しているのである．

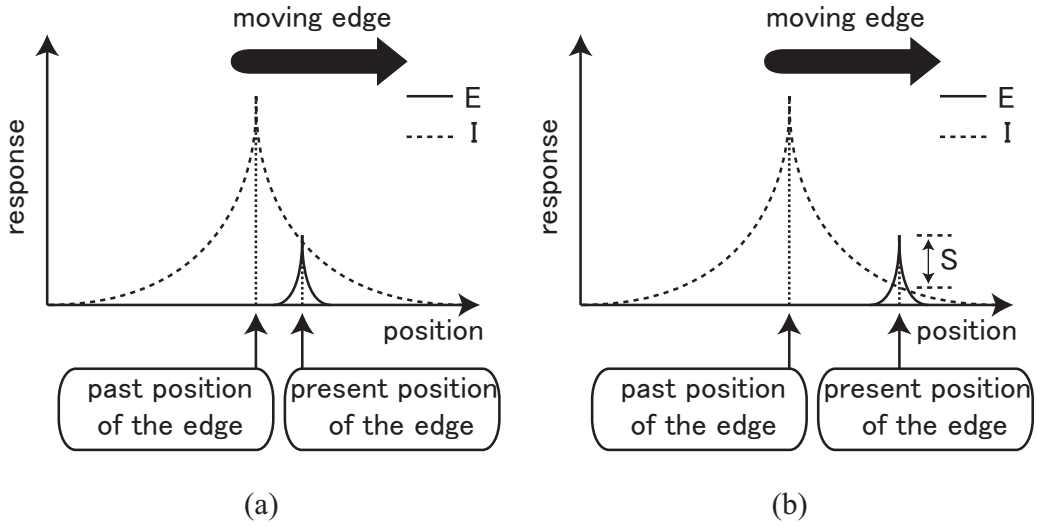


図 2.6: E ユニットの応答と I ユニットの応答の空間特性．実線は E ユニットの応答を示し，点線は I ユニットの応答を示す．(a) 輪郭速度が側抑制の伝達速度より遅い場合．E ユニットの応答は I ユニットの応答により抑制される．(b) 輪郭速度が側抑制の伝達速度より速い場合．E ユニットの応答と I ユニットの応答の差分が，S ユニットの応答となる．

2.4 神経回路のアルゴリズムとアーキテクチャ

以上のように，LGMD は，実行している視覚情報処理が実に単純であるにも関わらず，ロバストに衝突の危険を検出することができる．この魅力的なシステムを工学的に応用しようとする試みは，これまでも少なからず行われてきた [17]–[21]．中でも，実環境応用を深く考慮に入れた研究としては，小型ロボットを用いて衝突回避実験を行ったものが報告されている [17][20]．これは，ロボットに搭載した CCD イメージセンサの画像情報を，フレーム・グラバーによって PC (personal computer) に取り込み，PC 上の LGMD 模倣ソフトウェアで処理した結果によってロボットを制御するものである．ロボットは低速ではあるものの，衝突回避に成功した．また，道路上で撮影された動画を用いてシミュレーションを行う事により，自動車への応用を検証した例もある [18]．

上述した先行研究は，いずれも興味深い結果を残しており，LGMD を模倣した革新的な視覚的衝突回避システムの実現を予期させるものである．しかしながら，いずれの研究も従来の逐次型ディジタル計算機を用いており，ソフトウェアによってアルゴリズムを記述するにとどまっている．第一章で述べたように，従来型のシステムは視覚情報を効率的に処理できないため，ここに生体から得られた魅力的なアルゴリズムを実装したところで，生体視覚情報処理の持つ実時間・小型・低消費電力といった利点を十分に生かすことはできない．アルゴリズムは，それを処理するのに適したアーキテクチャが伴って初めて効果を発揮する．このため，生体模倣を行う場合，生体の持つ特長を引き出すためにはソフトウェアではなく，ハードウェアによる模倣が必要であると考えられる．

本研究は，ハードウェアによって LGMD の計算原理を模倣することにより，生体視覚情報処理の利点を最大限に生かした衝突回避システムの実現を目指すものである．このため，LGMD をソフトウェアで模倣した先行研究とはアプローチを異にしている．

2.5 結言

本章では物体接近時における網膜上での像変化について考察し，その変化を如何に利用して LGMD が衝突検知を実現しているかを説明した．また，LGMD の衝突検知アルゴリズムを模倣した先行研究について説明を行い，ハードウェアによって LGMD の計算原理の模倣を目指す，本研究内容との違いを明らかにした．

参考文献

[1] M. H. Holmqvist and M. V. Srinivasan, “A visually evoked escape response of the house fly,” J. Comp. Physiol., vol.169, no.4, pp.451–459, Oct. 1991.

[2] Y. Wang and B. J. Frost, “Time to collision is signalled by neurons in the nucleus rotundus of pigeons,” Nature, vol.356, pp.236–238, Mar. 1992.

[3] H. Sun and B. J. Frost, “Computation of different optical variables of looming objects in pigeon nucleus rotundus neurons,” Nat. Neurosci., vol.1, no.4, pp.296–303, Aug. 1998.

[4] F. C. Rind and P. J. Simmons, “Seeing what is coming: building collision-sensitive neurones,” Trends in Neuroscience, vol.22, iss.5, pp.215–220, May 1999.

[5] 水波誠, 昆虫–驚異の微小脳, 中央公論新社, 東京, 2006.

[6] L. F. Tammero and M. H. Dickinson, “The influence of visual landscape on the free flight behavior of the fruit fly Drosophila melanogaster,” J. Exp. Biol., vol.205, pp.327–343, Feb. 2002.

[7] M. O’Shea and J. L. Williams, “The anatomy and output connections of a locust visual interneuron: the lobula giant movement detector (LGMD) neuron,” J. Comp. Physiol., vol.91, no.3, pp.257–266, Sep. 1974.

[8] N. Hatsopoulus, F. Gabbiani, and G. Laurent, “Elementary computation of object approach by a wide-field visual neuron,” Science, vol.270, no.5238, pp.1000–1003, Nov. 1995.

[9] F. C. Rind, “Intracellular characterization of neurons in the locust brain signaling impending collision,” J. Neurophysiol., vol.75, iss.3, pp.986–995, 1996.

[10] F. C. Rind and P. J. Simmons, “Orthopteran DCMD neuron: a reevaluation of responses to moving objects I,” J. Neurophysiol., vol.68, iss.5, pp.1654–1666, 1992.

[11] P. J. Simmons and F. C. Rind, “Orthopteran DCMD neuron: a reevaluation of responses to moving objects II,” J. Neurophysiol., vol.68, iss.5, pp.1667–1682, 1992.

[12] F. C. Rind, "A chemical synapse between two motion detecting neurones in the locust brain," J. Exp. Biol., vol.110, iss.1, pp.143–167, 1984.

[13] M. O'Shea and C. H. F. Rowell, "The neuronal basis of a sensory analyser, the acridid movement detector system II," J. Exp. Biol., vol.65, iss.2, pp.289–308, 1976.

[14] D. Osario, "The temporal properties of non-linear transient cells in the medulla of the locust medulla," J. Comp. Physiol., vol.161, no.3, pp.431–440, May 1987.

[15] D. C. O'Carrol, D. Osorio, A. C. James, and T. Bush, "Local feedback mediated via amacrine cells in the insect optic lobe," J. Comp. Physiol., vol.171, no.4, pp.447–455, Nov. 1992.

[16] F. C. Rind and D. I. Bramwell, "Neural network based on the input organization of an identified neuron signaling impending collision," J. Neurophysiol., vol.75, no.3, pp.967–985, Mar. 1996.

[17] M. Blanchard, F. C. Rind, and P. F. M. J. Verschure, "Collision avoidance using a model of the locust LGMD neuron," Robot. Auton. Sys., vol.30, no.1, pp.17–38, Jan. 2000.

[18] S. Bermudez and P. Verschure, "A collision avoidance model based on the Lobula Giant Movement Detector(LGMD) neuron of the locust," Proc. of the 2004 IJCNN, Budapest, Hungary, Jul. 2004.

[19] S. Yue, F. C. Rind, M. S. Keil, J. Cuadri, and R. Stafford, "A bio-inspired visual collision detection mechanism for cars: Optimisation of a model of a locust neuron to a novel environment," NeuroComputing, vol.69, pp.1591–1598, Aug. 2006.

[20] S. Yue and F. C. Rind, "Collision detection in complex dynamic scenes using an LGMD-based visual neural network with feature enhancement," IEEE Trans. Neural Netw., vol.17, no.3, pp.705–716, 2006.

[21] S. Yue and F. C. Rind, "Visual motion pattern extraction and fusion for collision detection in complex dynamic scenes," Computer Vision and Image Understanding, vol.104, iss.1, pp.48–60, Oct. 2006.

第3章　衝突検知のための電子回路モデル

3.1　緒言

バッタの視覚統合神経であるLGMDは，輪郭長や輪郭速度といった輪郭情報を抽出することよって衝突の危険を検知し，回避行動の必要性を即座に運動神経へと伝えている [1]．抽出している情報も抽出する方法も，実に単純であるにも関わらず，バッタは自然界で柔軟な衝突回避を実現している．しかしながら，前章で述べたように，この魅力的な衝突回避の実現法も，PC上のソフトウェアによって模倣アルゴリズムを記述したところで，生体視覚情報処理の利点を生かすことができない．実時間，小型，低消費電力といった利点を生かすためには，LGMDで行われている計算原理をハードウェアに組み込むことが必要である．

本研究では，衝突回避システムのハードウェア実装に向けて，まず，LGMDの計算原理を模倣する電子回路モデルを考案した．本章では，この電子回路モデルの動作の説明を行い，次いで，この回路の実用性を検証するために行ったコンピュータシミュレーションについて述べる．

3.2　衝突検知のための視覚情報処理

図3.1に，LGMDで行われている衝突検知を目的とした視覚情報処理の要約を示す．図中の点線で囲まれた部分は，神経回路モデル (図2.3) において視野再現構造をもった第一層から第三層までの1画素分の情報処理を示し，下部にある空間総和 (Spatial summation) のブロックは第四層の情報処理を示す．本図に示された情報処理をハードウェア化することによって，効率的な衝突検知システムの実現を目指す．

各画素では，光強度変化に対する一過性応答 (Transient response to light) により，興奮信号Eを生成する．この信号を遅延させ減衰時間を延長させた後 (Delay and Extention of decay time)，側方へ拡散させた信号により側抑制を行う．図3.1中のIは，神経回路モデルにおいて側方からの抑制を集約したものに相当する．興奮信号Eと抑制信号Iの差分が各画素の出力Sとなり，Sの空間総和が最終出力となる．

ハードウェア化にあたって，最も大きな問題となるのが図3.1中の灰色で示された部分である．これは，抑制信号の側方への拡散を行うための機構であるが，この部分をそのままハードウェア化するためには，周辺にある多数の画素との接続が求められるため莫大な配線が必要となる．生体の神経回路では，このような接続を神経細胞が

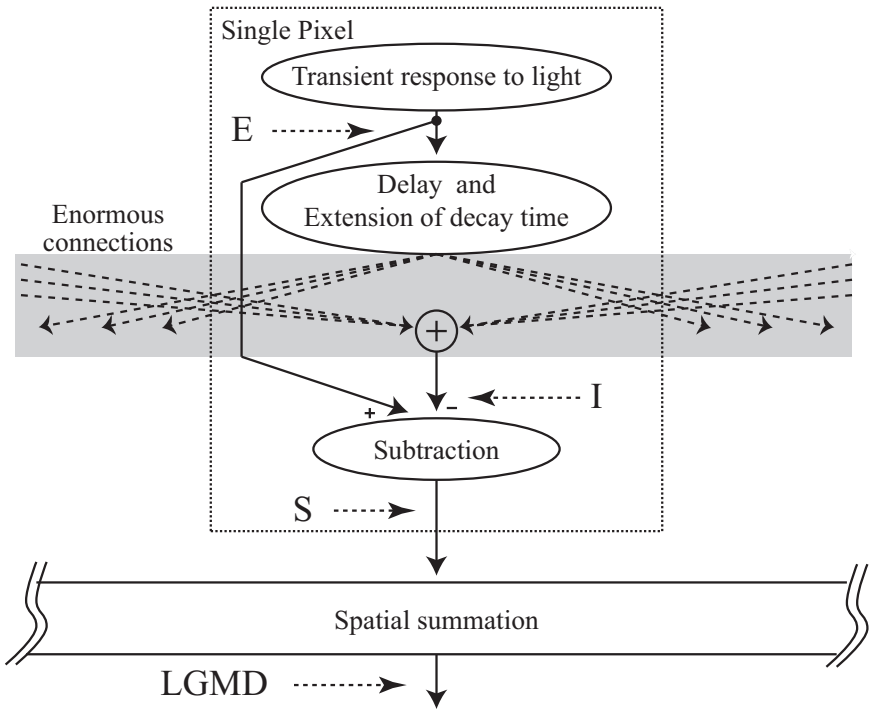


図 3.1: LGMD における視覚情報処理の流れ．E，S，LGMD は，神経回路モデル (図 2.3) における同一名の細胞の応答に相当し，I は，神経回路モデルにおいて側方からの抑制を集約したものに相当する．

柔軟に実現しているが，工学的な電子回路では，この様な接続は容易には実現できない．

そこで本研究では，この部分を抵抗回路網 [2] を利用して簡素化することを試みた．抵抗回路網とは，図 3.2(a) に示すように隣接ノード同士を抵抗で接続したものであり，インパルス入力に対して，図 3.2(b) に示すような，距離と共に等比数列的に減衰する出力を行う．位置 0 へのインパルス入力に対する，位置 n での電圧 V_n は以下の式で表される．

$$V_{|n|} = \gamma^{|n|} V_0 \tag{3.1}$$

$$\gamma = 1 + \frac{1}{2L^2} - \frac{1}{L}\sqrt{1 + \frac{1}{4L^2}} \tag{3.2}$$

$$L = \sqrt{\frac{R_\mathrm{b}}{R_\mathrm{a}}} \tag{3.3}$$

図 3.2 に見られるとおり，抵抗回路網は単純な構造をしているにも関わらず，空間的に減衰する信号を瞬時に拡散させることが出来る．このため，抑制信号の側方への拡散を効率的に実現する目的に，抵抗回路網は適している．

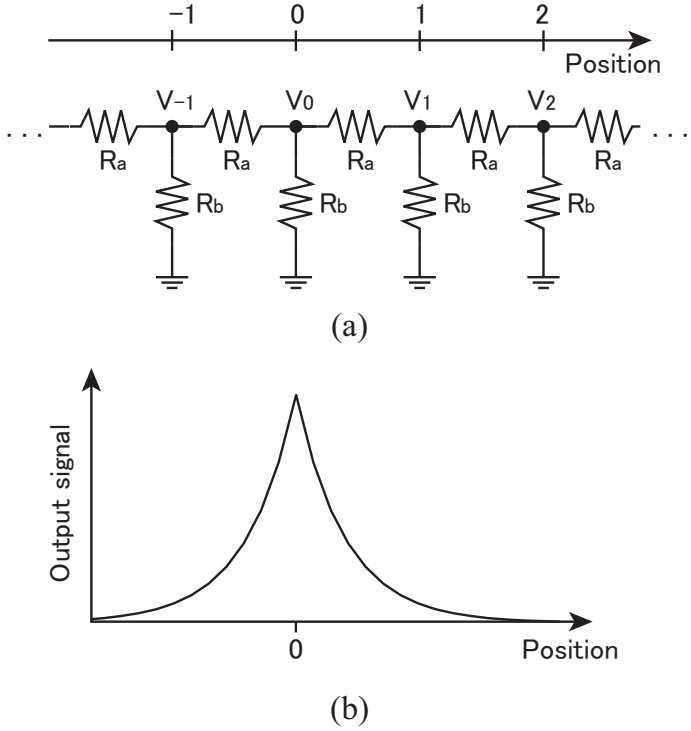


図 3.2: (a) 抵抗回路網の模式図．(b) 空間インパルス入力に対する典型的な抵抗回路網出力．

3.3 電子回路モデルの構成と処理の流れ

図 3.1 より，LGMD を模擬する上で必要な機構は以下の 4 点にまとめられる．

1. 光強度変化に対する一過性応答
2. 遅延の発生及び減衰時定数の延長を行う機構
3. 応答を周囲に伝達する機構
4. 応答の差分を取る機構

図 3.3 に，これらを基に考案した電子回路モデルを示す [3]．図は 1 画素分のモデルであり，実際はこれを二次元的に配列した回路を想定した．ここで，V_{photo}，V_{D}，V_{E}，V_{G}，V_{H}，V_{I}，V_{S} は各ノードでの電圧を示している．電圧 V_{E}，V_{S} は，神経回路モデルにおける E，S ユニットの出力にそれぞれ相当し，電圧 V_{I} は神経回路モデルにおいて側方からの I ユニットによる抑制を集約したものに相当する．また，上部にある電圧源 V_{photo} は光センサ出力に相当し，その時刻における光強度に応じた電圧を発生するものとする．以下，この回路モデルの動作について説明する．

まず，光強度に応じた電圧 V_{photo} を入力として，R_1，C_1 からなるハイパスフィルタ及び整流器により，神経回路モデルにおける E ユニット出力に相当する V_{E} が得ら

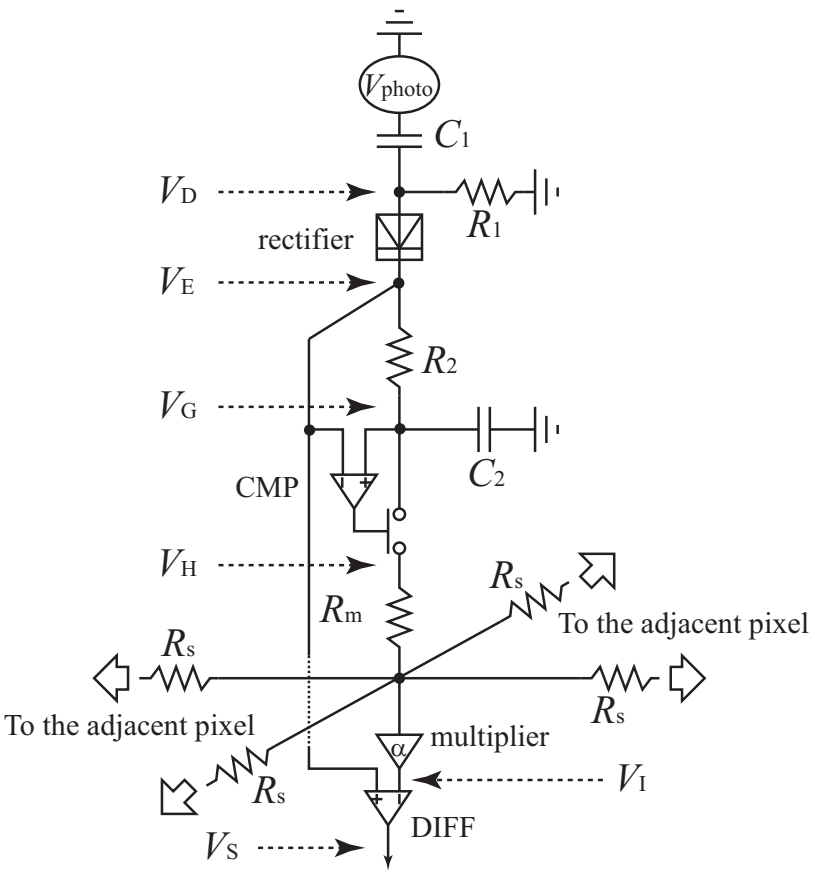


図 3.3: LGMD の電子回路モデル (一画素分)．各画素は抵抗 R_s を介して接続されている．電圧 V_E，V_S は，神経回路モデルにおける E，S ユニットの出力にそれぞれ相当し，電圧 V_I は神経回路モデルにおいて側方からの I ユニットによる抑制を集約したものに相当する．

れる．ハイパスフィルタの伝達関数，及び V_E は以下の式で与えられる．

$$\frac{V_D}{V_{photo}} = \frac{sR_1C_1}{sR_1C_1+1} \tag{3.4}$$

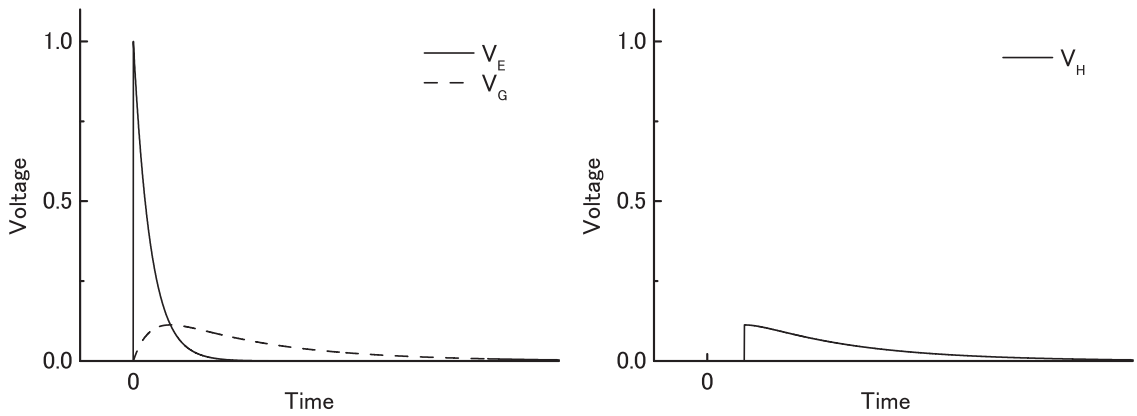
$$V_E = |V_D| \tag{3.5}$$

以降の全信号の起点となる V_E が整流されているため，本モデルは物体–背景間のコントラスト極性に依存しない出力を行う．V_{photo} のステップ入力に対する V_E の応答を図 3.4(a) の実線で示す．

次に，V_E は二分岐され，一方は直接最下段に位置する差動アンプ (DIFF) に入力され，他方は R_2，C_2 からなるローパスフィルタに入力される．このローパスフィルタの伝達関数は以下のように表される．

$$\frac{V_G}{V_E} = \frac{1}{sR_2C_2+1} \tag{3.6}$$

V_{photo} のステップ入力に対する V_G の応答を図 3.4(a) の点線で示す．このローパスフィルタは，コンパレータ (CMP) 制御で開閉するスイッチを介して抵抗回路網に接続し



(a) V_{E}，V_{G} の応答　　(b) V_{H} の応答

図 3.4: V_{photo}=1_{+}(t) の入力に対する V_{E}，V_{G}，V_{H} の応答

ている．スイッチ接続先の電圧 V_{H} は以下の式で与えられる．

$$V_{\mathrm{H}} = \begin{cases} 0 & (V_{\mathrm{E}} > V_{\mathrm{G}}) \\ V_{\mathrm{G}} & (V_{\mathrm{E}} \leq V_{\mathrm{G}}) \end{cases} \tag{3.7}$$

V_{photo} のステップ入力に対する V_{H} の応答を図 3.4(b) に示す．

V_{H} は，抵抗回路網を通じて周辺の画素に拡散され，神経回路モデルの I ユニットによる抑制信号に相当する電圧 V_{I} が得られる．ここで，各画素の V_{H} を要素とするベクトルを$\boldsymbol{V_{\mathrm{H}}}$，各画素の V_{I} を要素とするベクトルを$\boldsymbol{V_{\mathrm{I}}}$とすると，これらの関係は以下のように表される．

$$\boldsymbol{T}\boldsymbol{V_{\mathrm{I}}} = -\alpha \frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{m}}} \boldsymbol{V_{\mathrm{I}}} \tag{3.8}$$

ここで一次元的に配置された回路モデルに対する$\boldsymbol{T}$は，以下のように表される．

$$\boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} t & 1 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 1 & t & 1 & & & & \cdot \\ 0 & 1 & t & \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot & t & 1 & 0 \\ \cdot & & & & 1 & t & 1 \\ 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & 1 & t \end{pmatrix}$$

$$t = -\frac{R_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{m}}} - 2$$

V_E が V_I よりも大きい場合，各画素の出力 V_{S} は V_{E} と V_{I} の差分となり，そうでない場合は 0 となる．ここで，V_{S} は神経回路モデルにおける S ユニット出力に相当する．

$$V_{\mathrm{S}} = \begin{cases} 0 & (V_{\mathrm{E}} < V_{\mathrm{I}}) \\ V_{\mathrm{E}} - V_{\mathrm{I}} & (V_{\mathrm{E}} \geq V_{\mathrm{I}}) \end{cases} \tag{3.9}$$

全画素の V_{S} の値を加算する事により，最終的な本モデル回路の出力 V_{LGMD} が得られる．

$$V_{\mathrm{LGMD}} = \sum V_{\mathrm{S}} \tag{3.10}$$

3.4 一次元回路モデルの評価

3.4.1 評価方法

考案した LGMD 電子回路モデルの，物体の様々な運動に対する応答を，MATLAB を用いたシミュレーションにより検証した．想定した状況は，物体の接近，並進，及び離反であり，回路の挙動は式 (3.4)–(3.10) によって記述した．

本モデルは，輪郭長及び輪郭速度に依存した出力を行うことが，神経回路モデル (図 2.3) や単眼における光学系 (図 2.1) を用いた前章での検討により期待される．そこで，まず本節ではモデルを一次元的に配列した回路に対してシミュレーションを行うことにより，輪郭速度のみに応じた出力を検証し，次に次節で二次元的に配列した回路モデルに対してシミュレーションを行うことにより，輪郭長と輪郭速度双方に依存した出力を検証した．

特に断りのない限り，モデルは焦点距離 10 mm のレンズ後方に配置されているものとし，画素数は 128，受光領域は 5 mm とする．

3.4.2 正面からの接近に対する応答

モデルを一次元的に配列した回路の等速度接近物体に対する応答を，以下の三種類の状況に分類して検証した．

1. 回路正面からの，レンズ光軸に沿った接近 (図 3.5)
2. レンズ光軸から外れた位置からの，回路正面への接近 (図 3.11(a))
3. レンズ光軸から外れた位置からの，レンズ光軸に平行した接近 (図 3.11(b))

図 3.6 に，図 3.5 の状況において，接近速度を 4 m/s，接近物体の一辺を 10 cm とした場合のモデル出力を示す．横軸は衝突までの時間であり，側抑制の有無における出力を比較している．移動輪郭により刺激される画素数は輪郭速度に比例するため，側抑制がない場合，出力は輪郭速度にほぼ比例した増加曲線を描いている．輪郭速度は，式 (2.2) によって表され，d^{-2} に比例した値となる．一方，側抑制がある場合，物体が遠方にある時点では応答を示さず，輪郭速度が抑制の伝達速度を上回る至近距離においてのみ強く応答した．この特性は，実際の LGMD の応答特性と一致している．本結果から，側抑制が至近距離に迫った物体への選択的応答に有効であることが確認できる．

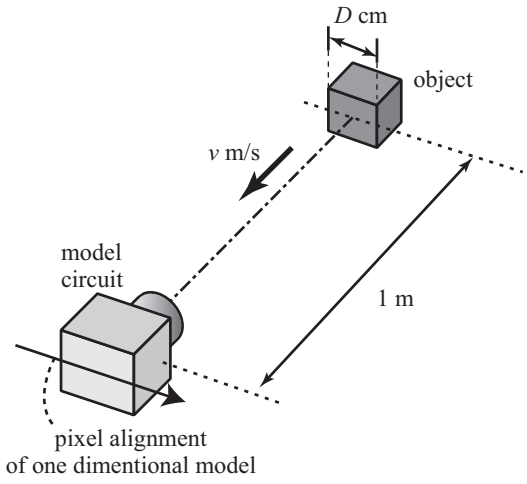


図 3.5: 正面からの接近に対するモデルの応答を検証するために，シミュレーションで模擬した状況．一辺 10 cm の立方体が回路正面から一点鎖線で示されたレンズ光軸に沿って等速度で接近する．一次元回路モデルの画素は，モデルの背後に描かれた矢印の方向に並んでいる．

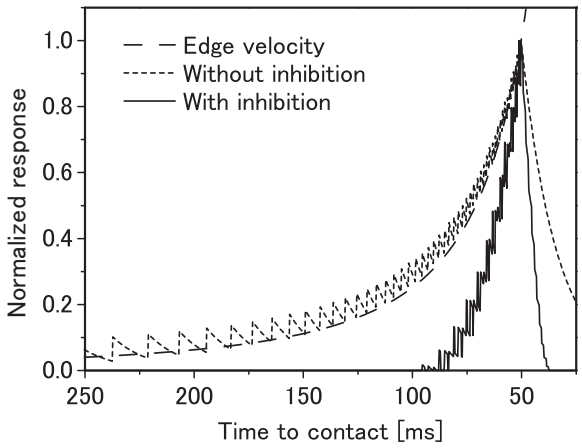


図 3.6: 接近に対する一次元回路モデルの応答．側抑制の有無における出力比較．横軸は衝突までの時間を示す．点線は側抑制を行わない場合の応答を，実線は行う場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．破線は輪郭速度であり，単位時間に刺激される画素数はこの値に比例する．

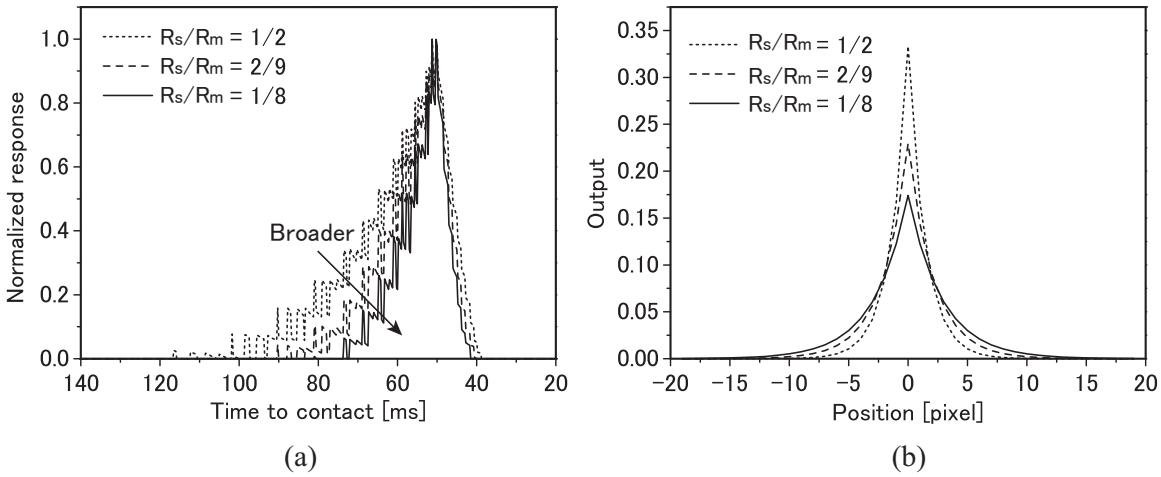


図 3.7: (a) 接近に対する一次元回路モデルの応答．モデル出力に対する側抑制の空間フィルタサイズの影響．横軸は衝突までの時間を示す．点線は半値幅 2 pixel の抑制フィルタを用いた場合の応答を，破線は半値幅 3 pixel の抑制フィルタを用いた場合の応答を，実線は半値幅 4 pixel の抑制フィルタを用いた場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．(b) 側抑制に用いたフィルタの空間インパルス特性．

次に，側抑制の時空間特性が出力に与える影響を検証するため，空間フィルタサイズ及び遅延時間を変化させてシミュレーションを行った．空間フィルタサイズは，図 3.3 中の R_s/R_m を，遅延時間は R_2C_2 を，それぞれ変化させることで調整を行った．

図 3.7(a) に，図 3.5 の状況における物体接近に対し，側抑制の空間フィルタサイズを変化させた際の出力を示す．図 3.7(b) は，この時用いたフィルタの空間特性を示しており，半値幅は 2 pixel，3 pixel，及び 4 pixel とした．空間フィルタを拡大させることによって，応答曲線は図 3.7(a) 中の矢印で示された方向へ移動した．この移動の要因は，空間フィルタの拡大に伴って抑制領域を脱するために必要な輪郭速度が上昇し，応答開始点がより至近距離に迫った事にある．応答曲線における同様の変化は，抑制遅延時間の短縮によっても見られた (図 3.8)．この移動の要因も空間フィルタの場合と同様，抑制遅延時間の短縮に伴って抑制領域を脱するために必要な輪郭速度が上昇し，応答開始点がより至近距離に迫ったためである．本結果から，抑制信号の時空間特性を変化させることで応答開始距離を制御できることが確認できた．

次に，一次元回路モデルの応答における，接近物体サイズの影響を検証した．図 3.9(a) に，図 3.5 に示す状況の物体接近に対し，物体サイズを変化させた際の出力を示す．物体が小さくなるに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった．ピーク値に関しては，次に述べる接近速度の影響検証シミュレーション，並びに次節の二次元回路モデルのシミュレーション結果と合わせて，考察にて詳述する．

図 3.9(b) に，モデルが応答を開始してから衝突までの時間を，物体の大きさに対してプロットしたものを示す．波線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 30.9 μm/ms (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．

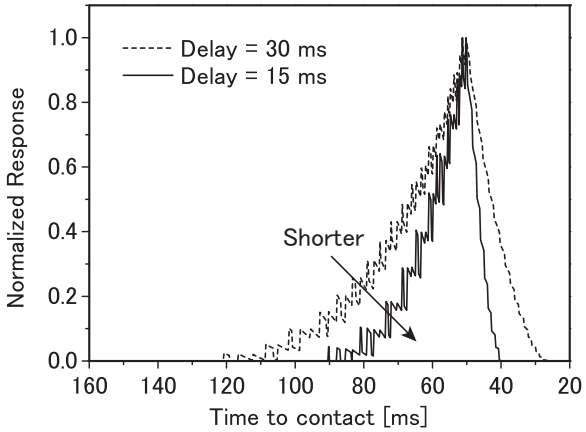
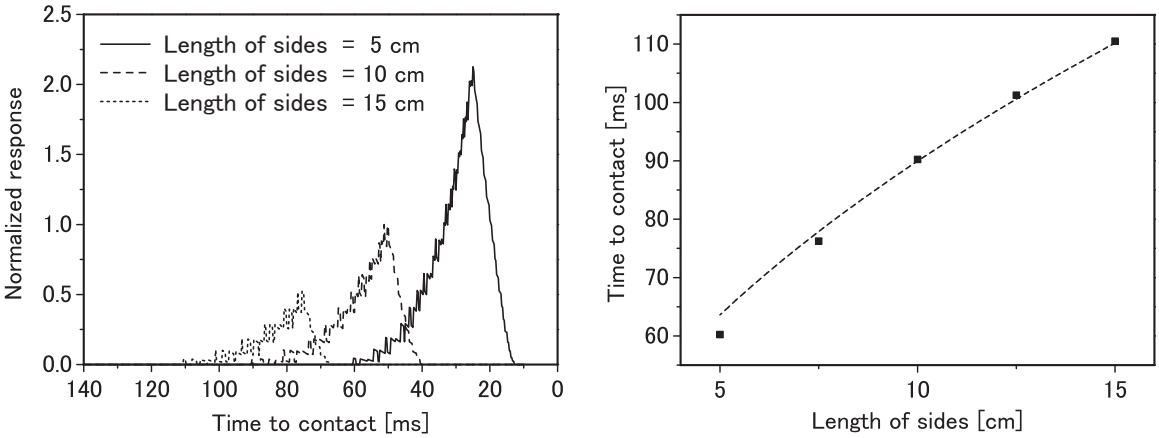
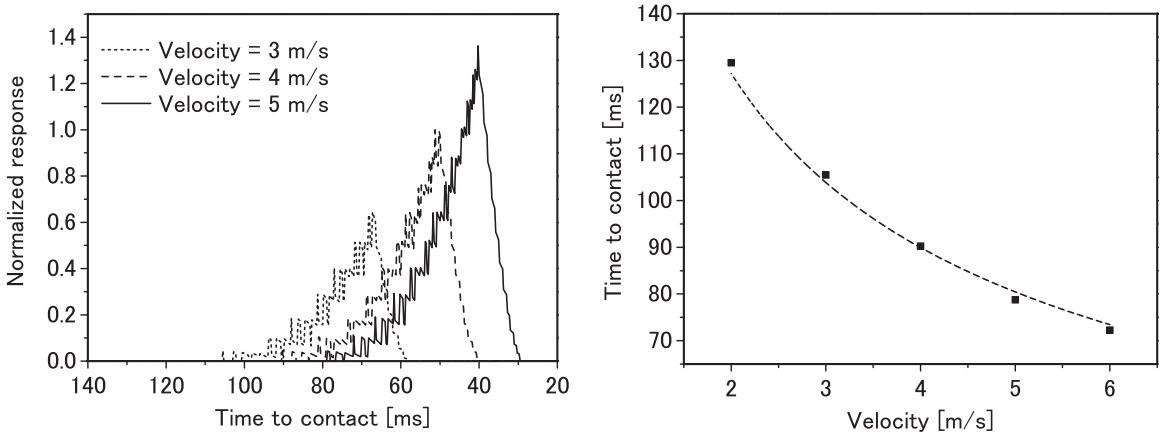


図 3.8: (a) 接近に対する一次元回路モデルの応答．モデル出力に対する側抑制の遅延時間の影響．横軸は衝突までの時間を示す．点線は 30 ms の遅延を用いた場合の出力を，実線は 15 ms の遅延を用いた場合の出力を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．



(a) (b)

図 3.9: (a) 接近に対する一次元回路モデルの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの接近物体サイズに対する出力を示している．点線は一辺 15 cm の物体に対する応答を，破線は一辺 10 cm の物体に対する応答を，実線は一辺 5 cm の物体に対する応答を，それぞれ示す．各応答は，一辺 10 cm の物体に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近物体の大きさとモデルの応答開始時間との関係．物体の大きさを横軸にとり，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．波線はモデル回路受光面上での輪郭移動速度が 30.9 μm/ms (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．



(a) (b)

図 3.10: (a) 接近に対する一次元回路モデルの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの物体接近速度に対する出力を示している．点線は接近速度 3 m/s に対する応答を，破線は接近速度 4 m/s に対する応答を，実線は接近速度 5 m/s に対する応答を，それぞれ示す．応答は，接近速度 4 m/s に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近速度とモデルの応答開始時間との関係．接近の速度を横軸にとり，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．波線はモデル回路受光面上での輪郭移動速度が 30.9 μm/ms (速度 4 m/s の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．

各点はほぼこの曲線に近似されており，本モデル回路が，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．ここで，式 (2.2) より応答開始点における衝突までの時間を t_0 とすると，

$$t_0 = \sqrt{\frac{fD}{a(t_0)v}} \tag{3.11}$$

となる．応答開始時における輪郭速度は一定であることから，応答開始から衝突までの時間は，物体の一辺 D の 1/2 乗に比例することとなる．

次に，一次元回路モデルの応答における，接近速度の影響を検証した．図 3.10(a) に，図 3.5 に示す状況の物体接近に対し，速度を変化させた際の出力を示す．速度が上昇するに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった．

図 3.10(b) に，モデルが応答を開始してから衝突までの時間を，接近速度に対してプロットしたものを示す．波線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 30.9 μm/ms (速度 4 m/s の接近に対する応答開始点における輪郭速度) となる時点を示している．各点はほぼこの曲線に近似されており，本モデル回路が，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．ここで，式 (3.11) より，応答開始から衝突までの時間は，接近速度 v の 1/2 乗に反比例することとなる．

3.4.3　正面以外からの接近に対する応答

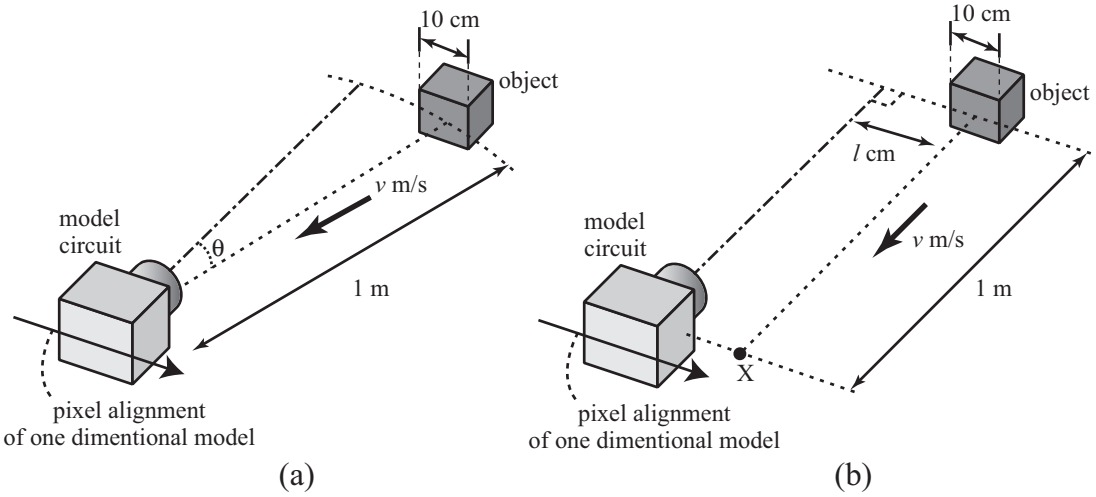


図 3.11: 接近に対するモデルの応答を検証するためにシミュレーションで模擬した状況．一辺 10 cm の立方体が回路前方から等速度で接近する．一次元回路モデルの画素は，モデルの背後に描かれた矢印の方向に並んでいる．(a) 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの回路正面への斜め接近．(b) 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からのレンズ光軸に平行した接近．

正面以外からの接近に対する応答を検証するため，図 3.11(a)(b) に示す二種類の状況のシミュレーションを行った．図 3.11(a) は，レンズ光軸から外れた位置から回路正面への斜め接近の状況を表しており，レンズ光軸と接近経路のなす角度 θ を変化させて，モデルの応答を検証した．図 3.11(b) は，物体中心がレンズ光軸から外れた位置からのレンズ光軸に平行した接近の状況を表しており，レンズ光軸と物体中心間距離 l を変化させて，モデルの応答を検証した．側抑制の空間フィルタサイズを調節する Rs/Rm は 2/9 とし，遅延時間は 15 ms とした．また，物体の接近速度 v は 4 m/s とした．

図 3.12(a) に，図 3.11(a) に示す状況の物体接近に対し，接近角度を変化させた際の出力を示す．角度を増すに従って，ピーク位置が至近距離に迫り，ピーク値が上昇しているが，物体が視野内を接近する限りにおいては，正面からの接近と同様の上昇曲線を描いた．ピークの位置は，接近物体の輪郭がモデルの視野から外れるタイミング (図 3.12(a) 中に矢印で示す) に依存する．また，ピーク値の上昇は，角度が大きいほど接近物体の輪郭がより至近距離まで視野内にとどまる事，及び光軸と垂直な方向の成分が増加することによって起こる．視野外からの接近では，至近距離で物体が視野内に割り込むため，図 3.12(b) に示すような突如増加する応答となった．

図 3.13 に，図 3.11(b) に示す状況の物体接近に対し，物体中心–レンズ光軸間の距離 l を変化させた際の出力を示す．物体の一部がレンズ光軸上にある状態で接近した場合は，物体中心とレンズ光軸の距離が大きくなるにつれて，片側の輪郭がより至近距離まで視野内にとどまるため，応答は近距離へと移動した (図 3.13(a))．一方，物

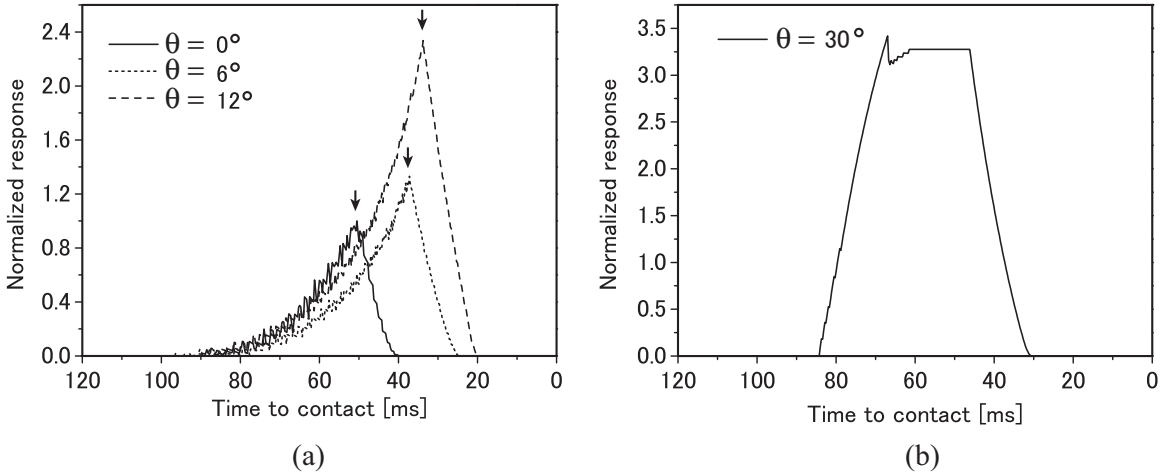


図 3.12: 斜め接近に対する一次元回路モデルの応答．システム出力に対する，接近角度の影響．横軸は衝突までの時間を示す．(a) 視野内の接近に対する応答．実線は正面からの接近を，点線はレンズ光軸と 6° をなす角度での接近を，波線はレンズ光軸と 12° をなす角度での接近を，それぞれ示す．応答は，正面からの接近に対する応答の最大値によって正規化されている．図中の矢印は，接近物体の輪郭がモデルの視野から外れる時点を示す．(b) 視野外からの接近に対する応答．

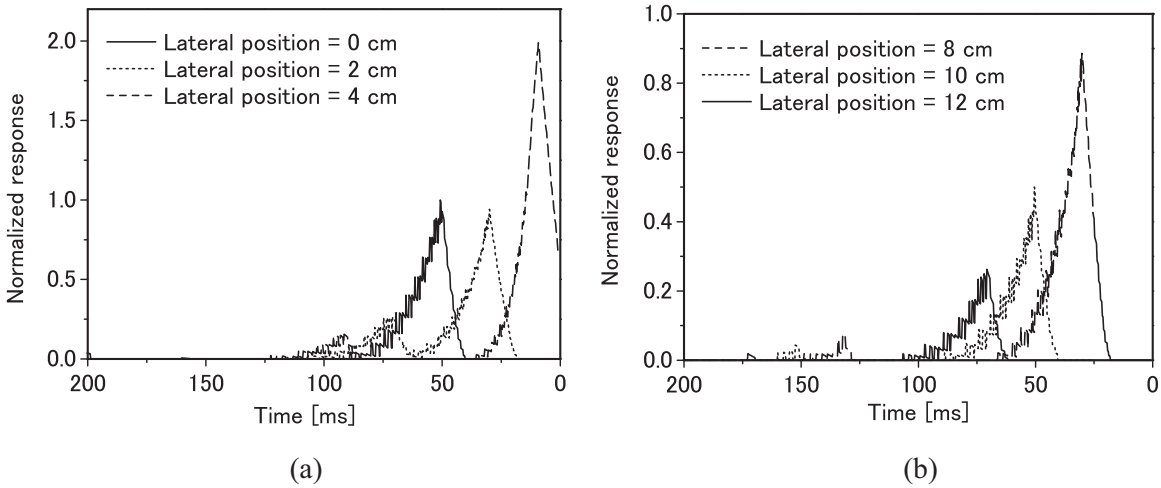


図 3.13: 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの，接近に対する一次元回路モデルの応答．物体がモデルの側方 (図 3.11(b) の点 X) を通過するまでの時間を横軸として，レンズ光軸からの距離を変化させた際の出力を示す．応答は，正面からの接近に対する応答の最大値によって正規化されている．(a) 物体の一部がレンズ光軸上にある場合の応答．実線は正面からの接近に対する応答を，点線は物体中心がレンズ光軸から 2 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，破線は 4 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，それぞれ示す．(b) 物体がレンズ光軸上から外れている場合の応答．波線は物体中心がレンズ光軸から 8 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，点線は 10 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，実線は 12 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，それぞれ示す．

体がレンズ光軸から外れた状態での接近では，物体とレンズ光軸の距離が大きくなるにつれて，モデルに対してより遠方で物体が視野から外れるため，応答の位置が遠方となりピークの値も減少した (図 3.13(b)).

図 3.14 に、物体中心ーレンズ光軸間距離と，応答のピーク値の関係を示す．図 3.14(a) では 2 つの焦点距離に対するピーク値変化を比較しており，図 3.14(b) では 2 つの側抑制フィルタサイズに対するピーク値変化を比較している．焦点距離により画角は変化し，焦点距離 10 mm，5 mm に対する画角はそれぞれ 28 °，53 ° である．図 3.14(a) より，物体がレンズ光軸から遠ざかるにつれて，応答のピーク値が減少すること，及び減少の度合いは画角に依存し，画角が広いほど緩やかに減少することが分かる．また，図 3.14(b) より，減少の度合いは側抑制の空間フィルタサイズにも依存し，フィルタが狭いほど緩やかに減少することが分かる．

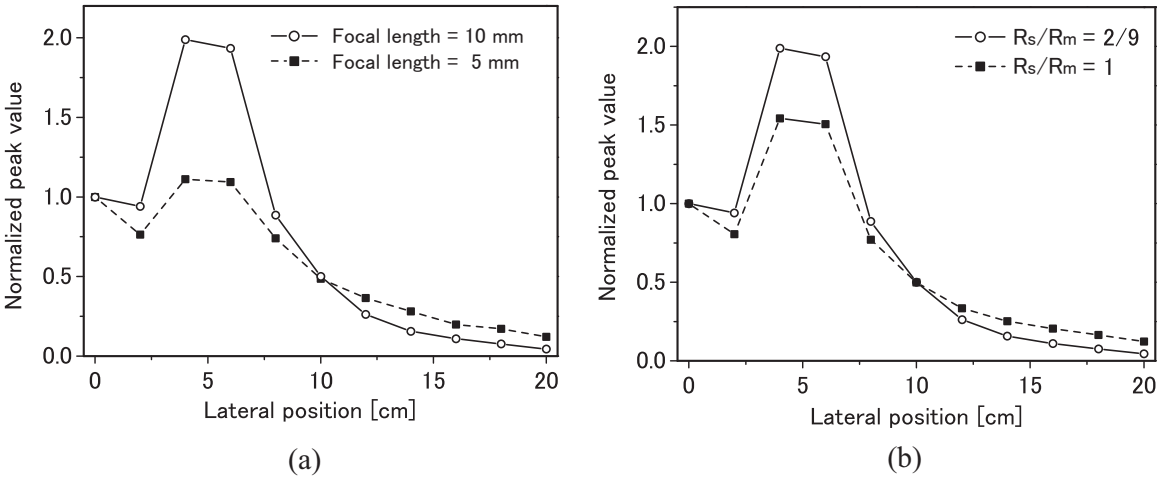


図 3.14: 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの接近に対する一次元回路モデルの応答のピーク値．横軸はレンズ光軸からの距離であり，値は正面からの接近に対する応答のピーク値によって正規化されている．(a)2 つの焦点距離に対するピーク値変化の比較．焦点距離により画角は変化し，焦点距離 10 mm，5 mm に対する画角はそれぞれ 28 °，53 ° である．(b) 側抑制における 2 つの空間フィルタサイズに対するピーク値変化の比較.

3.4.4 並進及び離反に対する応答

接近以外の動きに対するモデルの応答を検証するため，図 3.15(a) に示すようなモデル前方における等速度での並進，及び図 3.15(b) に示すようなモデル正面からの等速度での離反を模擬したシミュレーションを行った．側抑制の空間フィルタサイズを調節する Rs/Rm は 2/9 とし，遅延時間は 15 ms とした．また，物体の移動速度 v は 4 m/s とした.

図 3.16(a) に，並進を模擬したシミュレーションの結果を示す．モデルからの距離，0.6 m，0.8 m，1.0 m における並進に対する応答を示す．本結果より，物体並進時は遠

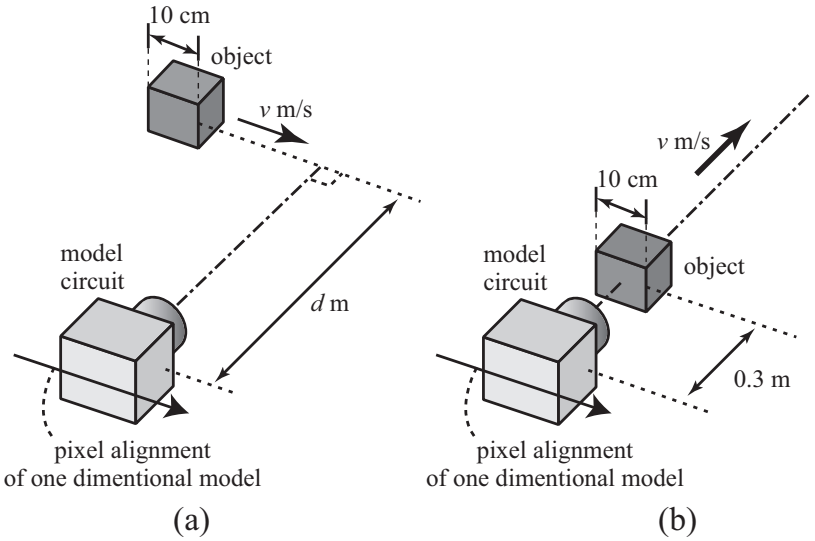


図 3.15: (a) 並進に対するモデルの応答を検証するためにシミュレーションで模擬した状況．一辺 10 cm の立方体が回路前方を等速度で横切る．(b) 離反に対するモデルの応答を検証するためにシミュレーションで模擬した状況．一辺 10 cm の立方体が回路前方から離れていく．(a)(b) ともに，一次元回路モデルの画素は，モデルの背後に描かれた矢印の方向に並んでいる．

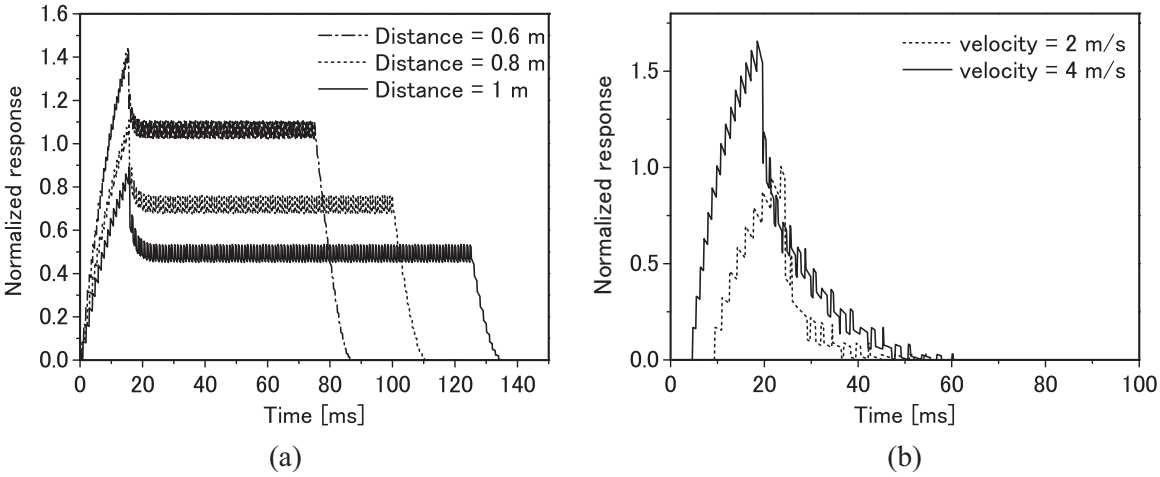


図 3.16: (a) 並進に対する一次元回路モデルの応答．並進開始からの時間を横軸として，モデルからの距離，0.6 m，0.8 m，1.0 m における 4 m/s での並進に対する応答を示す．応答は，4 m/s での正面からの接近時における応答の最大値によって正規化されている．(b) 離反に対する一次元回路モデルの応答．離反開始からの時間を横軸として，4 m/s での離反に対する応答を示す．応答は，4 m/s での正面からの接近時における応答の最大値によって正規化されている．

方においても比較的高い値を示し，距離が縮むに従って値が増加することが分かる．接近以外の動きに対するこのような強い応答については，次に述べる離反のケースと合わせて，考察にて詳述する．

図 3.16(b) に，離反を模擬したシミュレーションの結果を示す．離反時は，離反開始の際に急激に大きな輪郭の移動速度が起こるため，非常に大きな応答を示した．

3.5 二次元回路モデルの応答

二次元的に配列した回路モデルに対してシミュレーションを行うことにより，輪郭長と輪郭速度双方に依存した出力を検証した．モデルは焦点距離 10 mm のレンズ後方に配置されているものとし，画素数は 128×128，受光領域 5×5 mm^2 とした．

図 3.17 に，図 3.5 の状況において，接近速度を 4 m/s，接近物体の一辺を 10 cm とした場合のモデル出力を示す．横軸は衝突までの時間であり，側抑制の有無における出力を比較している．移動輪郭により刺激される画素数は輪郭長と輪郭速度の積に比例するため，側抑制がない場合，出力はこの積にほぼ比例した増加曲線を描いている．輪郭長と輪郭速度の積は，式 (2.1) と (2.2) の積によって得られ，d^{-3} に比例した値となる．一方，側抑制がある場合，一次元モデルの場合と同様，輪郭速度が抑制の伝達速度を上回る至近距離においてのみ強く応答した．応答開始後の出力増加については，輪郭速度のみに依存する一次元モデルと異なり，二次元モデルでは輪郭速度と輪郭長の積に依存するためより急峻になっている．

次に，側抑制の時空間特性が出力に与える影響を検証するため，空間フィルタサイズ及び遅延時間を変化させてシミュレーションを行った．空間フィルタサイズ，及び

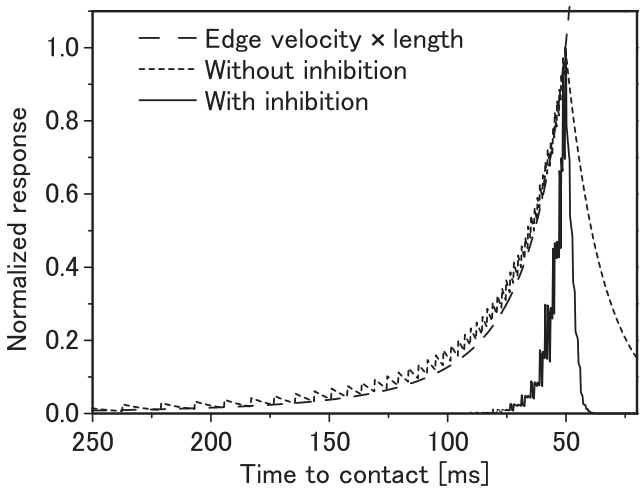


図 3.17: 接近に対する二次元回路モデルの応答．側抑制の有無における出力比較．横軸は衝突までの時間を示す．点線は側抑制を行わない場合の応答を，実線は行う場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．破線は輪郭長と輪郭速度の積であり，単位時間に刺激される画素数はこの値に比例する．

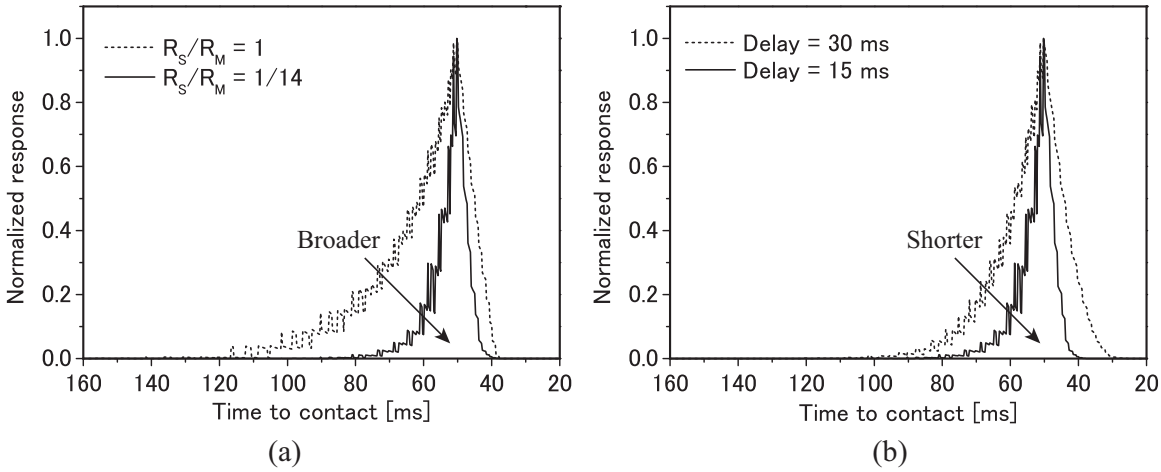


図 3.18: 接近に対する二次元回路モデルの応答．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．(a) モデル出力に対する側抑制の空間フィルタサイズの影響．点線は狭い抑制フィルタを用いた場合の応答を，実線は広い抑制フィルタを用いた場合の応答を，それぞれ示す．(b) 側抑制の遅延時間を変化させた場合の出力比較．点線は長い遅延を用いた場合の応答を，実線は短い遅延を用いた場合の応答を，それぞれ示す．

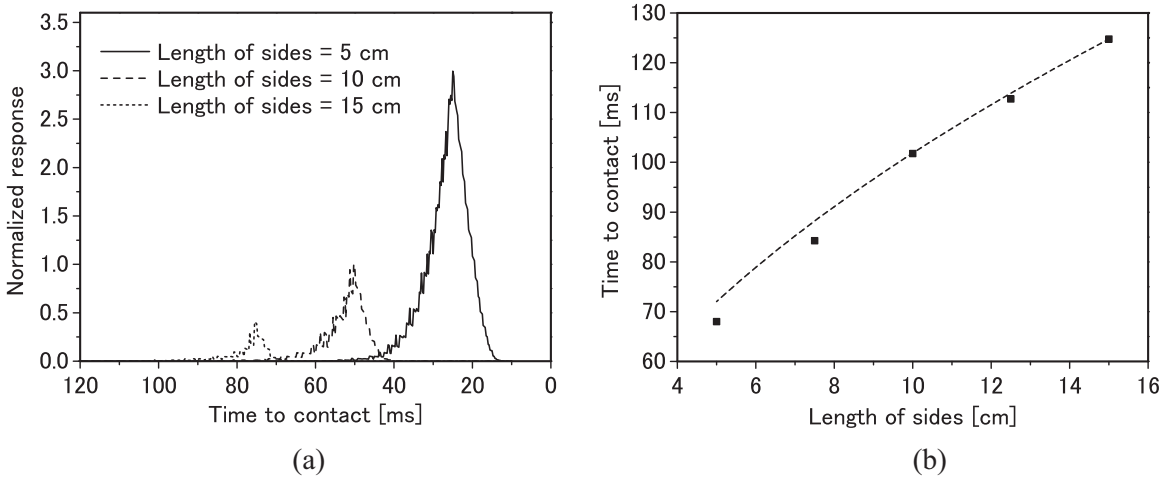


図 3.19: (a) 接近に対する二次元回路モデルの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの接近物体サイズに対する出力を示している．点線は一辺 15 cm の物体に対する応答を，破線は一辺 10 cm の物体に対する応答を，実線は一辺 5 cm の物体に対する応答を，それぞれ示す．各応答は，一辺 10 cm の物体に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近物体の大きさとモデルの応答開始時間との関係．物体の大きさを横軸として，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．波線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 24.1 μm/ms(一辺 10 cm の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．

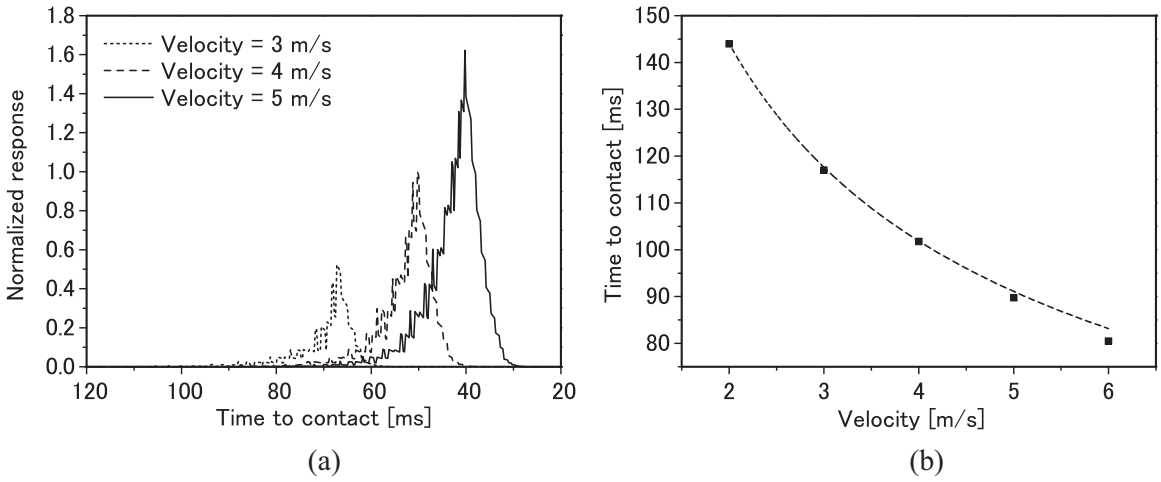


図 3.20: (a) 接近に対する二次元回路モデルの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの物体接近速度に対する出力を示している．点線は接近速度 3 m/s に対する応答を，破線は接近速度 4 m/s に対する応答を，実線は接近速度 5 m/s に対する応答を，それぞれ示す．応答は，接近速度 4 m/s に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近速度とモデルの応答開始時間との関係．接近の速度を横軸として，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．波線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 24.1 μm/ms(速度 4 m/s の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．

遅延時間の調整は，一次元モデルの場合と同様，図 3.3 中の R_S/R_M，R_2C_2 を，それぞれ変化させることで行った．図 3.18(a) は，側抑制の空間フィルタサイズを変化させた際の出力を，図 3.18(b) は，側抑制の遅延時間を変化させた際の出力を示している．これらの図より，側抑制の時空間特性を変化させた際の影響は，一次元モデルの場合と同様であることが分かる．

次に，二次元回路モデルの応答における，接近物体サイズの影響を検証した．図 3.19(a) に，図 3.5 に示す状況の物体接近に対し，物体サイズを変化させた際の出力を示す．物体が小さくなるに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった．

図 3.19(b) に，モデルが応答を開始してから衝突までの時間を，物体の大きさに対してプロットしたものを示す．波線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 24.1 μm/ms (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．各点はほぼこの曲線に近似されており，二次元モデルも一次元モデル同様，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．

次に，二次元回路モデルの応答における，接近速度の影響を検証した．図 3.20(a) に，図 3.5 に示す状況の物体接近に対し，速度を変化させた際の出力を示す．速度が上昇するに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった．

図 3.20(b) に，モデルが応答を開始してから衝突までの時間を，接近速度に対してプロットしたものを示す．波線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 24.1 μm/ms (速

度 4 m/s の接近に対する応答開始点における輪郭速度) となる時点を示している．各点はほぼこの曲線に近似されており，二次元モデルも一次元モデル同様，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．

3.6 考察

3.6.1 衝突回避システム構築の指針

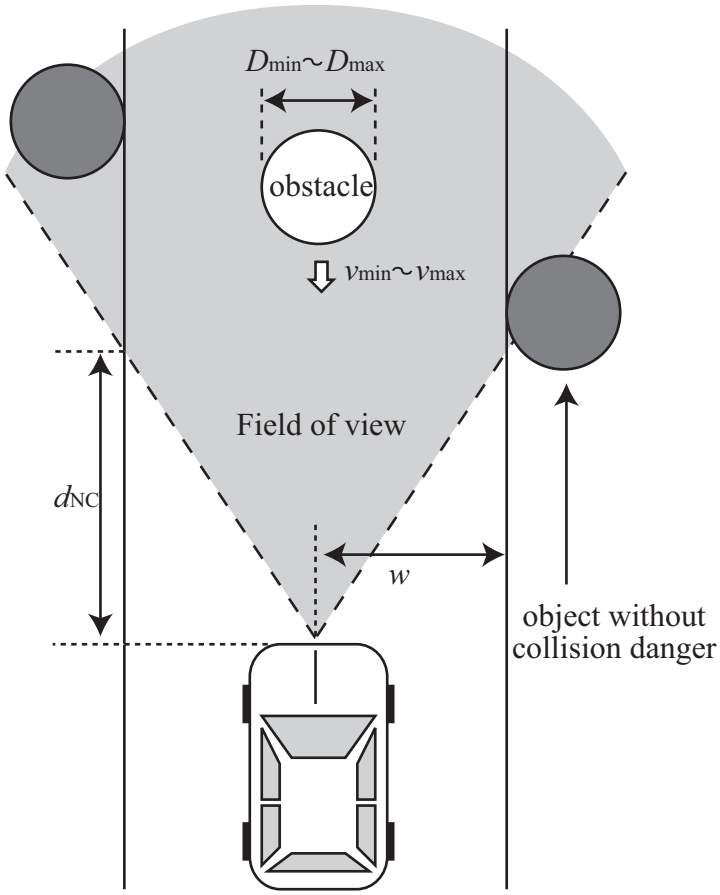


図 3.21: 衝突回避システム構築の指針を立てるために想定した状況．モデル回路を利用した衝突回避システムを自動車に搭載する．直径 D の障害物がレンズ光軸に沿って相対速度 v で接近する．光軸からの距離 w 以上離れた物体は，衝突の危険がないものとする．

電子回路モデルによるシミュレーションによって抽出されたデータを元に，衝突回避システムを構成する際の指針を検討する．ここでは，直進時の自動車にシステムを搭載した図 3.21 のような状況を想定する．障害物はレンズ光軸に沿って接近するものとする．衝突回避システムを構成するためには，予め以下の値を把握しておく必要がある．

1. 衝突検知から回避までに要する時間 (t_{RFA} (time required for avoidance))
2. 想定する最小及び最大物体サイズ ($D_{\min}$，$D_{\max}$)
3. 想定する最小及び最大相対接近速度 ($v_{\min}$，$v_{\max}$)
4. 衝突の危険がないと判断する光軸からの距離 (w)

また，応答開始時における衝突までの時間を t_0 とする．以上の前提条件から，適切なレンズの焦点距離 f と，検出すべき最小の輪郭速度 $u_{\min}$ を定める．輪郭速度は式 (2.2) より，$\dot{a}$ の 1/2 となる．

式 (3.11) より，t_0 が最小となるのは物体サイズが最小かつ接近速度が最大の場合である．この時の t_0 が t_{RFA} より大きくなくてはならない．

$$t_{\mathrm{RFA}} < \sqrt{\frac{fD_{\min}}{2\,u_{\min}v_{\max}}}$$

これを整理すると以下の式が得られる．

$$u_{\min} < \frac{fD_{\min}}{2\,t_{\mathrm{RFA}}^2 v_{\max}} \tag{3.12}$$

また，接近物体が視野全体に広がる前に応答を開始する必要がある．式 (2.1)(2.2) より，物体が視野全体に広がる時点での輪郭速度は，以下のように表される．

$$u = \frac{L^2 v}{2fD} \tag{3.13}$$

回路の受光領域の一辺を L とした．物体サイズが最大かつ接近速度が最小の時に上記の値は最小となるため，この時の輪郭速度が $u_{\min}$ よりも大きくなくてはならない．

$$u_{\min} < \frac{L^2 v_{\min}}{2fD_{\max}} \tag{3.14}$$

また，衝突経路外の物体への反応を抑えるために，以下の条件が必要となる．衝突経路外の物体が視野から逸れる距離を d_{NC} (distance to noncolliding object) とすると，

$$d_{\mathrm{NC}} = \frac{2fw}{L} \tag{3.15}$$

となる．この距離での輪郭速度が $u_{\min}$ よりも小さくなくてはならないため，式 (2.2) を用いて，以下の関係が導かれる．

$$u_{\min} > \frac{L^2 v}{4fw} \tag{3.16}$$

以上より，衝突の危険のない物体に反応することなく，衝突経路を接近する物体に反応するためには，式 (3.12)(3.14)(3.16) を満たすように f と $u_{\min}$ を設定しなくてはならない．

まず，最適な焦点距離 f を見積もる．式 (3.12)(3.14)(3.16) より，f は $u_{\min}$ の設定可能範囲を定めている．$u_{\min}$ の設定可能範囲を最大にすることにより，ノイズ等による $u_{\min}$ の揺らぎを許容するシステムとすることが出来るため，最適な f とは $u_{\min}$ の設定可能範囲を最大にする f である．このため，$u_{\min}$ の上限を定めている式 (3.12) と式 (3.14) の右辺を高い値に設定し，$u_{\min}$ の下限を定めている式 (3.16) の右辺を低い値に設定しなくてはならない．式 (3.12) の右辺は f に比例し，式 (3.14) の右辺は f に反比例することから，これら二式の右辺の値が等しくなるときに $u_{\min}$ の上限は最大となる．また，下限を定める式 (3.16) の右辺は f に反比例することから，$u_{\min}$ の設定可能範囲を最大にする f は，上限値を最大とする f となり (図 3.22 参照)，以下のように表される．

$$f = t_{\mathrm{RFA}} L \sqrt{\frac{v_{\min} v_{\max}}{D_{\min} D_{\max}}} \tag{3.17}$$

$u_{\min}$ は，イメージセンサのピクセルサイズに応じて，回路パラメータを調整することによって設定する．

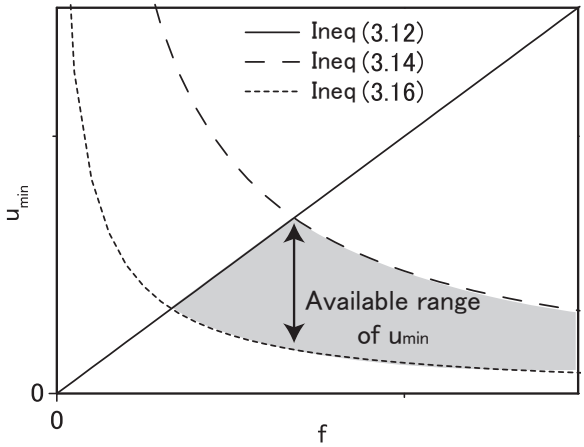


図 3.22: $u_{\min}$ の設定可能範囲．実線は式 (3.12) の右辺を，破線は式 (3.14) の右辺を，点線は式 (3.16) の右辺をそれぞれ示している．

ここで，実際の車載環境を想定した表 3.1 に示すパラメータを用いて，衝突回避システムを構築することを考える．式 (3.17) より，最適な焦点距離 f は 33.3 mm となる．この時，式 (3.12)(3.14)(3.16) より，$u_{\min}$ の設定可能範囲は 111 μm/s から 250 μm/s となるため，$u_{\min}$ がこの範囲に入るように回路パラメータを適切に調整することにより，所望の動作が実現される．例えば，ピクセルサイズを 2 μm とすると，R_1C_1 からなるハイパスフィルタの時定数を 100 ms に，R_2C_2 からなるローパスフィルタの時定数を 80 ms に，$R_{\mathrm{s}}/R_{\mathrm{m}}$ を 1 に設定することで，120 μm/s 以上で移動する輪郭に強く応答する特性が得られる．

衝突回避システムが必要とされる場面における接近物体のサイズや速度は多岐に渡るが，利用場面を特定すればサイズや速度も限定される．想定される接近物体のサイ

表 3.1: パラメータ

Parameter	Value
D_{min}	1.5 m
D_{max}	2 m
v_{min}	30 km/h
v_{max}	40 km/h
w	3 m
t_{RFA}	3 s
L	2 mm

ズや速度がある程度限定されてさえいれば，本システムは，回路パラメータを適切に設定することにより，様々な場面に適用できるものと考えられる．

しかしながら，上記の例で用いたような 100 ms の時定数は，集積回路中の RC 回路で容易に実現できる数値ではない．このため，本章で検証したモデルをハードウェア化する際には，時間特性に関してはメモリを用いる等の工夫が必要となる．また，式 (3.17) より，最適な焦点距離は t_{RFA} と L に比例する．一般に系の質量が大きくなるに従って，t_{RFA} は大きくなることが予想されるため，車載等の運動量の大きな系に用いる場合は f の大きなレンズを用い，集積度が高く L の小さなセンサを用いることが求められる．

3.6.2 接近以外の動きへの対応

本モデルは，並進物体や離反物体に対しても強い応答を示す．この現象は，実際のバッタの LGMD においても同様であり，並進や離反を排他的に扱うための別の神経経路があると考えられている．本モデルにおいても，これらを排他的に扱うためには，輪郭の移動方向検出等を組み合わせた付加的な機能が求められる．

また，衝突回避システムにとって，並進物体に対して取るべき行動は，利用される状況によって異なる．自動車のように高速で自走する機械で用いられる場合は，前方の並進物体は衝突の大きな危険を伴っているのに対し，屋内のパトロールロボットの様に低速で移動する機械にとっては，遠方の並進物体はほとんど衝突の危険を伴わない．本研究では，高速な移動物体への搭載を考え，並進物体も危険を伴うとして衝突回避システムの開発を進める．

3.7 結言

衝突検知を行う神経細胞 LGMD の計算原理を利用したハードウェアの実現に向けて，この計算原理を模擬する電子回路モデルを考案した．ハードウェア化にとって大きな問題であった，莫大な数にのぼる接続を，抵抗回路網を用いて簡略化することに

より，少数の回路素子からなる単純な画素回路を構成した．コンピュータシミュレーションを用いた電子回路モデルの検証から，本モデルが至近距離物体への選択的応答を示すことが確認できた．このため，本モデルを用いた衝突検知システムの実現が期待できる．

参考文献

[1] F. C. Rind and D. I. Bramwell, “Neural network based on the input organization of an identified neuron signaling impending collision,” J. Neurophysiol., vol.75, no.3, pp.967–985, Mar. 1996.

[2] C. Mead, Analog VLSI and Neural Systems, Addision-Wesley, Reading, MA, 1989.

[3] H. Okuno and T. Yagi, “Bio-inspired real-time robot vision for collision avoidance,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.1, pp.68–74, Feb. 2008.

第4章　ハードウェアの設計とアルゴリズムの検証

4.1　緒言

生体は，反応速度が数十 ms という神経細胞を用いながらも，実時間で安定した視覚情報処理を行うことができる．この生体の優れた情報処理機能は，並列・階層的な視覚情報処理アーキテクチャ，アルゴリズムによって実現されている [1]．LGMD における瞬時の衝突検知も，神経回路網による並列的な視覚情報処理によって実現されている [2]．このため，LGMD のアルゴリズムを従来の逐次型計算機にプログラミングしたのでは，この利点を生かすことはできない．並列的な処理を行えるハードウェアが求められる．

前章で検証した電子回路モデルは，基本的な回路素子のダイナミクスを利用して，視覚情報処理を並列的に行う [3]．このため，図 3.3 の電子回路をそのまま集積回路化することで，効率的な視覚情報処理ハードウェアの実現が期待できる．しかしながら，第 1 章でも検討したように，システム全体をアナログ回路で構成すると柔軟性が損なわれ，用途が限定される．これでは，視覚情報の持つ豊富な情報量を活用することが出来ない．アナログ並列演算を行う電子回路モデルの利点を生かしながらも，視覚情報を多角的に利用できるハードウェアが求められる．

そこで本研究では，並列的に瞬時演算が行えるアナログ回路の利点と，プログラマブルで多目的に利用できるディジタル回路の利点を合わせ持つハードウェアを開発した．本章では，開発したハードウェアについて説明を行い，次いで，LGMD を模倣して本ハードウェアに実装した衝突検知システムの評価について述べる．

4.2　実装用ハードウェアの開発

4.2.1　ハードウェアの構成

本研究で開発した，視覚情報処理のためのハードウェアの構成を図 4.1 に示す．本構成では，生体と同様，視覚情報処理を並列階層的に行う．フロントエンドには，アナログ回路の利点を生かし，様々な時空間フィルタを瞬時に施すことができるシリコン網膜 [5] を用い，その後段には並列情報処理に適し，かつ多目的に扱える FPGA (field-programmable gate array) を配した．シリコン網膜，及び FPGA を搭載したコントロールボードについては後述する．

また，本ハードウェアシステムは，イーサネットインターフェースを搭載しているため，センサで得られた視覚情報や，FPGA における計算結果は，イーサネット (100BASE-TX) を介し，UDP/IP (user datagram protocol / internet protocol) [4] によって PC 等に送信，記録し，解析することができる．

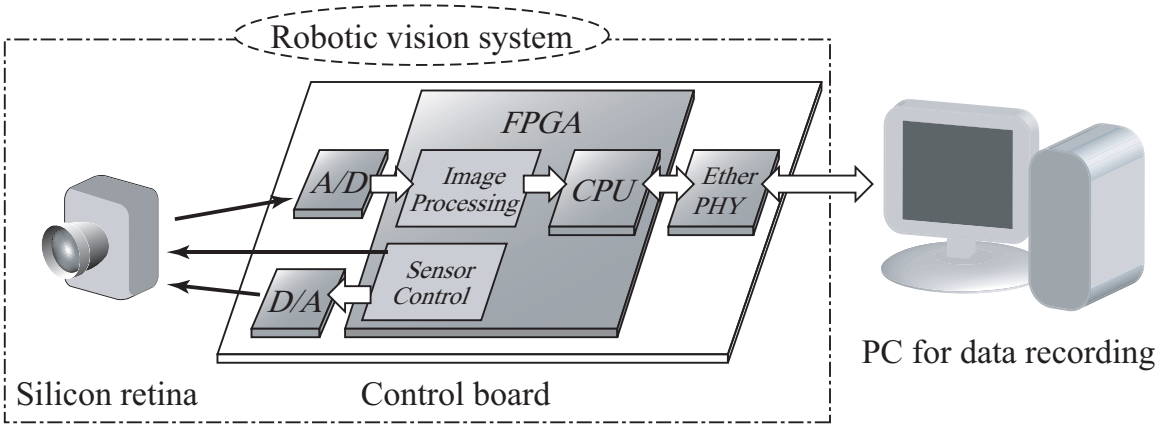


図 4.1: 実装用ハードウェアの構成．イメージセンサの制御に必要な信号は FPGA により生成する．電圧値で与える必要のある信号には D/A 変換器を用いる．イメージセンサで取得された画像情報は，FPGA で処理された後，イーサネットを介して PC 等の記録装置へと送られる．

4.2.2 シリコン網膜

実装用のハードウェア構成では，フロントエンドのイメージセンサとして，シリコン網膜を用いた．シリコン網膜は，生体の外網膜神経回路網の処理機構を模擬して開発された集積回路であり，一次元型，擬似二次元型，二次元型のシリコン網膜チップが開発されているが [6]，本研究では二次元型のシリコン網膜を用いた．シリコン網膜チップの回路構成を図 4.2(a) に示す．

このチップは，受光部 (フォトダイオード : 図中 PD) と処理回路からなる画素回路が，水平・垂直の両方向に 100 画素並べられている．各画素は，受光面が六角形状に配置されるように並べられ，それらの画素を接続する抵抗回路網は六方格子状になる．このような画素配置により，高い対称性をもった二次元的フィルタを実現している．チップ出力は，垂直方向，水平方向それぞれに用意されたシフトレジスタからのデータ信号により，一画素ずつ出力線 (図中 out) に接続され，順に読み出される．

シリコン網膜の一画素分の回路構造を図 4.2(b) に示す．光センサ部は，フォトダイオード (PD) の寄生容量成分を利用する電荷蓄積型の光センサを採用している．この光センサ部の動作のタイミングチャートを，図 4.3 に示す．まず，nMOSFET スイッチ (Sp) を ON することで，PD に逆バイアスを印加し，その寄生容量を充電する．これを光センサ部のリセット動作 (Reset) と呼ぶ．その後，Sp を OFF し，PD に光が当たると，その強度に応じて寄生容量に蓄えられた電荷が放電し，PD の電位が降下する．この電位降下の大きさが光センサ出力 (Photo sensor output) となる．

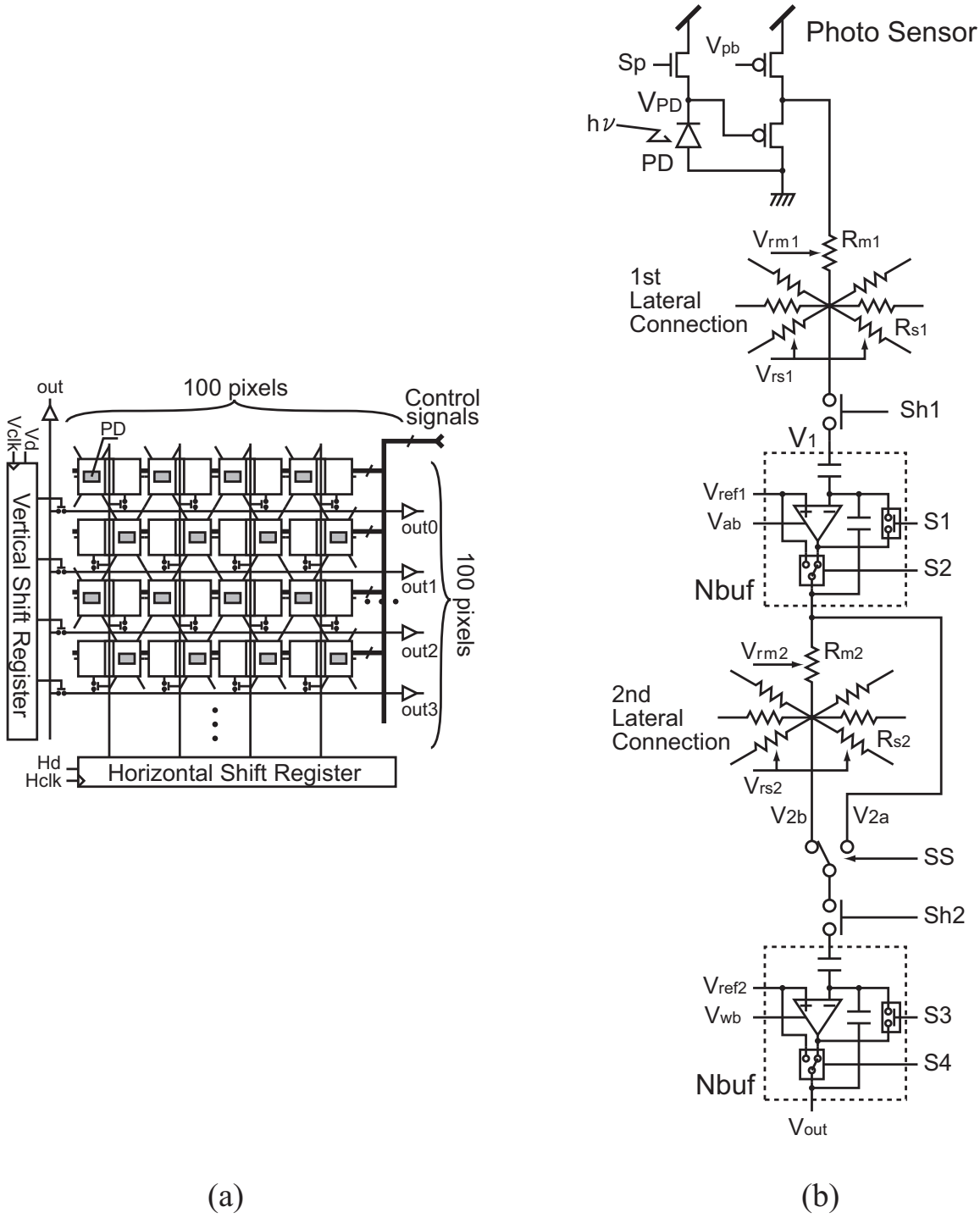


図 4.2: シリコン網膜の回路構成．(a) チップ全体の回路構成．(b) 一画素分の回路構成．

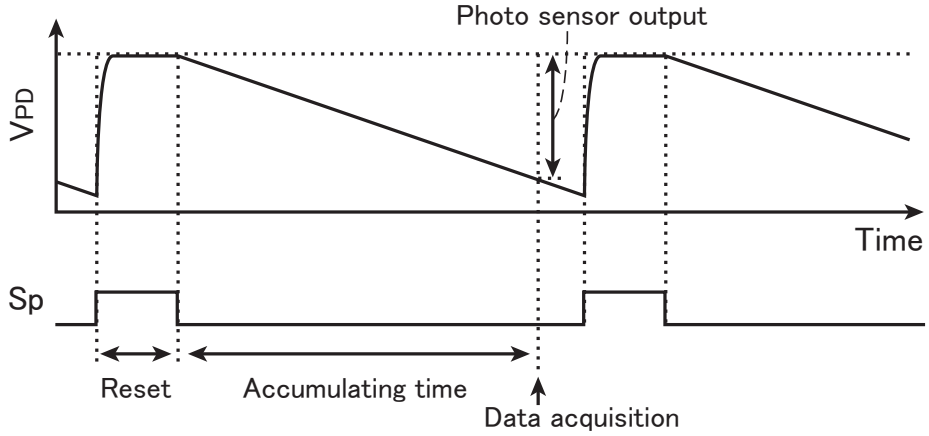


図 4.3: 光センサ部の動作のタイミングチャート．上部のグラフは PD 両端の電位差を示しており，Sp を on すること (図中の Reset) によって，PD の寄生容量は充電される．この容量の電荷は Reset 後，PD に入射する光強度に従って放電する．後段の回路動作によって定められるデータ取得 (Data acquisition) 時間までに低下した電位が光センサ出力 (Photo sensor output) となり，Reset からデータ取得までの時間を蓄積時間 (Accumulating time) と呼ぶ.

リセット動作を終えてから，光センサ出力値が確定するまでの時間を蓄積時間 (Accumulating time) と呼ぶ．この蓄積時間を長くすることで，光強度が弱い場合でも，出力ゲインを大きくすることができる．出力ゲインが高いこの方式を採用することにより，日常の自然照明下におけるような，照度の低い環境においても十分な感度が得られる．光センサの出力電圧は，二つの pMOSFET で構成されたソースフォロア回路を介して処理回路へと出力される．

一層目の抵抗回路網 (R_{s1}) は，近傍 6 画素と接続され，光センサの出力を空間的に平滑化する．続いて，固定パターンノイズ [7] をキャンセルする機能をもったノイズ補償バッファ(Nbuf) を介し，二層目の抵抗回路網 (R_{s2}) でさらに平滑化される．出力段のノイズ補償バッファには，一層目，二層目それぞれの抵抗回路網のノードの値がスイッチで切り替えられて入力される．ノイズ補償バッファには時間差分をとる機能があるので，順に入力された電圧の差を出力する事が出来る．ここで，一層目出力と二層目出力の差をとる事で輪郭強調出力が，連続 2 フレームにおける一層目出力の差をとる事でフレーム間差分出力が得られる．

一層目および二層目の抵抗回路網は，MOS 抵抗器により構成されており，外部から印加するバイアス電圧 ($V_{\mathrm{rs1}}, V_{\mathrm{rs2}}$) によって，その抵抗値を変えることができる．

ノイズ補償バッファの動作について，簡単に説明を行う (動作の詳細は [6] 参照)．ノイズ補償バッファでは，図 4.4(a) の SW1，SW2 を，図 4.4(b) に示すように制御する事により，リセット時刻 (t_{res}) における入力電圧 (v_{in}) と，リセット後の任意のデータ取得時刻 (t_{acq}) における入力電圧の差に応じた電圧が出力される．出力電圧 v_{out} は，以下の式で表される．

$$v_{\mathrm{out}}(t_{\mathrm{acq}}) = -\frac{C_1}{C_2}(v_{\mathrm{in}}(t_{\mathrm{acq}}) - v_{\mathrm{in}}(t_{\mathrm{res}})) + V_{\mathrm{ref}} \tag{4.1}$$

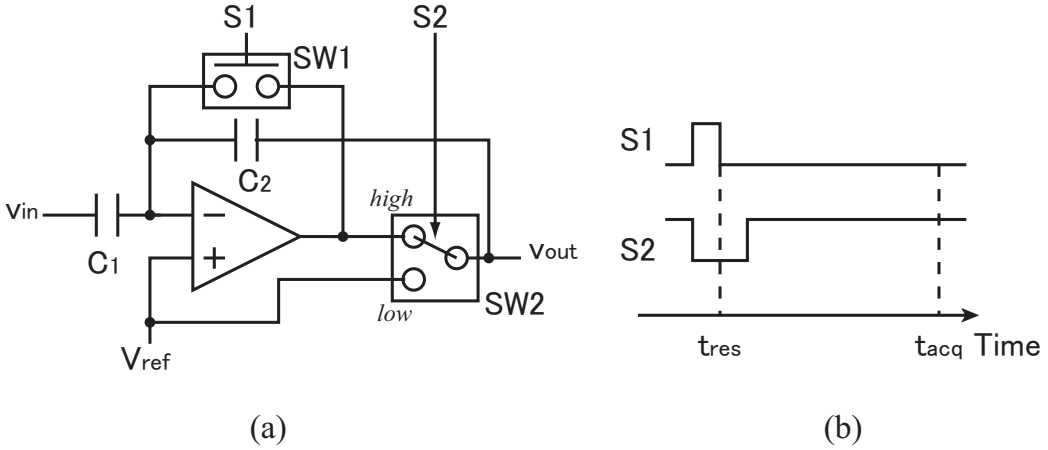


図 4.4: (a) ノイズ補償バッファの回路図．SW1，SW2 を (b) に示すように制御する事により，リセット時刻 (t_{res}) における入力電圧 (v_{in}) と，リセット後の任意のデータ取得時刻 (t_{acq}) における入力電圧の差に応じた電圧が出力される．(動作の詳細は [6] 参照)．SW2 の上下に記された *high* と *low* は，信号 S2 が *high* 及び *low* の時の接続先を示す．(b) ノイズ補償バッファの制御信号のタイミングチャート．

このノイズ補償バッファの動作では，トランジスタのミスマッチによるオフセット電圧がキャンセルされる．このため，出力電圧における固定パターンノイズは 5 mV 以下となる [6]．本研究におけるシリコン網膜の信号電圧は peak-to-peak 値で 600 mV 程度のため，ノイズは信号に対し 1%以下に抑えられる．また，光ショットノイズを始めとしたランダムノイズ [7] の影響も 5 mV 以下であるため，これらのノイズはシステムの動作に大きな影響を与えることはない．

4.2.3 コントロールボード

本研究で開発したコントロールボードの概観を図 4.5 に示す．コントロールボードは，FPGA，CPU，A/D 変換器，D/A (digital-to-analog) 変換器，イーサネットインターフェース，低ドロップアウトレギュレータを用いて構成した．FPGA 及びイーサネットインターフェースは，これらがあらかじめマウントされた基盤部品 (AtmarkTechno SUZAKU-V.SZ310) を用いた．ボードサイズは 73 mm × 65 mm である．

本ボードの役割は，イメージセンサの制御，画像情報の処理，及びイーサネット通信である．イメージセンサ制御信号の生成，及び画像情報の処理までは FPGA にて行い，通信処理には別途 CPU を用いた．実際には，CPU (IBM PowerPC 405) を内蔵した FPGA (Xilinx Virtex II Pro XC2VP4) を用いたため，上記処理は全てワンチップで行われる．

イメージセンサから得られた画像情報は，A/D 変換器 (National Semiconductor ADC08L060) によって A/D 変換された後，FPGA に入力される．FPGA では，リソースの許す限り並列化された回路によって，画像情報を効率的に処理する．前段のシリコン網膜による処理が適切に行われていれば，FPGA における負荷は減少し，

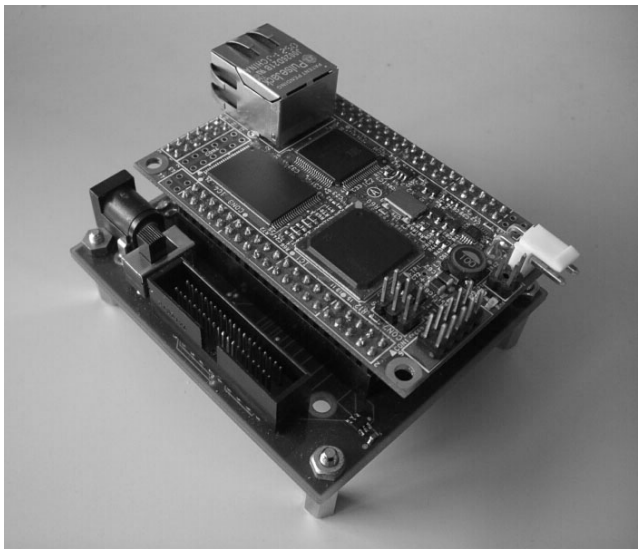


図 4.5: コントロールボードの概観.

処理の効率は上昇する．本研究で画像処理に用いたクロック周波数は 40MHz であり，GHz オーダーで動作する今日の逐次演算装置を配したシステムとは一線を画す．処理された画像データは，CPU によりイーサネットを介して PC 等の記録装置へと送信される．

CPU の制御には，利便性の観点から OS (operating system，Linux-2.4.32) を利用し，通信プロトコルスタックは OS 標準のものを用いた．UDP/IP を用いた時の本ボードの通信速度は，24.4Mbps であった．これは，本研究で用いているシリコン網膜のデータである 100×100 画素 8bit 階調の画像を秒間約 300 フレーム送信できる通信速度であり，本構成で用いる上で十分なものである．

ボードへの電力供給は，出力電圧 3.3V の低ドロップアウトレギュレータ (National Semiconductor LP3855) を介して行われる．ドロップアウト電圧とは，レギュレータが正常動作するために必要な最低入出力電位差のことである．リニアレギュレータでは入出力電位差と入力電流の積がそのまま熱損失となるため，低ドロップアウトレギュレータを用い，入出力電位差を抑えることが低消費電力化に効果的である．本ボードで用いたレギュレータのドロップアウト電圧は約 240mV(1.5A ロード時) であり，一般的なリチウムイオンバッテリー (出力電圧 3.7V) にて効率よく動作させることができる．ボード単体の消費電力は約 1.4 W (@ 3.7V) であり，シリコン網膜を組み合わせた場合の消費電力は 1.6 W (@ 3.7V) であった．

本ボードから送信された画像情報は，本研究で本ボード用に開発したソフトウェアを用いて，受信・記録・解析を行った (外観は図 4.6)．開発には，Microsoft Visual Studio 2003 を利用した．

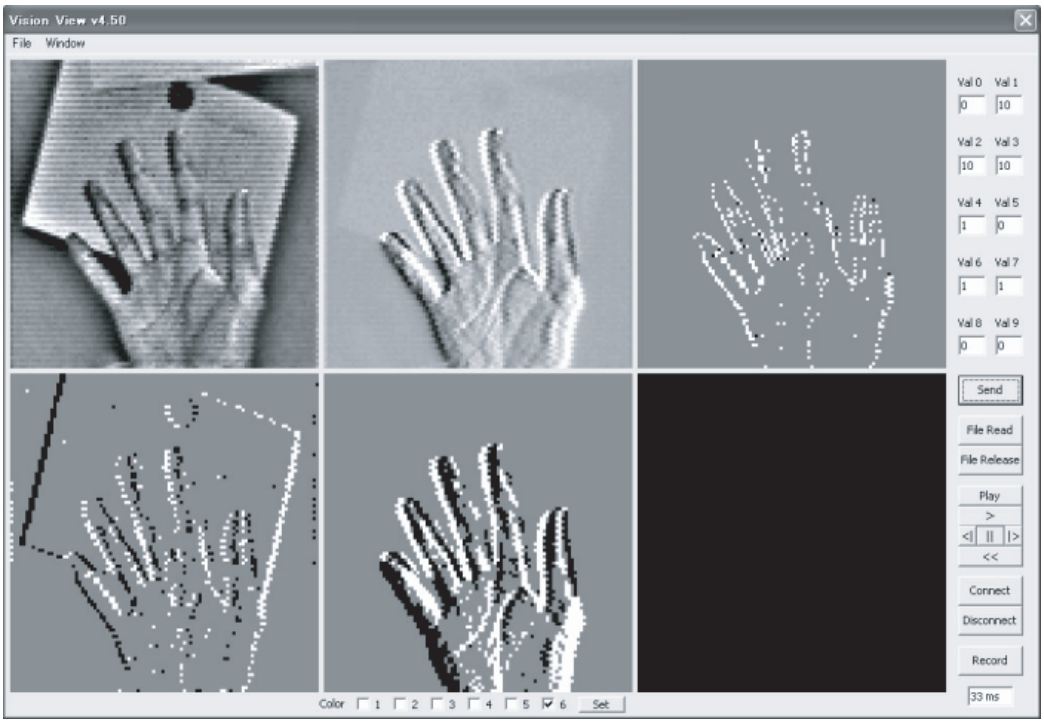


図 4.6: 受信ソフトウェアの概観．6 つの画像表示領域には，イメージセンサから得られた画像データ，及び記録した画像データを表示することが出来る．

4.3 LGMD 計算原理の簡易実装

前章で検証した衝突検知のための電子回路モデルの構造を，一部簡略化して本ハードウェアに実装した [8]．入力時に必要となる光強度変化に対する一過性応答は，シリコン網膜のフレーム間差分動作で模擬した．側抑制の機構は，簡略化してその効果の及ぶ範囲を隣接一画素に限定し，FPGA に実装した．この実装システムを用いて，ハードウェア上での衝突検知モデルの動作を検証した．以下，シリコン網膜，FPGA の順に制御，処理内容について述べる．

4.3.1 フレーム間差分動作

シリコン網膜からフレーム間差分出力を得るために用いた制御信号を図 4.7 に示す．チャート左に記された信号名は，シリコン網膜の回路図 (図 4.2(b)) に記された信号名に対応する．この制御信号を用いた時の出力段のノイズ補償バッファの出力は，1 フレーム過去の抵抗回路網一層目の出力電圧を $V(t-1)$，現フレームの一層目の出力電圧を $V(t)$ とすると，

$$V(t-1) - V(t) \tag{4.2}$$

となる．これは，シリコン網膜の視野内での輝度値の時間的な変化を計算していることを表し，昆虫においては視細胞出力に相当する．

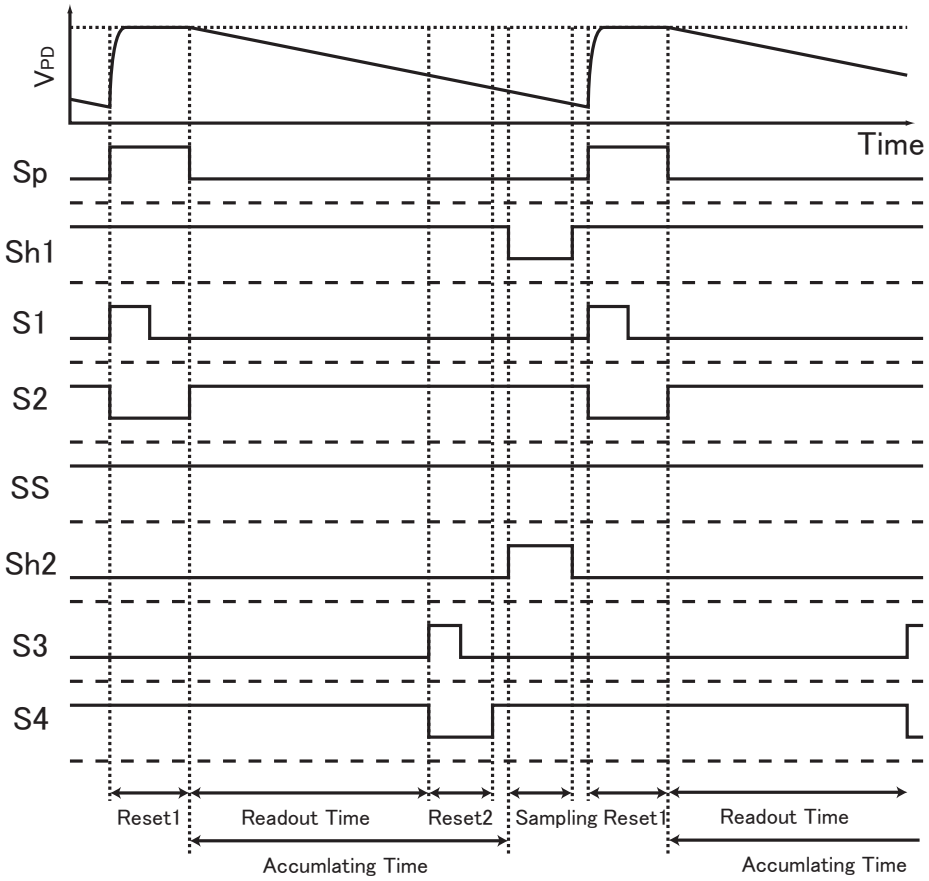
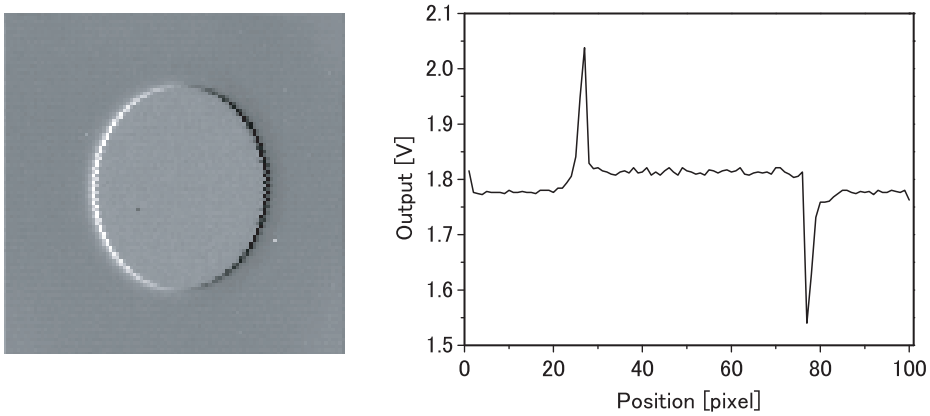


図 4.7: 制御信号のタイミングチャート．フレーム間差分動作用．チャート左に記された信号名は，シリコン網膜の回路図 (図 4.2(b)) に記された信号名に対応する．



(a) (b)

図 4.8: フレーム間差分動作時のシリコン網膜出力．(b) は中央水平 1 ライン分の出力波形．

シリコン網膜に，黒い背景下で白い円の横方向の移動を提示した際の出力を図4.8(a)に示す．図4.8(b)は図4.8(a)の中央水平1ライン分の出力波形である．移動輪郭の部分のみが抽出されていることが分かる．

4.3.2 FPGAにおける処理の流れ

シリコン網膜から得られるフレーム間差分信号はA/D変換された後，FPGAに入力される．図4.9にFPGAにおける処理の模式図を示す．

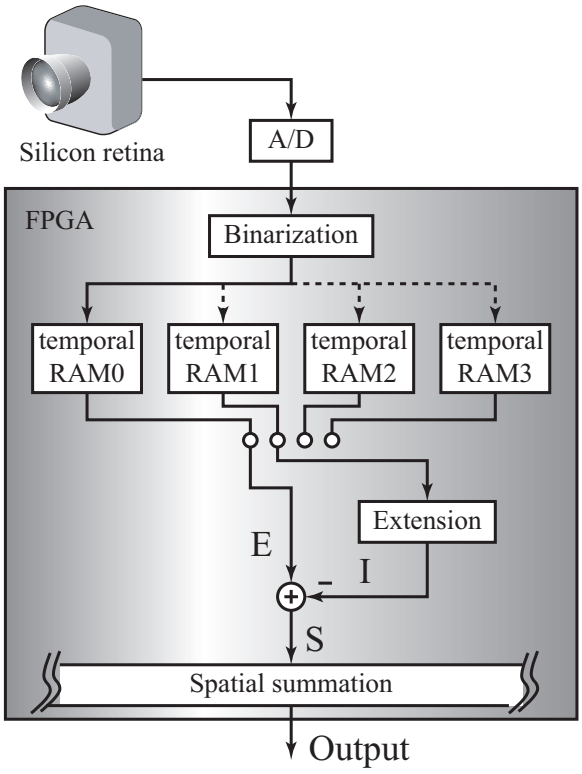


図 4.9: FPGAにおける処理の模式図.

まず，図4.10の様にフレーム間差分情報に閾値処理を施すことにより，動きの有無に関する2値化(Binarization)を行う．この2値化の結果が，LGMDモデルにおける興奮信号Eに相当する．2値化された情報は複数個の一時RAMに順次記録されていく．1フレーム分の情報を1個のRAMに記録するため，RAMの個数分の過去フレームの情報を蓄えることができる．本研究では4個のRAMを利用した．

RAMに記録された過去フレームの動き情報は周囲6画素に拡張される．この拡張された情報が，遅延を持った側抑制Iに相当する．興奮信号Eに相当する現フレームの動き情報と，側抑制信号Iを比較し，以下の式によって各画素の出力値Sを決定する．

$$S = \begin{cases} 1 & (E = 1 \ \ and \ \ I = 0) \\ 0 & (E = 0 \ \ or \ \ I = 1) \end{cases} \tag{4.3}$$

S の空間相和が最終的な出力となる．

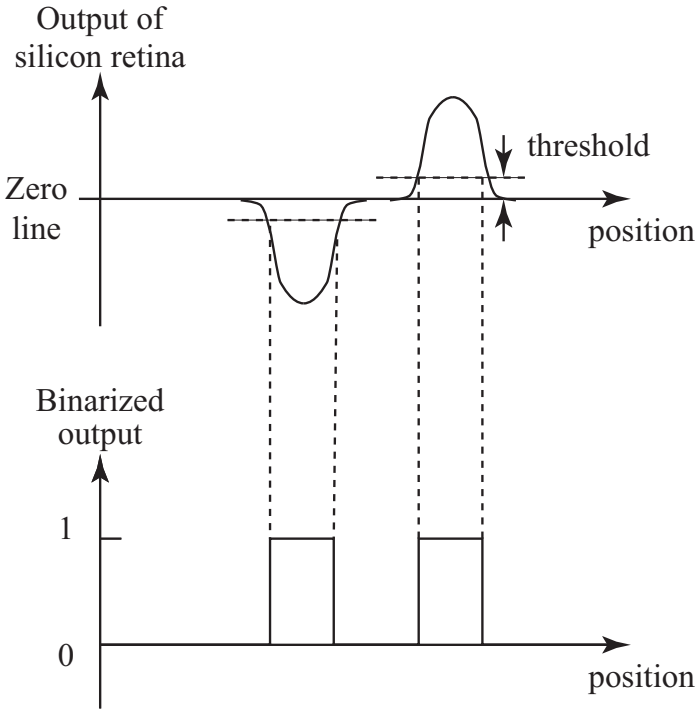


図 4.10: シリコン網膜出力 (上) と 2 値化出力 (下).

4.4 実装システムの評価

4.4.1 評価方法

図 4.11 に示す環境において，物体の動きを模擬した動画を LCD (liquid crystal display) に表示し，これをシリコン網膜に提示することにより，本実装システムの出力を検証した．レンズは PENTAX B2514D (焦点距離 25mm，F/1.4) を用い，シリコン網膜の視野と LCD 上の動画領域が一致するようにシステムを配置した．用いた動画は，接近，並進，離反を模擬するものである (図 4.12)．シリコン網膜のサンプリング時間は 33 ms とした．

4.4.2 正面からの接近に対する応答

図 4.13 に，物体の接近を模擬した動画 (図 4.12(a)) を提示した際のシステム出力を示す．物体の一辺は 10 cm，速度は 1 m/s とした．横軸は衝突までの時間であり，側抑制の有無における出力を比較している．移動輪郭により刺激される画素数は輪郭長と輪郭速度の積に比例するため，側抑制がない場合，前章のモデルシミュレーションと同様，出力はこの積にほぼ比例した増加曲線を描いた．側抑制を用いた場合も，モ

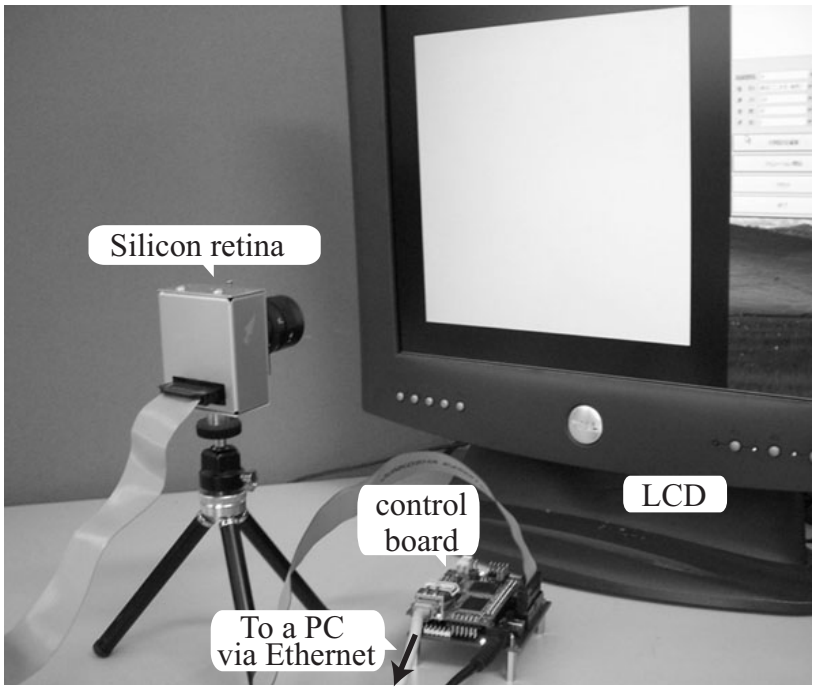
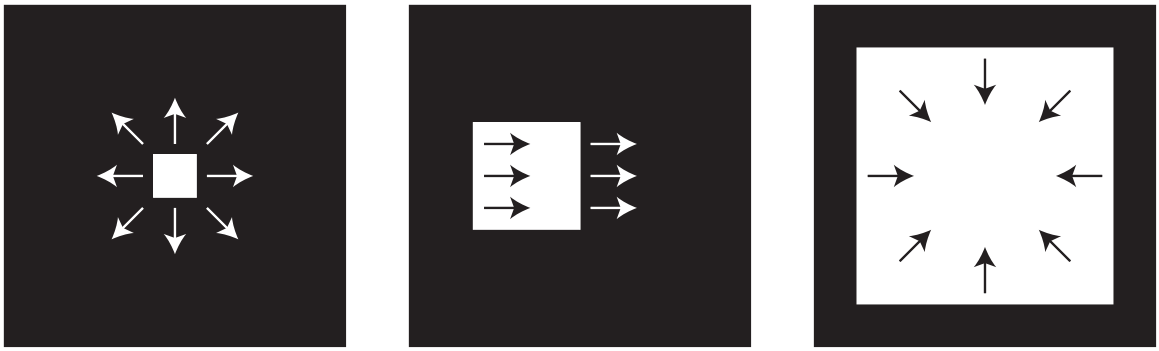


図 4.11: システムの定量実験環境．LCD に物体の運動を模擬した動画を提示する．



(a) (b) (c)

図 4.12: システムに提示する動画．(a) 接近を模擬した動画．黒い背景下で白い正方形が等速度での接近を模擬したレートで拡大する．(b) 並進を模擬した動画．黒い背景下で白い正方形が等速度での並進を模擬したレートで横切る．(c) 離反を模擬した動画．黒い背景下で白い正方形が等速度での離反を模擬したレートで縮小する．

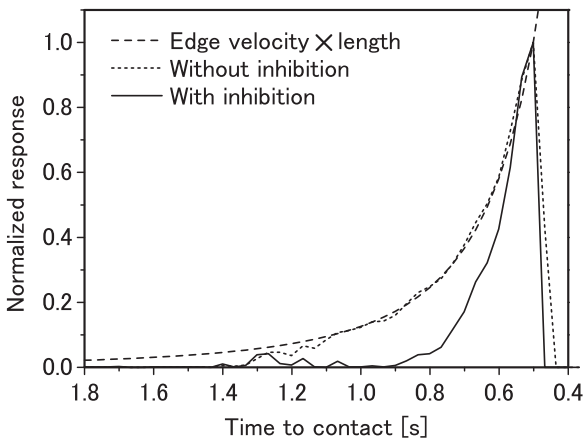


図 4.13: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．側抑制の有無における出力比較．横軸は衝突までの時間を示し，点線は側方抑制を行わない場合の応答を，実線は行う場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．破線は輪郭長と輪郭速度の積であり，単位時間に刺激される画素数はこの値に比例する．

デルシミュレーションと同様に，輪郭速度が抑制の伝達速度を上回る至近距離においてのみ強く応答した．

次に，側抑制の時間特性が出力に与える影響を検証するため，遅延時間を変化させて実験を行った．遅延時間の調整は，過去のフレーム情報を蓄えた複数の一時 RAM (図 4.9 参照) の中から，抑制に用いる RAM を変更することで行った．図 4.14 に，2 つの遅延時間に対する出力を示す．66 ms の遅延を用いた場合より，33 ms の遅延を用いた場合の方がより急峻となっており，側抑制の時間特性を変化させた際の影響は，モデルシミュレーションと同様であることが分かる．本結果から，ハードウェア実装されたシステムにおいても，抑制信号の時間特性を変化させることで応答開始距離を制御できることが確認できた．

次に，システムの応答における，接近物体サイズの影響を検証した．図 4.12(a) の動画を用いて，接近物体のサイズを変化させた．図 4.15(a) に，サイズの異なる物体の接近に対するシステム出力を示す．物体が小さくなるに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった

図 4.15(b) に，システムが応答を開始してから衝突までの時間を，物体の大きさに対してプロットしたグラフを示す．応答がピーク値の 5%を越えた時点を応答開始時刻とした．点線はシリコン網膜上での輪郭速度が 1.8 pixels/frame (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．各点の値はほぼこの曲線に近似されており，本システムが，モデルシミュレーション同様，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．

次に，システムの応答における，接近速度の影響を検証した．図 4.12(a) の動画を用いて，接近物体の速度を変化させた．図 4.16(a) に，速度の異なる物体の接近に対するシステムの出力を示す．速度が上昇するに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった．

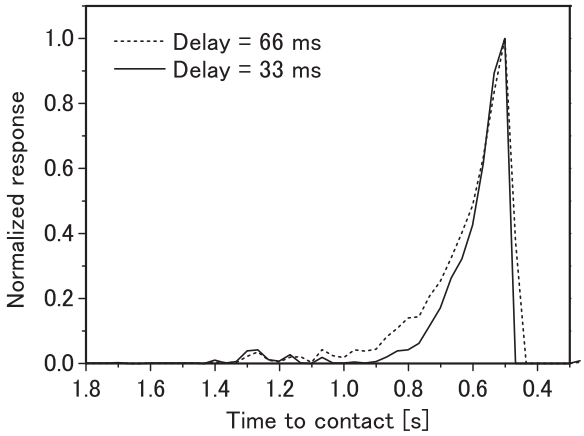
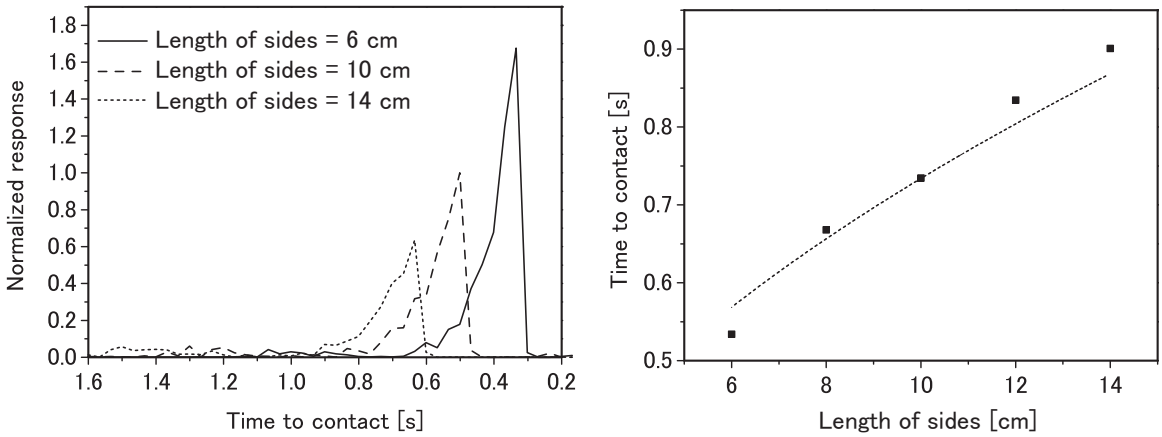


図 4.14: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．側抑制の遅延時間を変化させた場合の出力比較．横軸は衝突までの時間を示し，点線は長い遅延を用いた場合の応答を，実線は短い遅延を用いた場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．



(a) (b)

図 4.15: (a) 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つに接近物体サイズに対する出力を示す．点線は一辺 14 cm の物体に対する応答を，破線は一辺 10 cm の物体に対する応答を，実線は一辺 6 cm の物体に対する応答を，それぞれ示す．各応答は，一辺 10 cm の物体に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近物体の大きさとシステムの応答開始時間との関係．物体の大きさを横軸として，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．点線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 1.8 pixels/frame (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時におけるシリコン網膜上での輪郭速度) となる時点を示している．

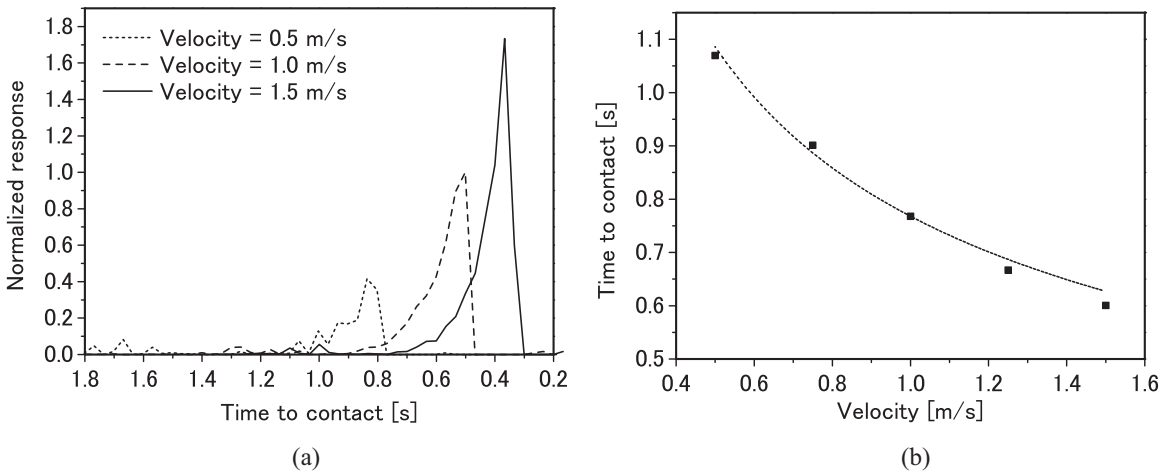


図 4.16: (a) 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの物体接近速度に対する出力を示す．点線は接近速度 0.5 m/s に対する応答を，破線は接近速度 1 m/s に対する応答を，実線は接近速度 1.5 m/s に対する応答を，それぞれ示す．応答は，接近速度 1 m/s に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近速度とシステムの応答開始時間との関係．接近の速度を横軸として，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．点線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 1.8 pixels/frame (速度 1 m/s の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．

図 4.16(b) に，システムが応答を開始してから衝突までの時間を，接近速度に対してプロットしたものを示す．点線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 1.8 pixels/frame (速度 1 m/s の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．各点の値はほぼこの曲線に近似されており，本システムが，モデルシミュレーション同様，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．

4.4.3 正面以外からの接近に対する応答

図 4.12(a) の動画に変更を加え，物体の中心がレンズ光軸からずれた位置からの，レンズ光軸に平行な接近を模擬する動画を作成し，システムに提示した．この時の応答を図 4.17 に示す．物体の一部がレンズ光軸上にある状態での接近では，物体中心とレンズ光軸の距離が大きくなるにつれて，片側の輪郭がより至近距離まで視野内にとどまるため，応答は近距離へと移動した (図 4.17(a))．一方，物体がレンズ光軸から外れた状態での接近では，物体とレンズ光軸の距離が大きくなるにつれて，システムに対してより遠方で物体が視野から外れるため，応答の位置が遠方となりピークの値も減少した (図 4.17(b))．図 4.18 に、レンズ光軸–接近物体中心間距離と，応答のピーク値の関係を示す．モデルシミュレーション同様，物体がレンズ光軸から遠ざかるにつれて，応答のピーク値が減少することが確認できる．

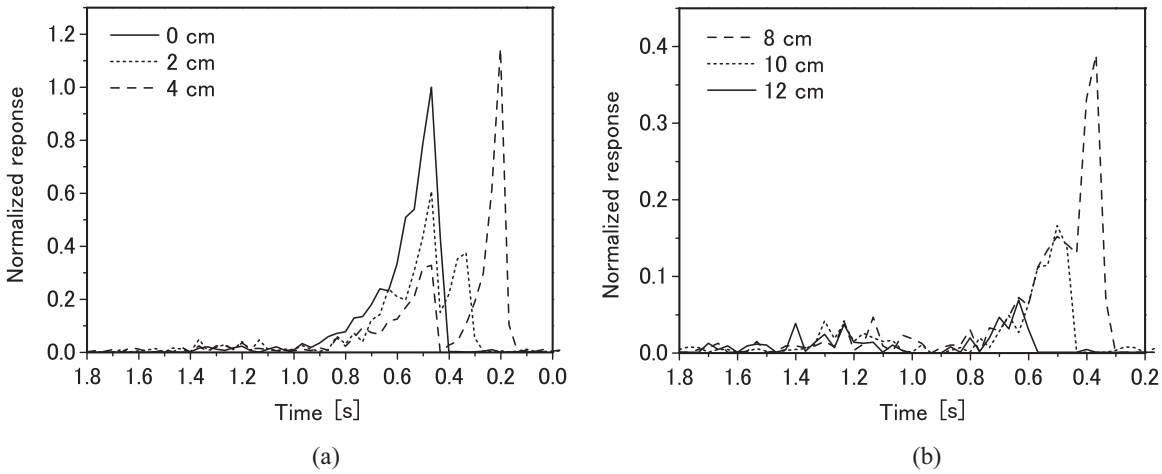


図 4.17: 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの，接近に対するシステムの応答．物体がシステムの側方を通過するまでの時間を横軸として，レンズ光軸–接近物体中心間の距離を変化させた際の出力を示す．応答は，正面からの接近に対する応答の最大値によって正規化されている．(a) 物体の一部がレンズ光軸上にある場合の応答．実線は正面からの接近に対する応答を，点線は物体中心がレンズ光軸から 2 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，破線は 4 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，それぞれ示す．(b) 物体がレンズ光軸上から外れている場合の応答．波線は物体中心がレンズ光軸から 8 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，点線は 10 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，実線は 12 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，それぞれ示す．

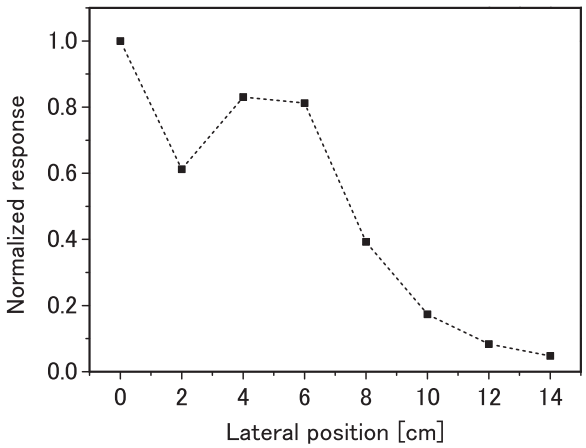


図 4.18: 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの接近に対するシステムの応答のピーク値．横軸はレンズ光軸–接近物体中心間の距離であり，値は正面からの接近に対する応答のピーク値によって正規化されている．

4.4.4　並進及び離反に対する応答

接近以外の動きに対するシステムの応答を検証するため，システム前方における等速度での並進を模擬した動画 (図 4.12(b))，及びシステム正面からの等速度での離反を模擬した動画 (図 4.12(c)) をシステムに提示した．

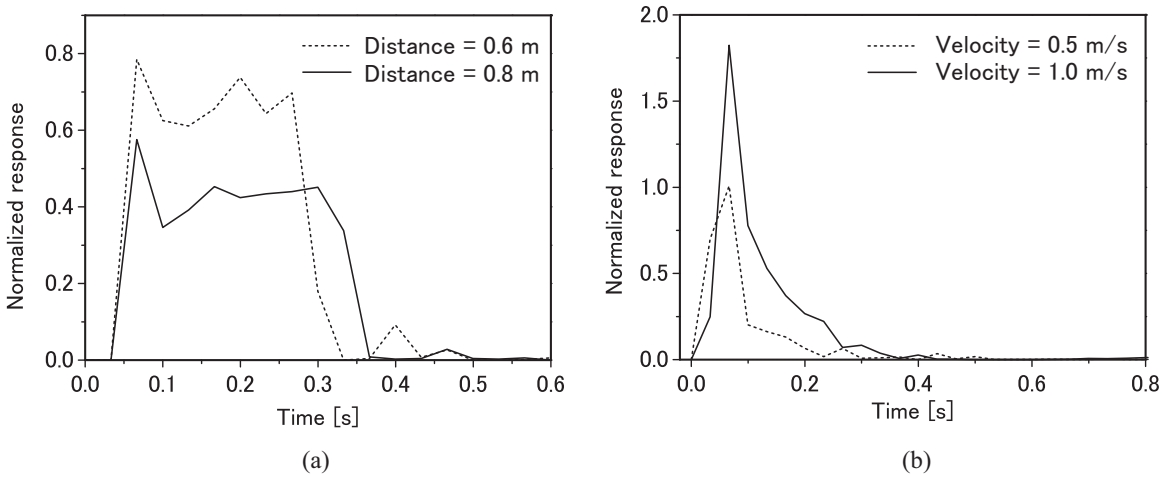


図 4.19: (a) 並進に対するシステムの応答．並進開始からの時間を横軸として，モデルからの距離，0.6 m，0.8 m における 1 m/s での並進に対する応答を示す．応答は，1 m/s での正面からの接近時における応答の最大値によって正規化されている．(b) 離反に対するシステムの応答．離反開始からの時間を横軸として，0.5 m/s，1 m/s での離反に対する応答を示している．応答は，1 m/s での正面からの接近時における応答の最大値によって正規化されている．

図 4.19(a) に，システムからの距離，0.6 m，0.8 m における並進を模擬した動画を提示した際の結果を示す．本結果より，モデルシミュレーション同様，物体並進時は遠方においても比較的高い値を示し，距離が縮むに従って値が増加することが分かる．

図 3.16(b) に，離反を模擬した動画を提示した際の結果を示す．離反時もモデルシミュレーション同様，離反開始の際に急激に大きな輪郭速度が起こるため，非常に大きな応答を示した．

4.5　考察

本章では，シリコン網膜と FPGA を組み合わせて構成した小型の視覚情報処理用ハードウェアに，前章で検証したモデルを実装した．側抑制の機構を簡略化して第一隣接に限定しているが，シミュレーションで想定した接近物体のサイズや速度に対しては，至近距離に迫った物体への選択性を示した．

前章の考察より，衝突回避システムとして所望の動作を得るためには，焦点距離 f と，検出すべき最低輪郭速度 $u_{\min}$ を適切に定めなくてはならない．本章の簡略化したシステムでは，側抑制の画素数が固定されているため，$u_{\min}$ の設定パラメータは抑制

の遅延時間のみとなる．遅延時間は画像取得時間の定数倍に限定されてしまうため，$u_{\min}$ の適切な設定を画像の取得時間と独立に行うことは難しい．FPGA による空間フィルタリングを複数画素に拡張することも可能であるが，ディジタル演算による空間フィルタリングでは，画像処理時間はフィルタサイズに依存するため，フィルタサイズを画像取得時間に独立に定めることが出来ない．このため，FPGA による空間フィルタリングを拡張したとしても，検出すべき最低輪郭速度の調整を，前章のモデルのように柔軟に行うことは困難であると考えられる．

以上から本構成では，本章のシミュレーションで想定した環境以外の環境では，対応が困難な場合もあることが予想される．しかしながら，本章のシステムはシリコン網膜をトランジェント応答の取得のみに用いており，シリコン網膜のアナログ回路を十分に活用しているとは言えない．シリコン網膜のアナログ回路を活用して空間フィルタリングを行うことにより，柔軟性や情報処理効率の向上が期待できる．

4.6 結言

シリコン網膜と FPGA を利用して，効率的に視覚情報が処理できるハードウェアを構成した．前章で検証した衝突検知のための電子回路モデルの構造を，一部簡略化して本ハードウェアに実装することにより，ハードウェア上でのモデルの動作を検証した．実装ハードウェアは前章のモデルシミュレーション同様，至近距離物体への選択的応答を示し，本構造で衝突検知システムを実現できることを確認した．

本章では，側抑制の機構を簡略化して，その効果の及ぶ範囲を第一隣接画素に限定したため，至近距離物体への選択性等に制限が認められた．側抑制の機構を拡張することにより，より柔軟な衝突検知システムの実現が期待できる．

参考文献

[1] K. Shimonomura and T. Yagi, “A multichip aVLSI system emulating orientation selectivity of primary visual cortical cells,” IEEE Trans. Neural Netw., vol.16, no.4, pp.972–979, Jul. 2005.

[2] F. C. Rind and D. I. Bramwell, “Neural network based on the input organization of an identified neuron signaling impending collision,” J. Neurophysiol., vol.75, no.3, pp.967–985, Mar. 1996.

[3] H. Okuno and T. Yagi, “Bio-inspired real-time robot vision for collision avoidance,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.1, pp.68–74, Feb. 2008.

[4] W. R. Stevens, 詳解 TCP/IP Vol.1 プロトコル, ピアソンエデュケーション, 東京, 2000.

[5] R. Takami, K. Shimonomura, S. Kameda, and T. Yagi, “A novel pre-processing vision system employing neuromorphic 100x100 pixel silicon retina,” Proc. of the 2005 IEEE ISCAS, pp.2771–2774, Kobe, Japan, May 2005.

[6] S. Kameda and T. Yagi, “An analog VLSI chip emulating sustained and transient response channels of the vertebrate retina,” IEEE Trans. on Neural Networks, vol.14, iss.5, pp.1405–1412, Sep. 2003.

[7] 米本和也, CCD/CMOS イメージ・センサの基礎と応用, CQ 出版社, 東京, 2003.

[8] 奥野弘嗣, 八木哲也, “昆虫視覚系の情報処理機構を模倣した接近物認識システム,” 信学技報, vol.105, no.335, pp.61–64, Oct. 2005.

第5章　アナログ・ディジタル混在型衝突検知システム

5.1　緒言

本研究ではこれまで，電子回路のダイナミクスによってLGMD [1] の計算原理を模倣するモデルを考案し (第3章)，これを一部簡略化した上でハードウェアへの実装を行った (第4章)．実装システムは，ある程度至近距離物体への選択的応答を示したが，柔軟な空間フィルタリングの必要性が認められた．

本章では，第3章の電子回路モデルと同様，側抑制のための空間フィルタリングに抵抗回路網を利用したシステムについて述べる．抵抗回路網を活用することにより，ディジタルでは容易に構成できない広範な空間フィルタリングを，瞬時に行うことが出来る．また，シリコン網膜 [2] で空間フィルタリングまで行うことにより，FPGA内での計算コストは削減される．これは他の機能の追加や省電力化につながる．

5.2　システムの構成と処理の流れ

構築したシステムの模式図を図5.1に示す [3]．以下，シリコン網膜，FPGAの順に制御，処理内容について述べる．

5.2.1　シリコン網膜の制御と出力

図5.2に，制御信号のタイミングチャートを示す．チャート左に記された信号名は，シリコン網膜の回路図 (図4.2(b)) に記された信号名に対応する．この制御では，2度の蓄積時間を利用して，1層目のノイズ補償バッファに式 (4.2) で表されるフレーム間差分信号を出力させる．この時，1層目の抵抗回路網に加えるゲート電圧 V_{rs1} は0 Vとし，1層目の側方へのつながりは無視できるものとした．1層目のバッファにフレーム間差分出力を行わせるため，この出力に2層目の抵抗回路網を適用することが出来る．側抑制の空間フィルタサイズは2層目の抵抗回路網に加えるゲート電圧 V_{rs2} によって，制御することが出来る．

出力バッファでは，2層目の抵抗回路網を通さないフレーム間差分出力 (V_{FS1}) と，2層目の抵抗回路網を通した出力 (V_{FS2}) の2種類の出力を行う．これら2つの出力の切り替えは，制御信号SSにて行う．シリコン網膜に白黒の輪郭移動を提示した際の，これら2つの出力を図5.3に示す．図5.3(a) と (b) の出力が時分割でシリコン網膜からFPGAへと送信される．

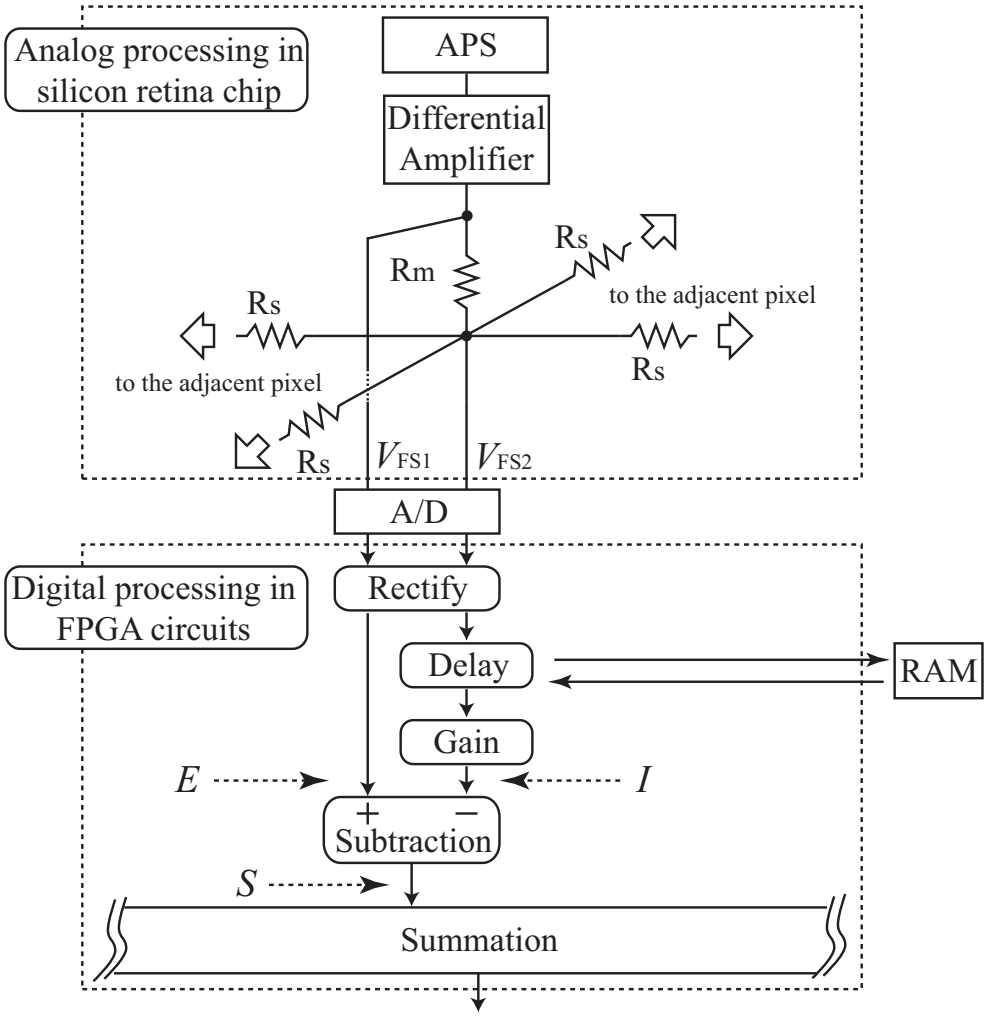


図 5.1: システム構成の模式図 (1 画素分).

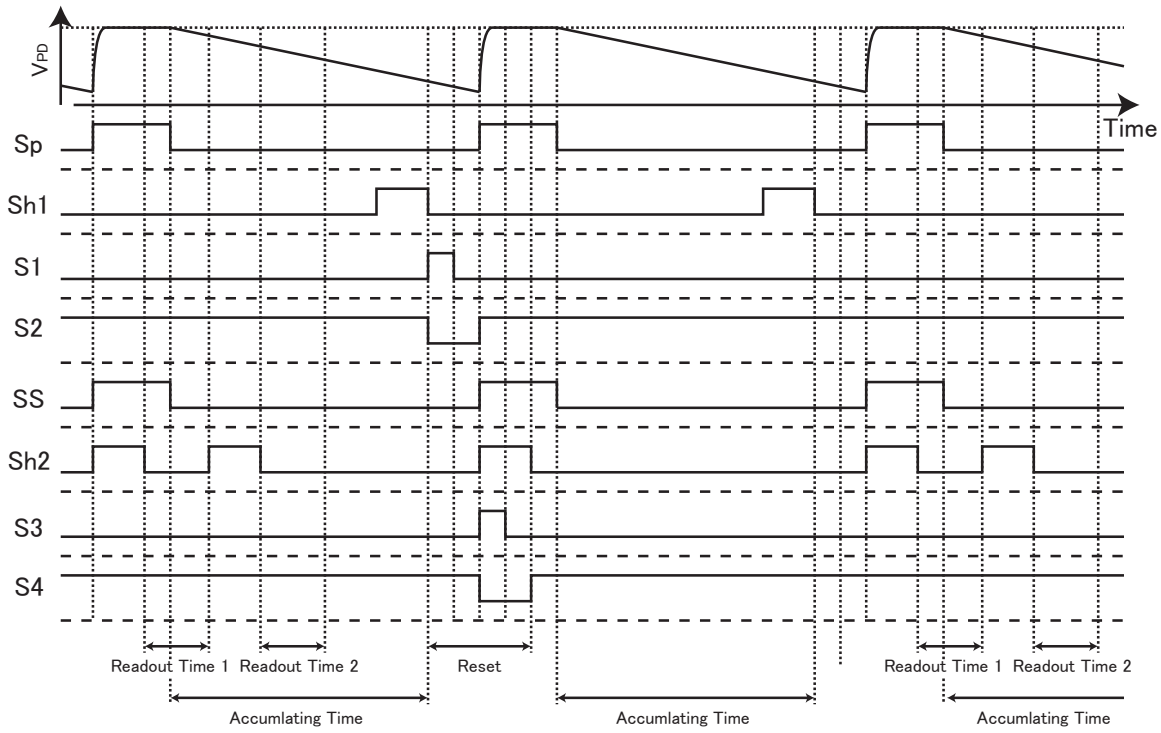


図 5.2: 制御信号のタイミングチャート．側抑制信号出力用．チャート左に記された信号名は，シリコン網膜の回路図 (図 4.2(b)) に記された信号名に対応する．

5.2.2 FPGA における処理

シリコン網膜から出力される 2 種類の信号は，A/D 変換された後，FPGA に入力される．これらの信号は，まず図 5.4 に示すように，1 フレーム分の信号の平均値を基準として整流される．このため，本システムの出力は物体–背景間の相対的なコントラストの極性に依存しない．ここで，A/D 変換された V_{FS1} を整流したものが，興奮信号 E に相当する．

A/D 変換された V_{FS2} は，一旦 RAM に記録され，ここで任意フレーム分の遅延を受ける．遅延後のこの信号を定数倍したものが，遅延を持った側抑制信号 I に相当する．E と I は第 3 章の電子回路モデルと同様，以下の式によって評価され，各画素の出力 S を得る．

$$S = \begin{cases} 0 & (E < I) \\ E - I & (E \geq I) \end{cases} \tag{5.1}$$

全画素の S の値を加算する事により，最終的な本システムの出力 LGMD が得られる．

ディジタル回路が苦手とする広い空間フィルタがフロントエンドで実現されているため，FPGA における計算コストと回路規模は大きく抑えられた．等価ゲート数は 4 万以下であり，クロック周波数は 40MHz で十分であった．

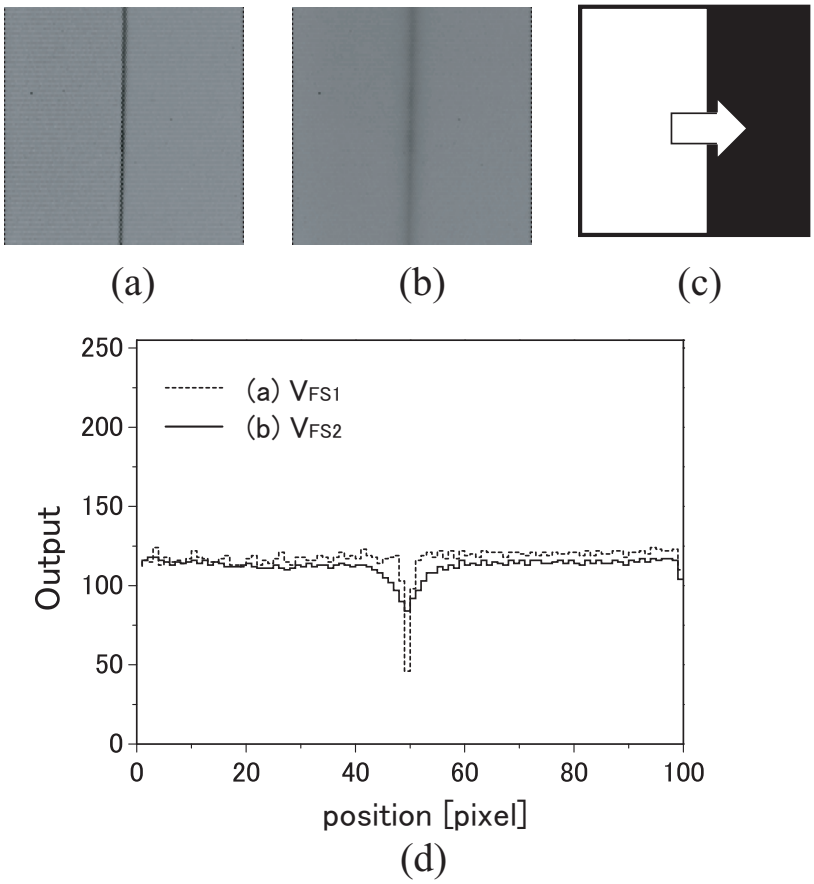


図 5.3: 図 5.2 の制御信号を用いた時のシリコン網膜の出力．(a) 抵抗回路網によるフィルタリングを受けない出力 (V_{FS1})．(b) 抵抗回路網によるフィルタリングを受けた出力 (V_{FS2})．(c) 提示した動画．白黒の輪郭が右へと移動する．(d) 上記 (a)(b) にける中央水平 1 ライン分の波形．点線は V_{FS1} を，実線は V_{FS2} を，それぞれ示す．

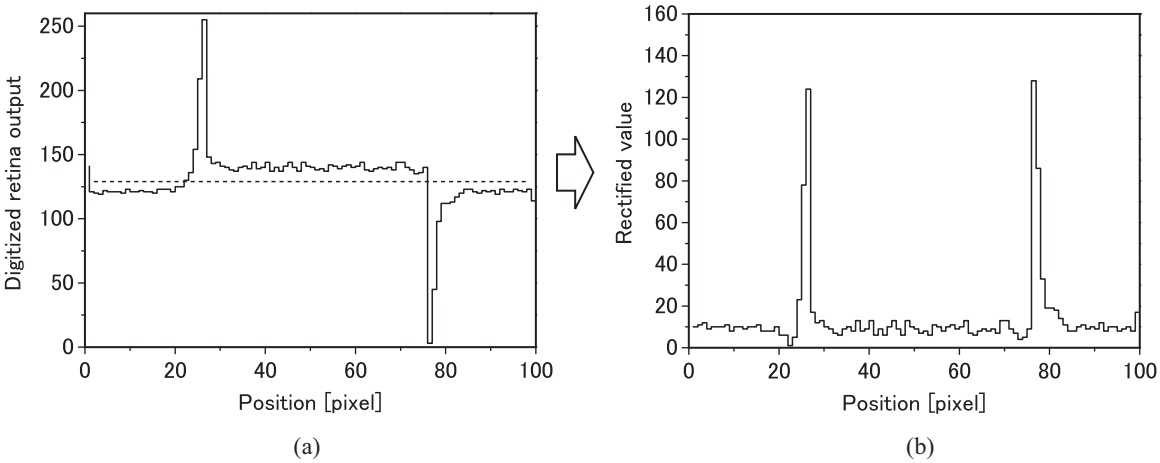


図 5.4: FPGA における整流処理．(a)FPGA が受け取るシリコン網膜出力．点線は平均値を示す．(b)(a) の出力を平均値を基準に整流したもの．

5.3 システム出力の評価

5.3.1 評価方法

前章の図 4.11 と同様の環境を用いて，物体の動きを模擬した動画を LCD (liquid crystal display) に表示し，これをシリコン網膜に提示することにより，本実装システムの出力を検証した．レンズは PENTAX B2514D (焦点距離 25mm，F/1.4) を用い，シリコン網膜の視野と LCD 上の動画領域が一致するようにシステムを配置した．シリコン網膜のサンプリング時間は 33 ms とした．用いた動画は，図 4.12(a) に示す接近を模擬するものである．

5.3.2 正面からの接近に対する応答

図 5.5 に，物体の接近を模擬した動画を提示した際のシステム出力を示す．物体の一辺は 10 cm，速度は 1 m/s とした．横軸は衝突までの時間であり，側抑制の有無における出力を比較している．移動輪郭により刺激される画素数は輪郭長と輪郭速度の積に比例するため，側抑制がない場合，モデルシミュレーションと同様，出力はこの積にほぼ比例した増加曲線を描いた．側抑制を用いた場合も，モデルシミュレーションと同様に，輪郭速度が抑制の伝達速度を上回る至近距離においてのみ強く応答した．

次に，側抑制の時空間特性が出力に与える影響を検証するため，空間フィルタサイズ及び遅延時間を変化させて実験を行った．空間フィルタサイズは，シリコン網膜 2 層目の抵抗回路網にかけるゲート電圧 V_{rs2}(図 4.2(b) 参照) を，遅延時間は RAM に記

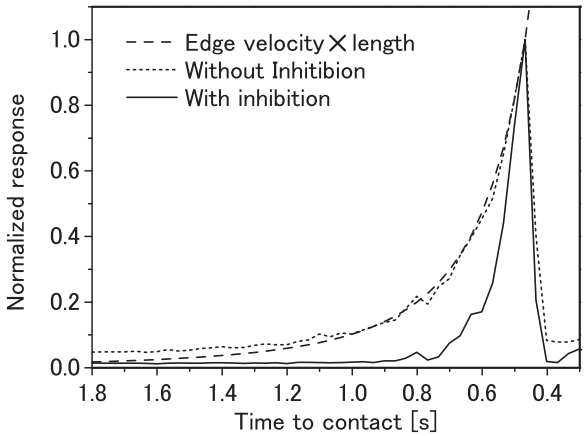


図 5.5: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．側抑制の有無における出力比較．横軸は衝突までの時間を示し，点線は側方抑制を行わない場合の応答を，実線は行う場合の応答を，それぞれ示す．破線は輪郭長と輪郭速度の積であり，単位時間に刺激される画素数はこの値に比例する．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．

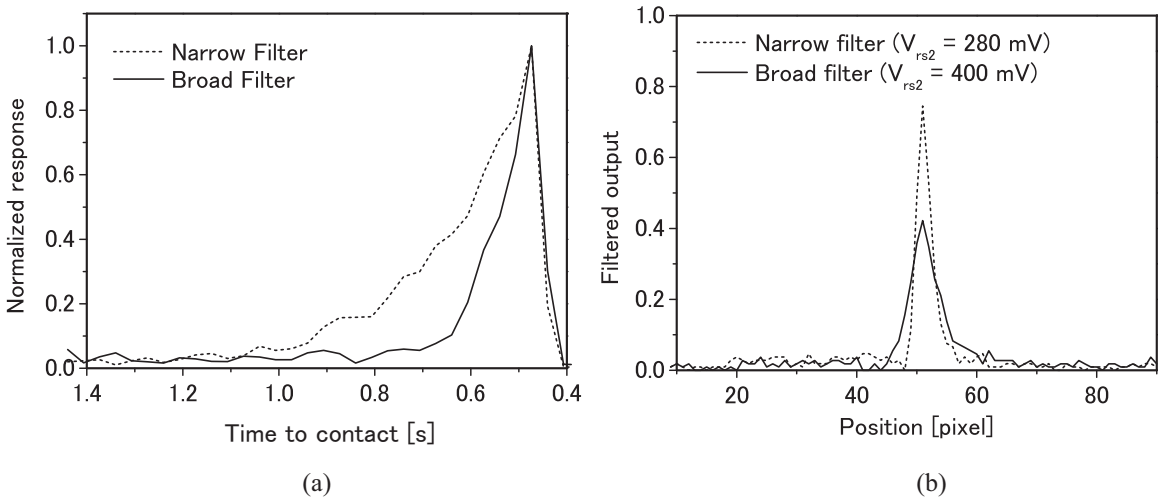


図 5.6: (a) 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．側抑制の空間フィルタを変化させた場合の出力比較．横軸は衝突までの時間を示し，点線は広い抑制フィルタ ((b) の点線) を用いた場合の応答を，実線は狭い抑制フィルタ ((b) の実線) を用いた場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．(b) 側抑制に用いたフィルタの空間特性．

録された過去のフレーム情報の中から用いる情報を，それぞれ変化させることで調整を行った．

図 5.6(a) に，側抑制の空間フィルタサイズを変化させ，上記と同様の動画を提示した際のシステム応答を示す．図 5.6(b) は，この時用いたフィルタの空間特性である．空間フィルタサイズが応答曲線に与える影響は，モデルシミュレーションと同様であり，広いフィルタを用いた場合に応答曲線はより急峻となった．

応答曲線における同様の変化は，抑制遅延時間の短縮によっても見られた (図 5.7)．以上の結果から，ハードウェア実装されたシステムにおいても，抑制信号の時空間特性を変化させることで応答開始距離を制御できることが確認できた．

次に，システムの応答における，接近物体サイズの影響を検証した．図 4.12(a) の動画を用いて，接近物体のサイズを変化させた．図 5.8(a) に，サイズの異なる物体の接近に対するシステム出力を示す．物体が小さくなるに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がシステムから近距離になった．

図 5.8(b) に，システムが応答を開始してから衝突までの時間を，物体の大きさに対してプロットしたものを示す．応答が，ピーク値の 10%を越えた時点を応答開始時刻とした．点線はシリコン網膜上での輪郭速度が 2.3 pixels/frame (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．各点の値はほぼこの曲線に近似されており，本システムがモデルシミュレーション同様，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．一辺 14 cm の物体に対する応答がこの曲線から少しずれているのは，応答強度が小さいために，固定パターンノイズ等の微小なノイズが影響したものと考えられる．固定パターンノイズ等の影響により，画面全体に 8 bit の A/D 値において最下位 1〜2 bit 程度 (最下位 1 bit の重みは約 3 mV) の微小な

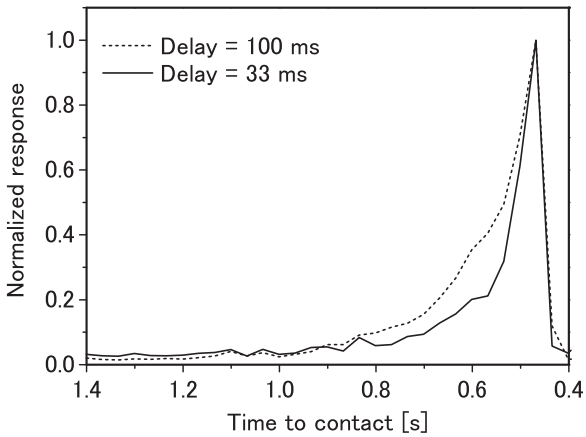


図 5.7: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．側抑制の遅延時間を変化させた場合の出力比較．横軸は衝突までの時間を示し，点線は長い遅延を用いた場合の応答を，実線は短い遅延を用いた場合の応答を，それぞれ示す．各応答は，それぞれの最大値によって正規化されている．

ノイズが存在するが，応答強度が低い場合，このノイズの影響は相対的に大きくなる．

次に，システムの応答における，接近速度の影響を検証した．図 4.12(a) の動画を用いて，接近物体の速度を変化させた．図 5.9(a) に，速度の異なる物体の接近に対するシステムの出力を示す．速度が上昇するに従って，応答のピーク値が高くなり，また応答開始位置がモデルから近距離になった．

図 5.9(b) に，システムが応答を開始してから衝突までの時間を，接近速度に対してプロットしたものを示す．点線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 2.3 pixels/frame (速度 1 m/s の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．各点の値はほぼこの曲線に近似されており，本システムが，モデルシミュレーション同様，特定の輪郭速度で応答を開始する事が確認できる．接近速度 0.5 m/s の物体に対する応答がこの曲線からずれているのは，応答強度が小さいために，固定パターンノイズ等の微小なノイズが影響したものと考えられる．

5.3.3 正面以外からの接近に対する応答

図 4.12(a) の動画に変更を加え，物体の中心がレンズ光軸からずれた位置からの，レンズ光軸に平行な接近を模擬する動画を作成し，システムに提示した．この時の応答を図 5.10 に示す．物体の一部がレンズ光軸上にある状態での接近においては，物体中心とレンズ光軸の距離が大きくなるにつれて，片側の輪郭がより至近距離まで視野内にとどまるため，応答は近距離へと移動した (図 5.10(a))．一方，物体がレンズ光軸から外れた状態での接近では，物体とレンズ光軸の距離が大きくなるにつれて，モデルに対してより遠方で物体が視野から外れるため，応答の位置が遠方となりピークの値も減少した (図 5.10(b))．図 5.11 に、レンズ光軸–接近物体中心間距離と，応答のピーク値の関係を示す．モデルシミュレーション同様，物体がレンズ光軸から遠ざか

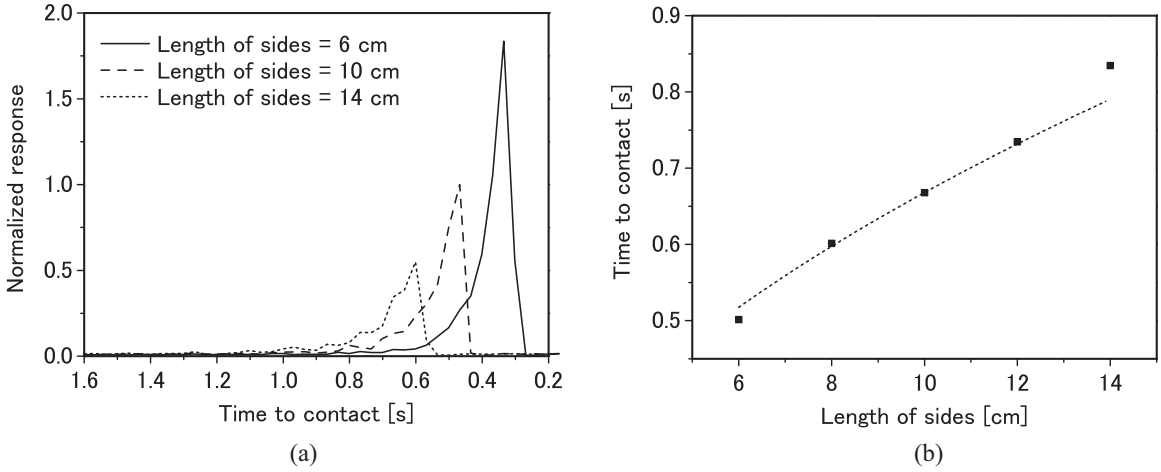


図 5.8: (a) 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの接近物体サイズに対する出力を示す．点線は一辺 14 cm の物体に対する応答を，破線は一辺 10 cm の物体に対する応答を，実線は一辺 6 cm の物体に対する応答を，それぞれ示す．各応答は，一辺 10 cm の物体に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近物体の大きさとシステムの応答開始時間との関係．物体の大きさを横軸として，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．点線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 2.3 pixels/frame (一辺 10 cm の物体に対する応答開始時におけるシリコン網膜上での輪郭速度) となる時点を示している．

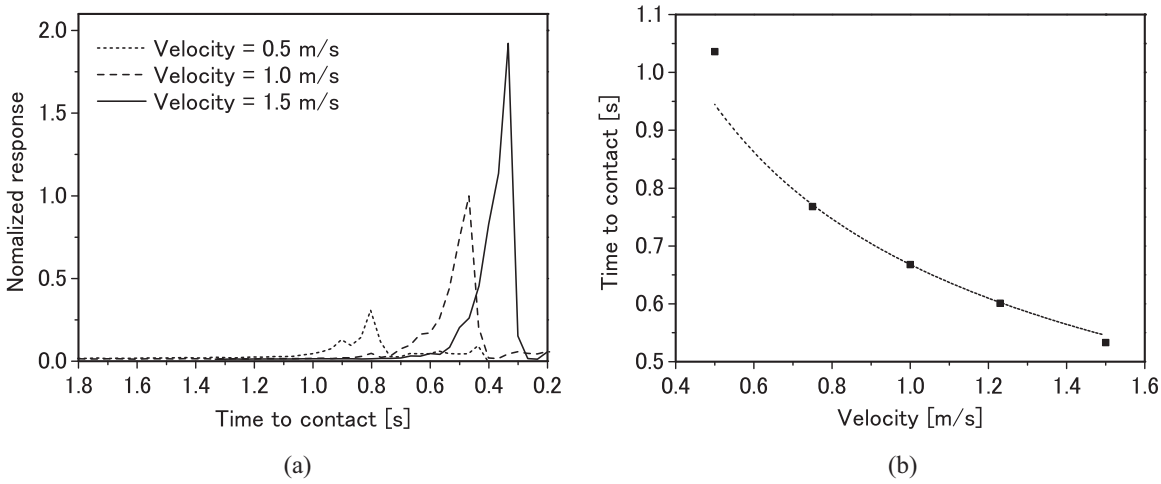
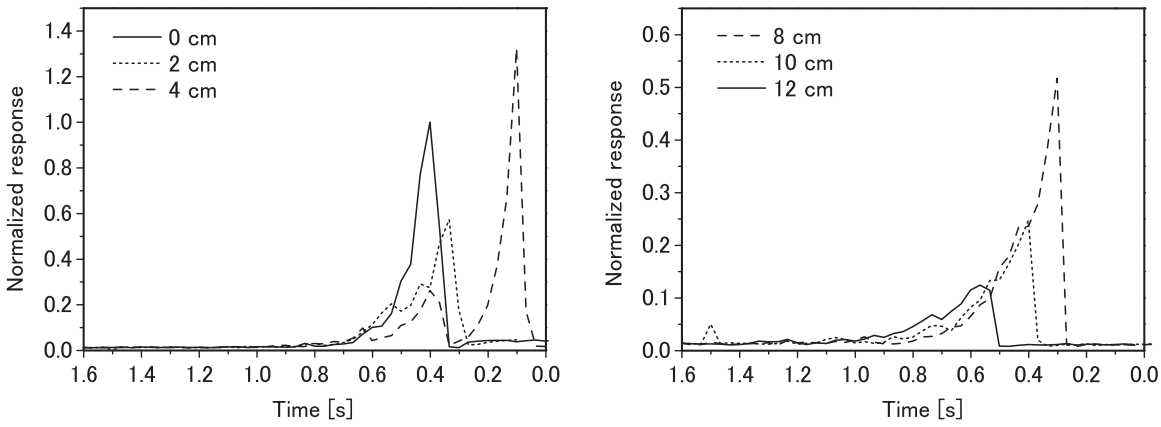


図 5.9: (a) 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．衝突までの時間を横軸として，3 つの物体接近速度に対する出力を示す．点線は接近速度 0.5 m/s に対する応答を，破線は接近速度 1 m/s に対する応答を，実線は接近速度 1.5 m/s に対する応答を，それぞれ示す．応答は，接近速度 1 m/s に対する応答の最大値によって正規化されている．(b) 接近速度とシステムの応答開始時間との関係．接近の速度を横軸にとり，モデルの応答開始から衝突までの時間をプロットしてある．点線はモデル回路受光面上での輪郭速度が 2.3 pixels/frame (速度 1 m/s の物体に対する応答開始時における輪郭速度) となる時点を示している．



(a) (b)

図 5.10: 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの，接近に対するシステムの応答．物体がシステムの側方を通過するまでの時間を横軸として，レンズ光軸–接近物体中心間の距離を変化させた際の出力を示す．応答は，正面からの接近に対する応答の最大値によって正規化されている．(a) 物体の一部がレンズ光軸上にある場合の応答．実線は正面からの接近に対する応答を，点線は物体中心がレンズ光軸から 2 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，破線は 4 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，それぞれ示す．(b) 物体がレンズ光軸上から外れている場合の応答．波線は物体中心がレンズ光軸から 8 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，点線は 10 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，実線は 12 cm 離れた位置からの接近に対する応答を，それぞれ示す．

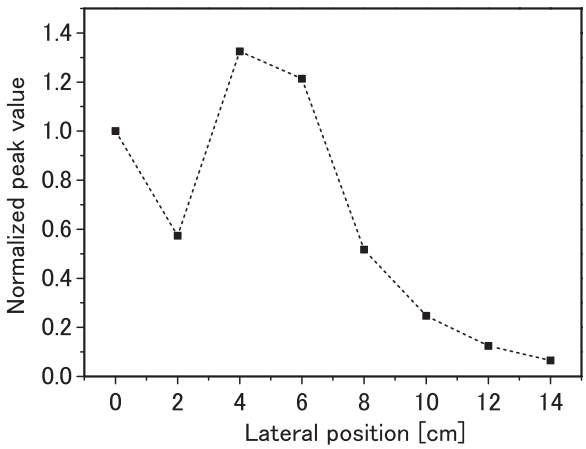


図 5.11: 物体中心がレンズ光軸から外れた位置からの接近に対するシステムの応答のピーク値．横軸はレンズ光軸–接近物体中心間の距離であり，値は正面からの接近に対する応答のピーク値によって正規化されている．

るにつれて，応答のピーク値が減少することが確認できる．

5.4 考察

5.4.1 並列階層処理の利点

第一章で述べたように，昆虫における視覚情報は，網膜で取得された後，ラミナ，メダラ，ロビュラ複合体へと並列階層的に処理が行われていく (図 5.12(a))．最も入力に近いラミナから出力される情報は，トランジェント情報 (transient image) や輪郭強調情報 (edge emphasized image) 等の抽象的・汎用的なものであるが，メダラ，ロビュラへと処理が進むにつれ，情報は用途が特定され，移動方向情報 (motion direction) や移動速度情報 (motion velocity) といった，具体的なものになっていく．ロビュラ複合体では，前段で抽出された基礎的な特徴情報を統合して，衝突回避，追跡，着地といった様々な運動に必要な信号が生成される．

従来のアナログ模倣チップ は，特定の行動 (衝突回避等) への関与が確認されている神経回路のみを回路化する (図 5.12(b))．全ての演算がアナログ的に瞬時に行われるため，特定の用途に用いる限りにおいては，サイズの観点からも消費電力の観点からも，最も効率の良い実装方法と言える．しかしながら，全ての処理が終了した情報のみが出力されるため，別の情報を抽出するためには他のセンサが別途必要となってしまう．

一方，本研究で開発したシステムは，用途がまだ特定されていない汎用的な情報であるトランジェント情報や，平滑化情報のみを aVLSI 回路によって抽出している (図 5.12(c))．後段の FPGA では，aVLSI から抽出された情報を元に，衝突検知機能を実装したが，これは抽出された情報から実現できる機能の一部に過ぎない．本研究は，衝突回避のための視覚システムを構築することが目的であるため，視覚制御ナビゲーション等の他の機能については触れていないが，FPGA の容量の許す限り多機能化が可能である．本章のシステムで必要とされた FPGA 内の等価ゲート数は約 4 万であるが，一般に普及している FPGA の等価ゲート数は 100 万を越えており，ナビゲーションや追跡等，多くの機能を付加する余地は十分に残っている．この汎用性は，ビルトインのアナログ回路では実現出来ない．

以上のように，計算の効率と汎用性を両立させるためには，アナログとディジタルを混在させることが有効である．どの様な処理をアナログで行うべきかは，次節で検討する．

5.4.2 アナログ演算とディジタル演算の適性

アナログ・ディジタル混在型システムでは，アナログ演算とディジタル演算における，空間及び時間フィルタ処理の得手不得手を考慮に入れつつ設計を行う事が重要である．第一章で述べたとおり，ディジタル演算における空間フィルタ処理は加重マトリクスを用いた大量の積和演算を必要とする．このため，広い空間フィルタ処理を一

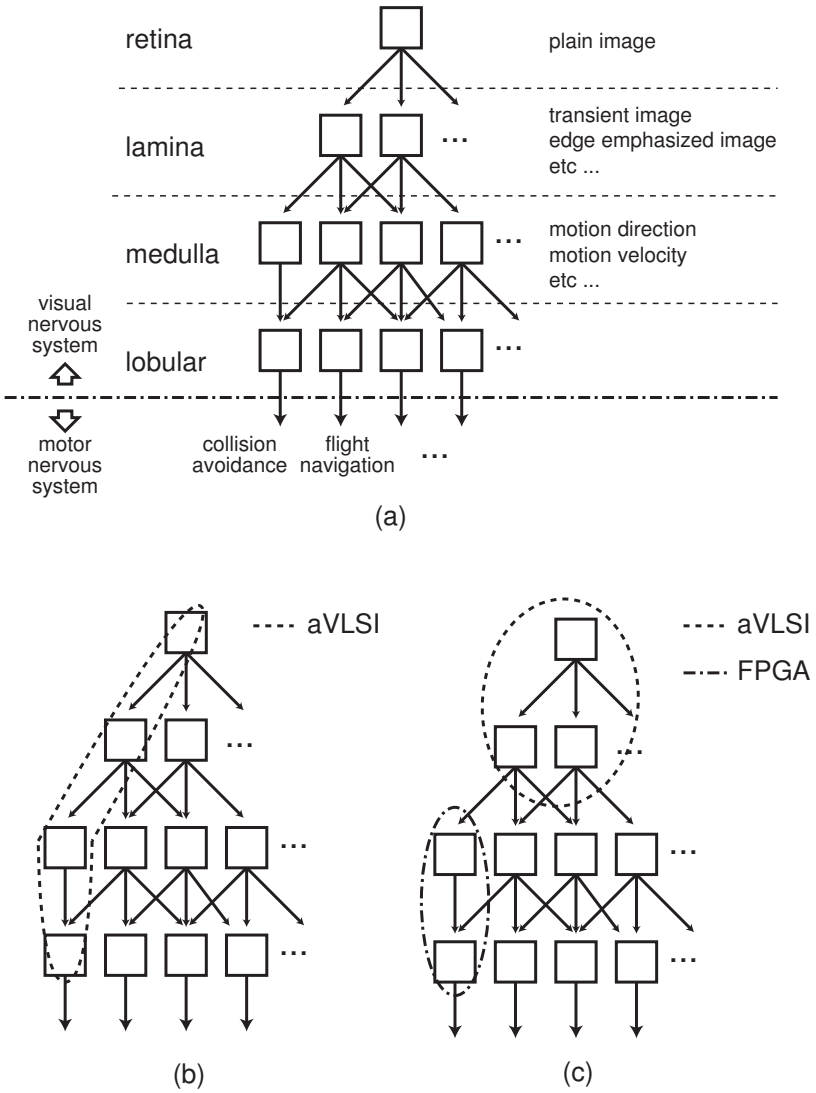


図 5.12: (a) 昆虫における並列階層処理の概念図．各ブロックは特定の視覚情報処理を行う神経細胞，もしくは神経細胞群とする．網膜 (retina) で取得されたプレーンな視覚情報は，ラミナ，メダラ，ロビュラへと 3 層に渡って並列階層的に処理が進められていく．最も入力に近いラミナから出力される情報は抽象的・汎用的であるが，メダラ，ロビュラへと処理が進むにつれ，情報は用途が特定された具体的なものになっていく．(b) アナログ回路のみで生体模倣をする場合の概念図．特定の行動 (衝突回避等) への関与が確認されている神経回路のみを aVLSI 回路化する．(c) アナログ・ディジタル混在型システムによる生体模倣の概念図．多くの機能に関わる，初期の視覚情報処理のみを aVLSI 回路化する．後段のプログラマブルなディジタル回路では，柔軟に機能の追加を行うことが出来る．

度行う毎に，ディジタル演算の計算コストは大幅に上昇する．これに対し，空間的対称性を持ったフィルタであれば，アナログ回路を用いることで広い空間フィルタ処理も瞬時に行うことが出来る．例えば，本研究のように抵抗回路網を用いることにより，周囲 10 画素以上にも影響が及ぶような巨大な空間フィルタを，電流の拡散時間のみで実現することが出来る．このため，広い空間フィルタ処理は，アナログで行うことが好ましいと考えられる．

一方で，長い時定数を持った時間フィルタ処理は，アナログ演算には不向きである．例えば，第 3 章で提案した電子回路モデルをそのままアナログ集積回路化することを考えた場合，RC 回路によって実用的な遅延時間を得るためには，非常に大きな面積が必要となってしまう．このため，本研究ではメモリを用いて遅延を実現したが，メモリを構成する場合，アナログであれば長時間の劣化は免れないが，ディジタルであれば長時間，多くのデータを劣化なく記録しておくことが出来る．このため，長い時定数を持った時間フィルタ処理は，ディジタルで行うことが好ましいと考えられる．

以上のように，アナログ演算とディジタル演算における，時空間フィルタの適性の観点からも，アナログとディジタルを混在させることの意義は大きい．本システムは，適性通りに処理が行われており，効率のよい視覚情報処理が実現されていると考えられる．

5.5 結言

LGMD の計算原理を模倣した衝突検知システムを，アナログ・ディジタル混在型ハードウェアに実装した．実装システムはシミュレーション動画を用いて評価を行い，至近距離物体への選択的応答を示すことを確認した．接近物体への応答特性は，電子回路モデル同様，側抑制に用いる時空間フィルタによって制御できることを確認した．

側抑制に求められる広い空間フィルタは，アナログ抵抗回路網により瞬時に実現される．ディジタル演算が苦手とする空間フィルタがフロントエンドでなされているため，FPGA における計算コスト及び回路規模は抑えられた．このため，他の機能を付加する余地が十分に残されており，視覚情報を用いる利点を生かした，多機能な視覚システムの実現が期待できる．

参考文献

[1] F. C. Rind and D. I. Bramwell, “Neural network based on the input organization of an identified neuron signaling impending collision,” J. Neurophysiol., vol.75, no.3, pp.967–985, Mar. 1996.

[2] R. Takami, K. Shimonomura, S. Kameda, and T. Yagi, “A novel pre-processing vision system employing neuromorphic 100x100 pixel silicon retina,” Proc. of the 2005 IEEE ISCAS, pp.2771–2774, Kobe, Japan, May 2005.

[3] H. Okuno and T. Yagi, “Bio-inspired real-time robot vision for collision avoidance,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.1, pp.68–74, Feb. 2008.

第6章　衝突検知システムの実環境応用

6.1　緒言

本研究では，これまでLGMD [1] の計算原理を模倣した衝突検知システムの評価を，LCD に動画を提示することによって行ってきた．しかしながら，これまでの評価環境では，物体の理想的な運動のみをシミュレートしており，実環境での動作で起こりうる外乱については想定されていない．実環境で安定的に動作させるためには，外乱の影響を考察する必要がある．

衝突検知システムが求められる場面は多様にあるが，特に実時間演算が求められる場面として，車載システムが挙げられる．車載応用では，実時間性だけでなく，小型，低消費電力であることも求められるため，本システムの利点が生きる応用先と言える．そこで，車載シーンを縮小して単純化した，図 6.1 のような環境を構成し，システムの応答を検証した [2].

本章では，まずシステムの実環境での応答とその問題点を説明し，次に実環境での安定動作を目指して行った改良と，その結果について述べる．

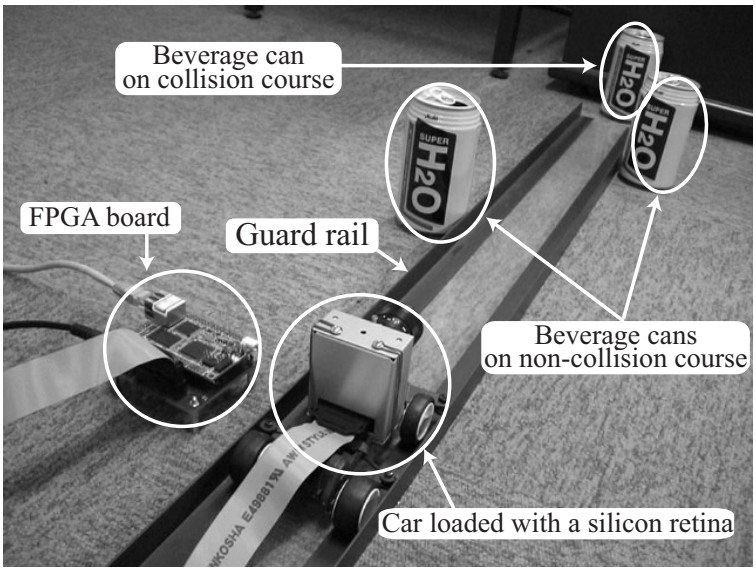


図 6.1: システムの実環境応答試験環境．モータ駆動の小型模型自動車にシリコン網膜を搭載し，前方に置かれた複数の缶に向かって前進させる．缶は，衝突経路外に 2 つ，衝突経路上に 1 つ置かれている．缶の直径は約 7 cm であり，衝突経路外に置かれた缶の中心とレンズ光軸間の距離は約 8 cm である．つまり，レンズ光軸から缶の光軸側の一端までの距離は約 4.5 cm である．

6.2　実環境におけるシステムの応答と解析

6.2.1　システムの応答

第 5 章で述べたアナログ・ディジタル混在型衝突検知システム [3] を小型模型自動車に搭載し，実環境での応答を検証した．シリコン網膜 [4] のサンプリング時間は 33 ms とした．また，側抑制の空間フィルタサイズを調整する抵抗回路網のゲート電圧 V_{rs2}(図 4.2(b) 参照) は 400 mV とし (この時の空間特性は図 5.6(b) 参照)，側抑制の遅延時間は 66 ms とした．

図 6.2 に，図 6.1 の環境において自動車を前進させた際のシステムの応答を示す．システムの応答は，動画を用いた実験と同様，衝突経路の物体直前で急激な増加を示してはいるものの，衝突直前以外でも大きく変動している．衝突の警告を発するためには，これらの変動と衝突物体への応答を区別する必要がある．

上記の変動にはいくつかの原因が考えられる．衝突経路外に置かれた物体もその一つである．しかしながら，レンズ光軸から衝突経路外の物体までの距離は約 4.5 cm であり，この距離はほぼ図 5.11(b) の 10 cm のプロットに対応することから，これらが大きなノイズ源になるとは考えにくい．

変動的応答の最も有力な要因は，システム自身の振動である．ロボットや自動車は移動時に多少なりとも振動を起こすが，かすかな振動であっても図 6.3 に示すような視野全体への強い応答を引き起こす．このように突然現れる輪郭移動には側抑制が有効に機能しないため，図 6.2 に示されているような変動的応答を引き起こすと考えられる．以下では，実環境における変動的応答の，より詳細な解析について述べる．

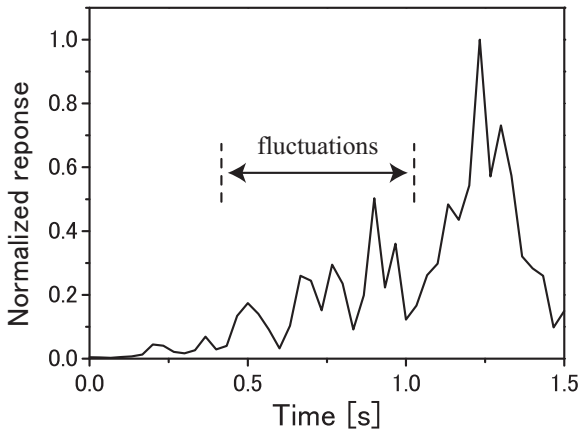
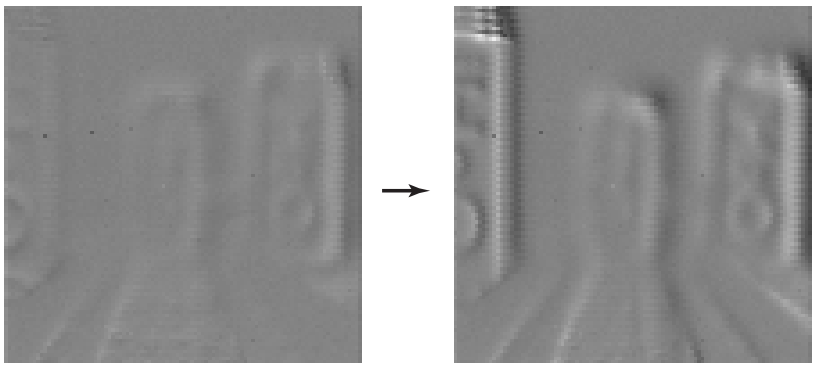


図 6.2: 図 6.1 に示す環境において自動車を前進させた際のシステムの応答．衝突物体がまだ遠方にある時点から，システムは大きく変動する応答を示している．

6.2.2　変動的応答の解析

実環境における変動的応答の要因を解析するため，物体の輪郭位置とその移動に伴うシステムの応答強度を詳細に検証した．図 6.1 の環境内の缶を白い紙で覆って無地



(a) (b)

図 6.3: 連続 2 フレームのシリコン網膜からのフレーム間差分出力．この 2 フレームの間に模型自動車が振動し，(b) では視野全体が強く反応している．

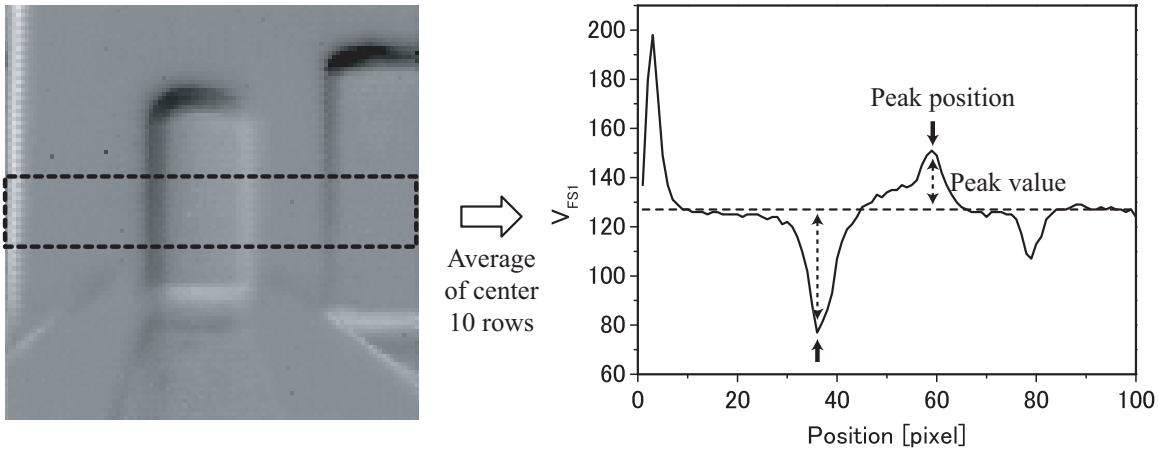
とする事により，物体輪郭のみに注目した．輪郭位置と応答強度は，シリコン網膜から得られるフレーム間差分出力 (V_{FS1}) の水平中央 10 ラインの平均値を用いて評価した (図 6.4).

図 6.5 に，検証結果を示す．(a) はシステムの応答を示し，(b)(c) は衝突物体の左右の輪郭によって引き起こされる V_{FS1} のピーク位置，ピーク値をそれぞれ示す．(a) のアルファベットで示した点 (変動的応答の極大値) は，(c) の同一のアルファベットで示した点に対応する．

図 6.5(b) より，試行中の輪郭位置は全体としては安定的に移動しており，自己振動の影響は 1 画素程度の小さなものであることが確認できる．一方で (c) より，自己振動のために V_{FS1} のピーク値が正負に大きく変動しており，またこの振動がシステム出力の変動を引き起こしていることが分かる．この自己振動によるノイズは，抑制が有効に機能しない場合に大きくなる (図中 A,B,C,E)．図 (c) から見られるとおり，これらの点では，抑制信号として用いられる 2 フレーム過去の値が非常に小さな値となっている．例えば，A で示された点の 2 フレーム前にある a で示された点では，値はほぼ 0 である．B,C,E に対しても状況は同様である．

D で示されたピークは，非衝突物体の輪郭の影響である．非衝突物体の輪郭速度は，最接近時でも 2 画素程度であり，本来応答への影響は小さいことが予期されるが，D の時刻では自己振動と重なることにより大きな値を示した．

以上の結果より，自己振動による像の移動は 1 画素程度の非常に小さなものであること，及びこの微小な移動によって引き起こされる応答の増減が変動的応答の要因になっていることが確認できた．この問題点を克服するために，いくつかの改良を加えた．



(a) (b)

図 6.4: 変動的応答要因の解析に利用した空間特性．(a) シリコン網膜から得られたフレーム間差分出力 (V_{FS1})．(b)(a) の水平中央 10 ラインの平均値．波線は画面全体の平均値を示す．この空間特性を利用して，衝突物体両端の輪郭位置 (Peak position) の移動と，それに伴う応答のピーク値 (Peak value) を検証した．

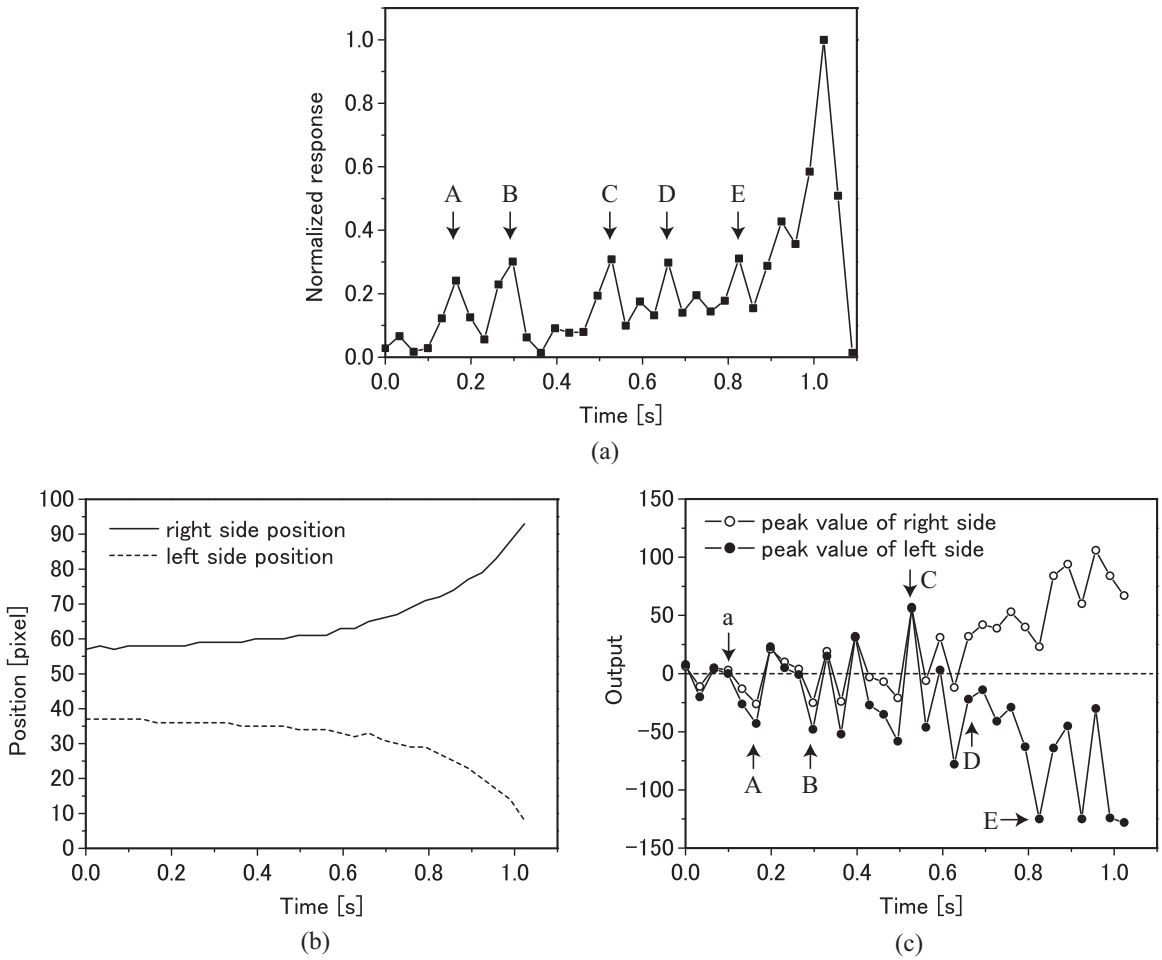


図 6.5: 図 6.1 に示す環境において自動車を前進させた際のシステムの応答．缶は無地とした．(a) システムの応答．各点が 1 フレームの応答を示す．アルファベットで示した点 (変動的応答の極大値) は，(c) の同一のアルファベットで示した点に対応する．(b) 衝突物体の左右の輪郭によって引き起こされる V_{FS1} のピーク位置 (図 6.4(b) の Peak position)．実線は右の輪郭によるピーク位置を，波線は左の輪郭によるピーク位置を，それぞれ示す．(c) 衝突物体の左右の輪郭によって引き起こされる V_{FS1} のピーク値 (図 6.4(b) の Peak value)．右向きの移動を正とした．白丸は右の輪郭によるピーク値を，黒丸は左の輪郭によるピーク値を，それぞれ示す．

6.3 実環境応用のための改良

6.3.1 輪郭速度検出アルゴリズム

図 6.6 に，第 5 章で述べたシステムにおける信号 E と I の空間特性を示す．従来のアルゴリズムは，以下の式に従って，輪郭速度を評価していた．

$$S(k,t) = E(k,t) - I(k,t - N\Delta t) \tag{6.1}$$

ここで，k は画素位置を，t は信号が取得された時刻を，Δt はサンプリング間隔を，それぞれ表す．図 6.6 に見られる通り，この方式は N フレーム過去に取得された信号 I の空間的減衰スロープを利用して輪郭速度を評価するものである．しかしながら，前節でも述べたように，この E と I は異なるフレームで取得されたものであるため，自己振動等の影響によりそれぞれ異なるタイミングで増減を行う．これがシステムの変動的応答の要因となっていた．

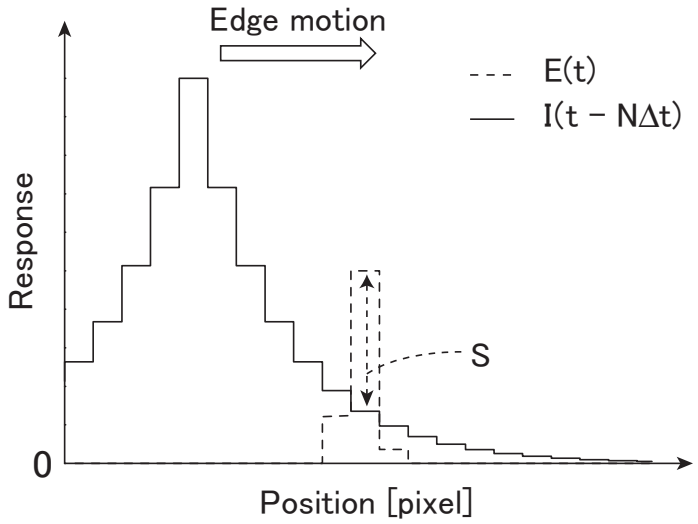


図 6.6: 信号 E と I の空間特性．前章までのアルゴリズムで計算される S を図中に示す．

本章で述べる改良アルゴリズムでは，以下の式によって輪郭速度を評価する．

$$U(k,t) = I(k-d, t-\Delta t) - I(k, t-\Delta t) \tag{6.2}$$

このアルゴリズムでは，d 画素離れた 2 点の信号 I の差分によって輪郭速度を評価する．このアルゴリズムで計算される U を図 6.7 に示す．同一フレームの信号間の差分であるため，上記のような振動は抑制される．さらに，信号 I の片側の減衰スロープを利用する従来方式と異なり，ピークを挟んだ両側のスロープを活用するため，高い S/N 比が得られる．このアルゴリズムでは d pixels/frame までの輪郭速度を測定できる．式 (6.2) は 1 フレーム過去に検出された輪郭の近傍に存在する輪郭についてのみ

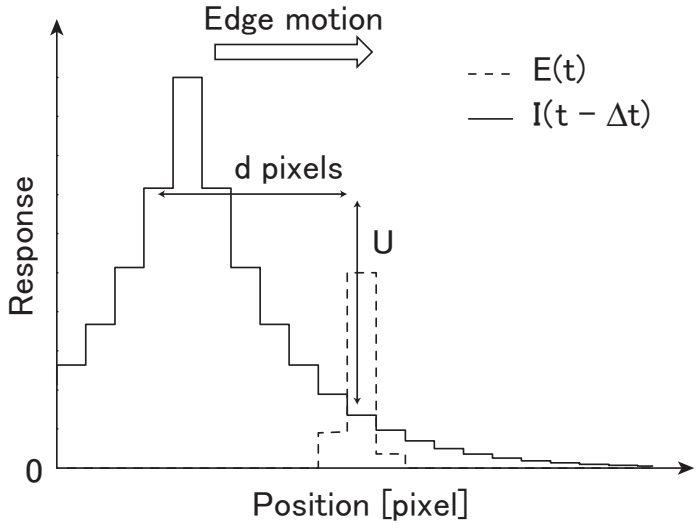


図 6.7: 信号 E と I の空間特性．改良アルゴリズムで計算される U を図中に示す．

計算される．この条件は以下の式で表される．

$$E(k,t) \geq \max(E(k-1,t), E(k+1,t)) \tag{6.3}$$

$$E(k,t) > Thresh1 \tag{6.4}$$

$$I(k,t-\Delta t) > Thresh2 \tag{6.5}$$

式 (6.3)(6.4) は現時刻における輪郭の位置を示し，式 (6.5) は 1 フレーム過去の輪郭位置の近傍であることを示す．

更に，改良アルゴリズムでは，輪郭位置における I の傾きから運動方向の検出も行う．傾きは隣接画素の値との大小関係を比較することにより計算する．式 (6.2) において，どの方向に d 画素離れた値との差を計算するのかも，この運動方向をもとに決定する．

I のピーク位置と U の関係を図 6.8 に示す．この U を算出するための I の空間特性は，第 3 章と同様にシミュレーション上の抵抗回路網により計算した．ここで，d は 5 画素としており，5 画素まで単調に増加する特性が得られていることが分かる．

また，フレーム間差分出力はコントラストによって強度が変化するため，U の値もコントラストに依存する．この効果をキャンセルするために U を以下のように調整した．

$$U'(k,t) = \frac{U(k,t)}{\max(I(k-d,t-\Delta t), I(k,t-\Delta t))} \tag{6.6}$$

$max(I(k–d,t–\Delta t), I(k,t–\Delta t))$ で割ることにより，コントラスト依存性は取り除かれる．I のピーク位置と U' の関係を図 6.9 に示す．この U' を算出するための I の空間特性は，第 3 章と同様にシミュレーション上の抵抗回路網により計算した．図 6.8 の U に比べて線形性は落ちているが，この特性からでも輪郭速度は一意に算出できる．

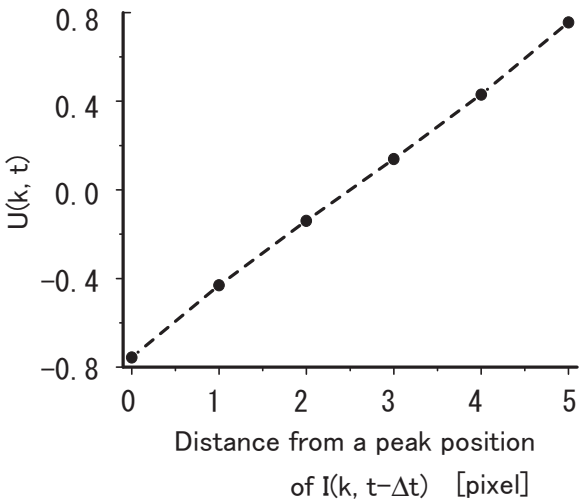


図 6.8: 信号 I のピーク位置からの距離と U の関係.

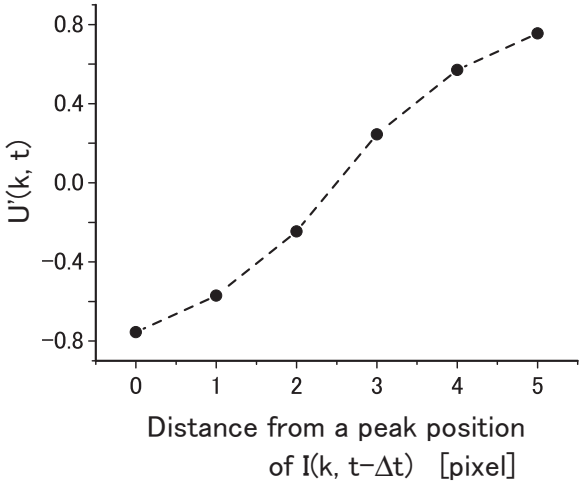


図 6.9: 信号 I のピーク位置からの距離と U' の関係.

改良アルゴリズムにおける各画素の出力 S_{revise} は，以下の式で与えられる.

$$S_{\mathrm{revise}}(k,t) = \begin{cases} U'(k,t) - U_{\min} & (U'(k,t) \geq U_{\min}) \\ 0 & (U'(k,t) < U_{\min}) \end{cases} \tag{6.7}$$

$U_{\min}$ は検出すべき最低の輪郭速度を決定する値であり，図 6.9 の特性を参考に調整する．例えば，2 pixels/frame 以上の速度で移動する輪郭のみを検出したい場合，図 6.9 よりこの輪郭速度に対応する U' の値は-0.2 であるため，$U_{\min}$=-0.2 とすることで，所望の速度以上で移動する輪郭のみを検出することが出来る．S_{revise} の全画素総和が，システムの最終出力となる.

6.3.2　異方性を持った速度検出

従来のアルゴリズムは，輝度変化のあった全ての画素の値を全て足し合わせていた．このため，自己振動によって現れる視野全体の輪郭に強く応答した．振動による影響を軽減するため，改良アルゴリズムでは図 6.10 の矢印で示された方向に移動する輪郭のみを計算対象とする．接近物体の輪郭は，図中に示されているように画面中央から周囲へと移動するため，検出する輪郭移動をこの方向に限定することにより，接近物体への応答のみを強調させることが出来る．

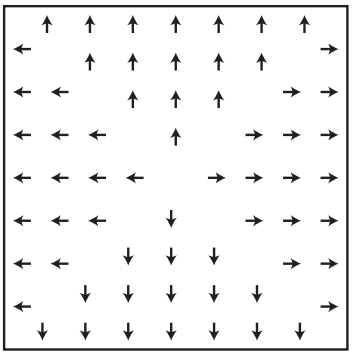


図 6.10: システムが計算する運動方向．正方形の外枠はシステムの視野を示す．接近物以外への反応を抑制するために，矢印で示された画面中央から周囲への拡大的な動きのみを計算する．

6.4　改良アルゴリズムの実装

実環境応用のために改良したアルゴリズムを，前章と同様のハードウェアに実装した．実装システムの模式図を図 6.11 に示す．信号 I を得るための空間フィルタは前章と同様，シリコン網膜の抵抗回路網を利用した．制御信号も前章の図 5.2 に示すものを利用したため，シリコン網膜内の処理は前章と同様である．

シリコン網膜から出力される 2 種類の信号は，A/D 変換された後，FPGA に入力される．これらの信号は，まず 1 フレーム分の信号の平均値を基準として整流される．2 層目の抵抗回路網により空間フィルタリングを受けた信号の整流値 $I(k,t)$ は，一旦 RAM に記録され 1 フレーム分の遅延を受ける．RAM による遅延後の信号 $I(k,t-\Delta t)$ と，d 画素離れた位置における遅延後の信号 $I(k-d,t-\Delta t)$ を用いて，式 (6.6) から輪郭速度が計算される．但し，この計算は，式 (6.3)(6.4)(6.5) が満たされる画素，即ち現フレームの輪郭位置であり，かつ 1 フレーム過去の輪郭位置の近傍についてのみ行われる．本実装では，d は 5 画素とした．ここで得られた $U'(k,t)$ を用いて，式 (6.7) より各画素の出力値 $S_{\mathrm{revise}}(k,t)$ を得る．この値の空間総和が，本システムの最終出力となる．

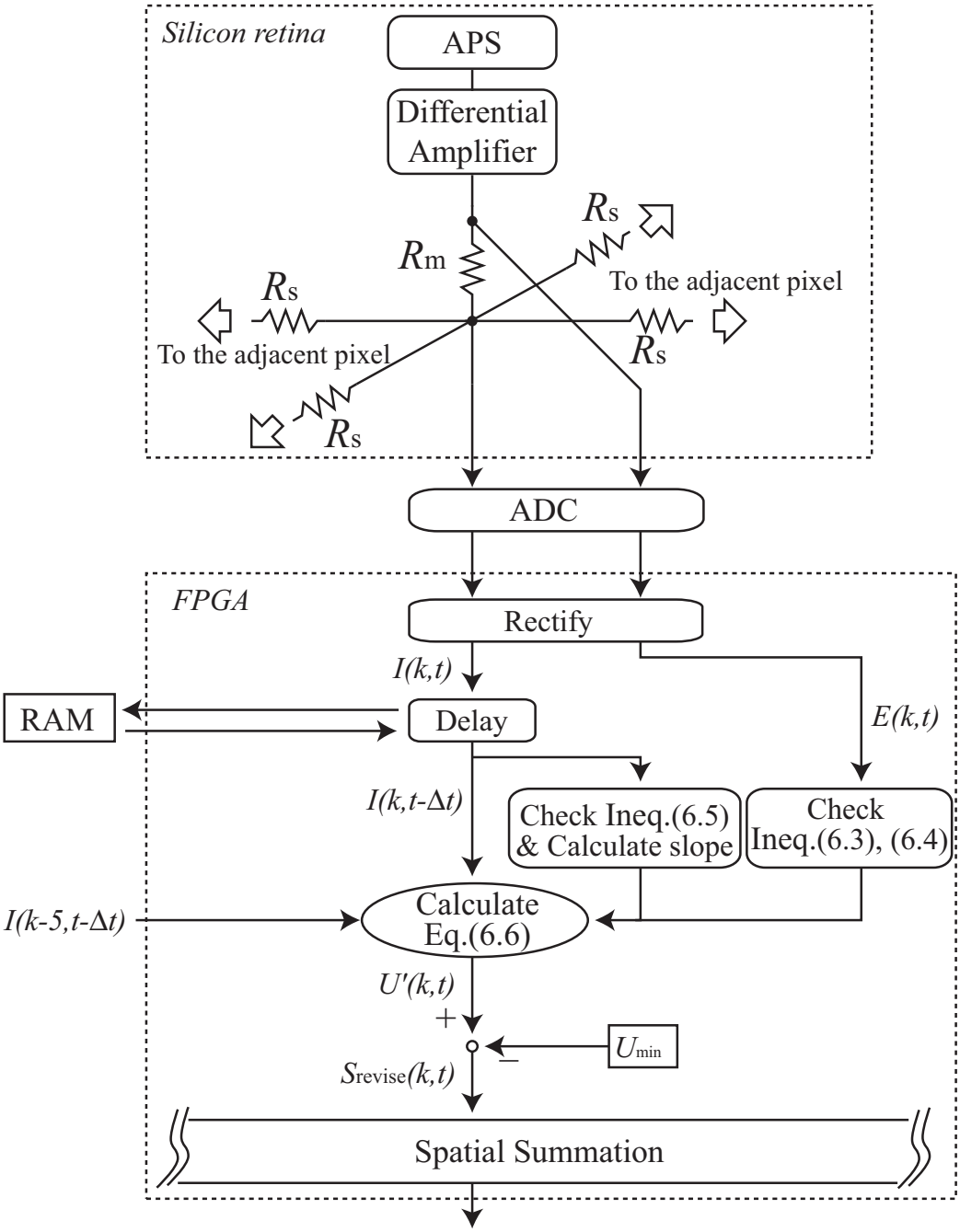


図 6.11: システム構成の模式図 (1 画素分).

6.5　改良アルゴリズムの評価

第 4 章の図 4.11 と同様の環境を用いて，物体の動きを模擬した動画を LCD (liquid crystal display) に表示し，これをシリコン網膜に提示することにより本実装システムの出力を検証した．レンズは PENTAX B2514D (焦点距離 25 mm，F/1.4) を用い，シリコン網膜の視野と LCD 上の動画領域が一致するようにシステムを配置した．シリコン網膜のサンプリング時間は 33 ms とした．

図 6.12(a) に示す白黒輪郭が横へ移動する動画を利用し，輪郭の移動速度を変化させてシリコン網膜に提示することで，速度検出アルゴリズムを検証した．黒の領域の輝度は 5 cd/m^2 とし，白の領域の輝度を 2 段階に変化させた．図 6.12(b) に輪郭速度と検出結果の関係を示す．丸印は中央水平 1 ラインで計算された速度出力の，連続 10 フレームの平均値を示し，エラーバーは標準偏差を示す．結果より，コントラスト変化に依存せずに輪郭速度が検出できていることが確認できる．前節の図 6.9 とスケールが異なるのは，FPGA 内の演算が 8 bit 整数を扱っているため，内部での数値 (U_{integer}) が以下のように表されているためである．

$$U_{\mathrm{integer}} = 100(U' + 1) \tag{6.8}$$

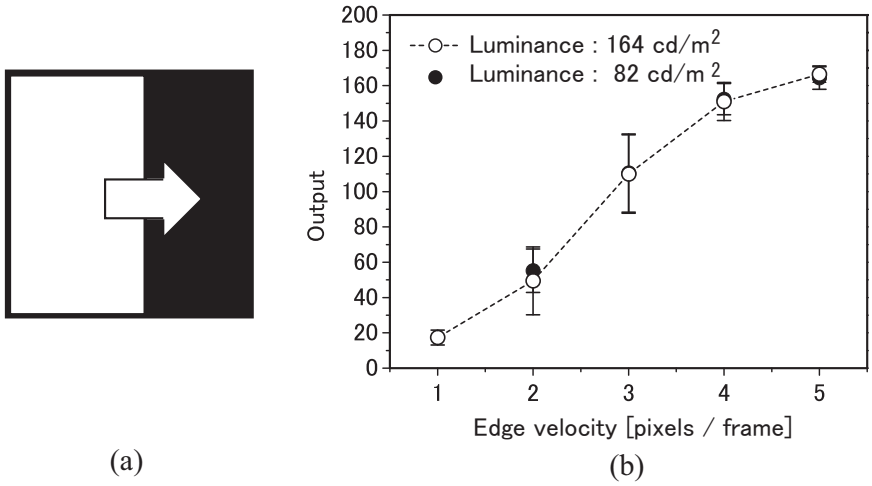


図 6.12: (a) 輪郭速度検出アルゴリズムを検証するために提示した動画．白黒輪郭が横方向へ移動する．黒の領域の輝度は 5 cd/m^2 とし，白の領域の輝度を 2 段階に変化させた．(b) 輪郭速度と検出結果の関係．丸印は中央水平 1 ラインで計算された速度出力の，連続 10 フレームの平均値を示し，エラーバーは標準偏差を示す．白丸は，(a) の白の領域の輝度を 164 cd/m^2 としたときの出力を，黒丸は，82 cd/m^2 としたときの出力を，それぞれ示す．

次に物体接近に対する改良システムの応答を確認するため，図 4.12(a) に示す動画をシリコン網膜に提示した．この時の応答を図 6.13 に示す．実線はシステムの応答を示し，破線はシリコン網膜上での輪郭速度を示す．検出する最低輪郭速度を定める

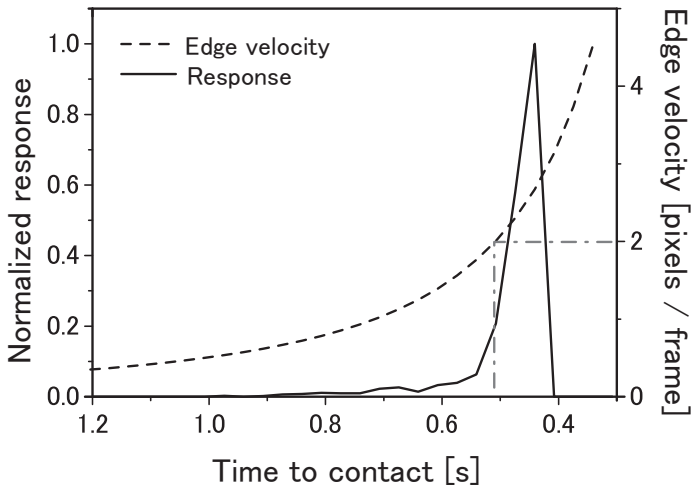


図 6.13: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．横軸は衝突までの時間を示す．実線はシステムの応答を，破線はシリコン網膜上での輪郭速度を示す．システムの応答は，輪郭速度が 2 pixels/frame を越えた直後に急激に増加している．システムの応答は，最大値で正規化されている．

U_{Min} の値は 80 に設定されている．この設定では 2 pixels/frame 以上で移動する輪郭のみを検出する．図 6.13 より，輪郭速度が 2 pixels/frame を越えた直後に，応答が急激に増加していることが分かる．

図 6.14 に，接近を模擬する動画を提示した際の，3 つの $U_{\min}$ に対するシステム応答を示す．$U_{\min}$ を 0 に設定した場合，僅かでも移動する輪郭が検出対象となり，25 に設定した場合，1 pixel/frame 以上で移動する輪郭のみが検出対象となり，80 に設定した場合，2 pixels/frame 以上で移動する輪郭のみが検出対象となる．$U_{\min}$ を増加させるにつれて，検出対象とする最低輪郭速度が上昇するため，応答がより急峻になっていることが分かる．

図 6.15 に，図 4.12(a) に示す動画において，中央から拡大する正方形の輝度を変化させた際のシステムの応答を示す．これによって，システムのコントラスト依存性を検証する．図 6.15(b) に示す従来のシステムの応答がコントラストに従って大きく変化しているのに対し，図 6.15(a) に示す改良システムの応答は，ほとんどコントラストに依存していないことが分かる．

次に，実環境試験で特に大きな問題となった，自己振動の影響を検証した．用いた動画を図 6.16 に示す．この動画では，接近を模擬する動画と同様の正方形の拡大に，画面全体の上下左右への振動が重畳される．振動のタイミングは図 (b) の通りである．振動の振幅は，シリコン網膜上で 1〜2 画素程度であり，実環境実験で発生した振幅を模擬している．

この動画を提示した際の，システムの応答を図 6.17 に示す．破線で示された従来システムの応答が振動の影響を大きく受けているのに対し，改良システムの応答は，振動の影響をほとんど受けていないことが確認できる．

最後に，改良システムの実環境での応答を図 6.1 の環境を用いて検証した．図 6.18

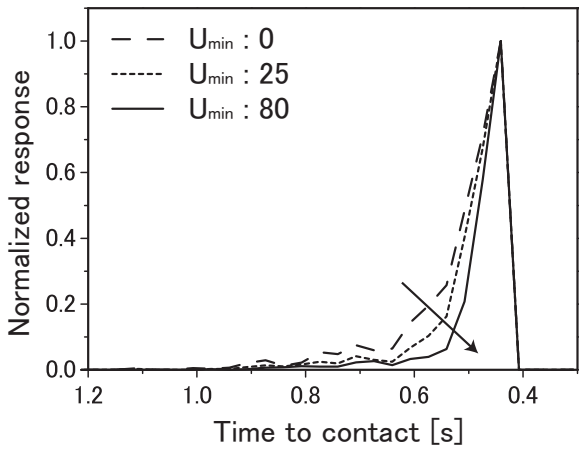


図 6.14: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．横軸は衝突までの時間を示す．検出最低速度を定める変数 $U_{\min}$ を変化させた際の応答の比較．破線は $U_{\min}$ を 0 に設定した際の出力を，点線は 25 に設定した際の応答を，実線は 80 に設定した際の応答を，それぞれ示す．システムの応答はそれぞれの最大値で正規化されている．

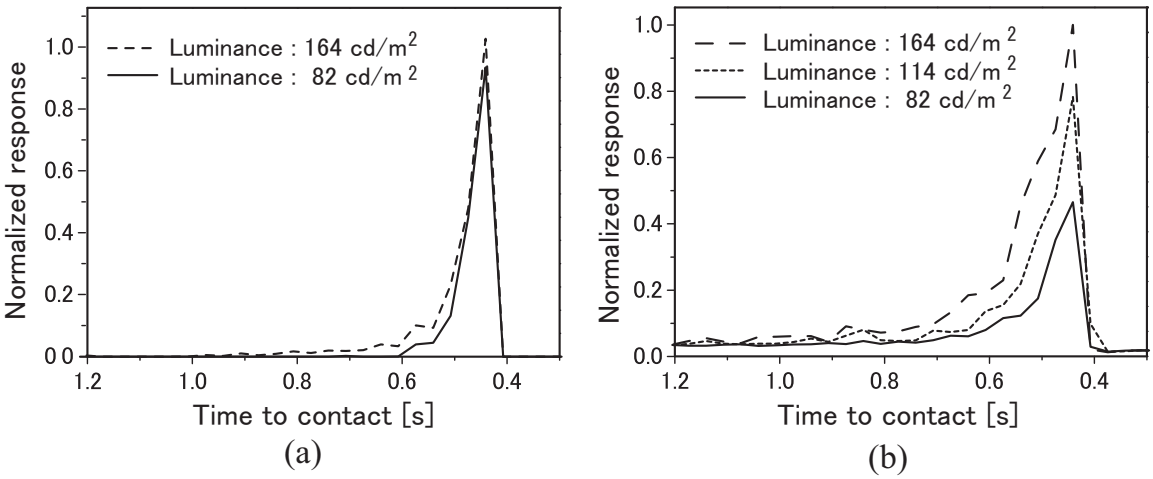


図 6.15: 接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．物体–背景間のコントラストを変化させた際の応答の比較．背景の輝度を 5 cd/m^2 とし，物体の輝度を変化させた．(a) 本章で改良を行ったシステムの応答．(b) 前章で構成したシステムの応答．

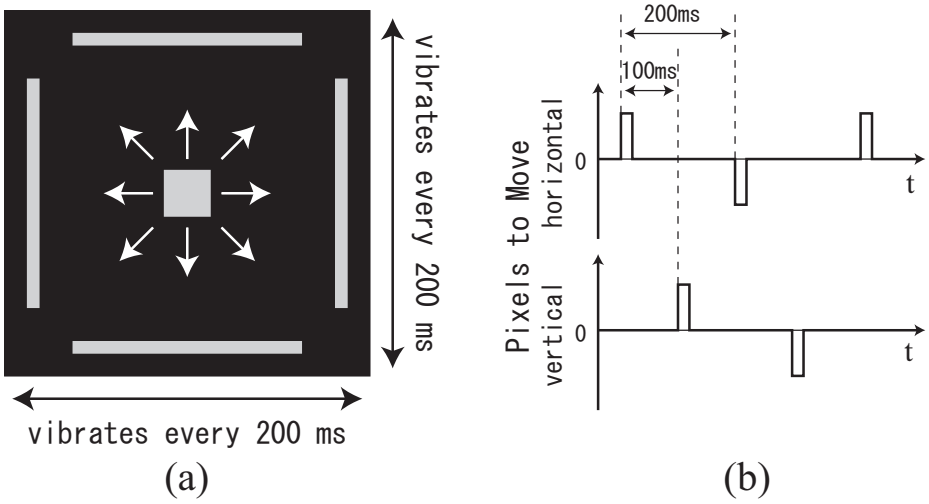


図 6.16: (a) 自己振動を伴う環境での物体接近を模擬する動画．中央にある正方形の拡大に，画面全体の上下左右への振動が重畳される．上下左右に配置された長方形は，背景物体を模擬している．(b) 上下左右への振動のタイミング.

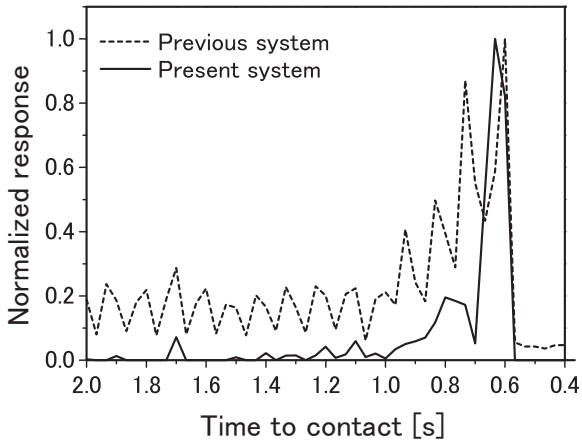


図 6.17: 自己振動を伴う環境での接近を模擬した動画を提示した際のシステムの応答．破線は前章で構成したシステムの応答を示し，実線は本章で構成したシステムの応答を示す.

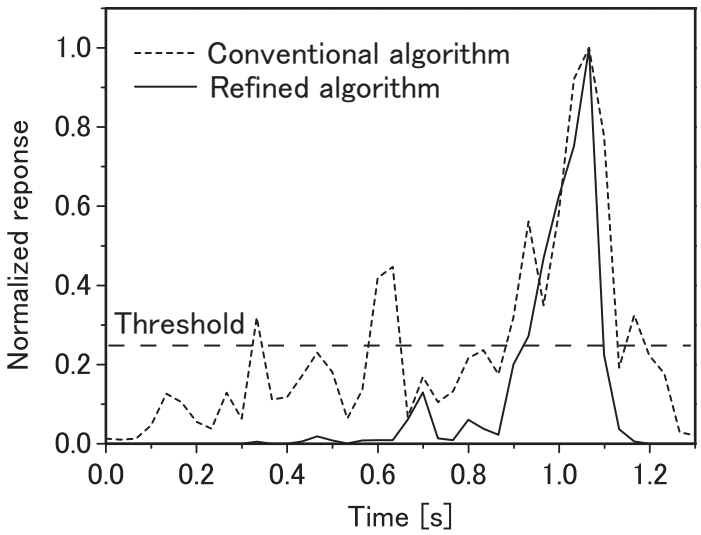


図 6.18: 図 6.1 に示す環境において自動車を前進させた際の改良システムの応答．点線は従来のアルゴリズムによる応答を，実線は改良アルゴリズムによる応答を，それぞれ示す．

に結果を示す．FPGA には，従来のアルゴリズムと改良後のアルゴリズムの双方を実装しているため，同一試行に対する応答を比較することが出来る．従来のアルゴリズムによる応答が大きく変動しているのに対し，改良アルゴリズムによる応答は，衝突直前でのみ急峻に増加していることが分かる．

また，模型自動車にブレーキを設置し，システムの応答が閾値以上になった時に動作するよう制御した．この閾値は，試験的に接近模擬動画に対する応答のピーク値の 25%とした．図 6.18 からも確認できるとおり，応答は衝突経路の物体に対する急激な増加ではじめて閾値を越えており，模型自動車は衝突直前で停止した．

6.6 考察

6.6.1 焦点

本研究では，単焦点レンズを用いているため，実環境試験では焦点の位置がシステムの応答に影響を与えうる．本実験では便宜上，障害物全体を視野内に捉えられる最短の距離である 40 cm に焦点を設定した．

図 6.19 に，LCD 上に提示した輪郭の移動を，異なる距離からシリコン網膜で捉えた時の出力を示す．この時，焦点はレンズから 40 cm の位置に設定されており，図 6.19(a) はシリコン網膜–LCD 間距離を 40 cm とした時の出力を，図 6.19(b) はシリコン網膜–LCD 間距離を 80 cm とした時の出力を，それぞれ示す．レンズから物体までの距離が焦点の位置から離れるにつれて，フレーム間差分の出力強度は小さくなっていく．これに従い，式 (6.5) の制限から，まず低速度で移動する輪郭の速度が検出できなくなる．実際，図 6.19(b) の状況では 1 pixel/frame で移動する輪郭は検出できな

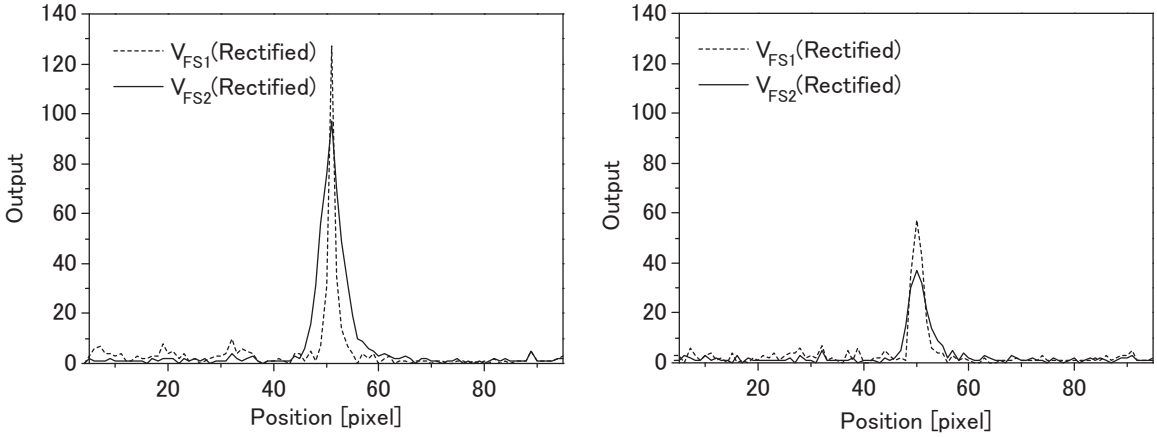


図 6.19: 焦点を 40 cm に設定し，LCD に白黒の輪郭移動を提示した際のシリコン網膜出力．点線は V_{FS1} の整流値を，実線は V_{FS2} の整流値を，それぞれ示す．(a) シリコン網膜–LCD 間距離を 40 cm としたときの出力．(b) シリコン網膜–LCD 間距離を 80 cm としたときの出力．

い．V_{FS2} の空間特性の対称性から，低速側と同様に高速側も検出感度が低下するように思えるが，高速で移動する輪郭に対しては V_{FS2} 自体が大きな値を取るため，感度はある程度維持される．

ここで，衝突検知システムとして実効上維持しなくてはならないのは，第 3 章で検討を行った $u_{\min}$ (検出すべき最低輪郭速度) への感度である．以上から，レンズの焦点は，衝突検知を想定する距離範囲において，$u_{\min}$ への感度を維持できるように調整する必要がある．物理的にこれが困難な場合は，焦点を動的に変化させる機能等が付加的に求められると考えられる．

6.6.2 生体模倣

衝突回避を始めとした様々な機能に対して，生体は実にシンプルで，かつ実用的な手法を提供してくれる．特に昆虫の神経系は，脊椎動物の神経系と比べると速さや経済性を重視した構造となっており，小型・低消費電力・実時間処理を必要とする機能においては，絶好の手本となる．

第 5 章では，バッタの視覚神経系の計算原理を，極力忠実にハードウェア化することによって効率的な衝突回避システムの実現を目指した．実装したシステムは，アナログとディジタル双方の利点を用いながら神経系の計算原理を再現し，衝突回避に適した出力を行うことがコンピュータシミュレーションによって確認された．しかしながら，計算の本質さえ把握すれば，昆虫の神経系で行われている計算を忠実に模倣する必要はない．むしろ工学素子の利点を生かした別の実現方法を取ることによって，神経系における計算の機能や能力を上回るシステムが実現される可能性もある．

本章のシステムは,「広い空間フィルタを活用して高速で移動する輪郭のみを抽出

し，高速で移動する輪郭の分量に従って衝突の危険性を評価する」というバッタの視覚神経系の計算の本質を踏襲しながらも，その実現方法は積極的にディジタル演算の利点を取り入れた．輪郭の移動速度は，広い空間フィルタを活用しつつ明示的に検出を行い，低速で移動する輪郭をキャンセルすることにより，ノイズの少ない応答が得られるようになった．また，バッタの視覚神経系では確認されていない輪郭の移動方向検出を行い，視野内を拡大する物体に強くフォーカスすることで，システム自身の振動に影響されにくい応答を行えるようになった．FPGA には，まだ十分に回路を追加する余地が残されており，更なる能力の向上や，機能の追加が可能である．

生体の視覚神経系の計算原理に発想を得たシンプルでスマートな計算を，アナログとディジタル双方の技術の利点を活用しながら実行することで，多くの情報を含んでいるという視覚情報を生かした多機能な視覚システムを構築することができる．本研究では，視覚を用いて実現できる機能の一つにフォーカスし，衝突回避機能のみを実現したが，この方向性の研究の高いポテンシャルを示すことができたと筆者は考えている．そして，この研究の方向の先には，視覚生物であるヒトの作った社会で，視覚情報をもとに柔軟に自律活動できるロボットが実現されていくことを筆者は信じている．

6.7 結言

LGMD の計算原理を模倣して実装した衝突検知システムを，小型模型自動車に搭載することにより，本システムの実環境での応答を検証した．実環境では，自己振動を始めとして，動画を用いたシミュレーションでは想定していなかった問題が認められた．実環境特有の問題への対策を施したシステムは，実環境でもノイズの少ない応答を示した．

参考文献

[1] F. C. Rind and D. I. Bramwell, “Neural network based on the input organization of an identified neuron signaling impending collision,” J. Neurophysiol., vol.75, no.3, pp.967–985, Mar. 1996.

[2] H. Okuno, T. Yagi, “A robot vision system for collision avoidance using a bio-inspired algorithm,” Lecture Notes in Computer Science, In press.

[3] H. Okuno and T. Yagi, ”Bio-inspired real-time robot vision for collision avoidance,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.1, pp.68–74, Feb. 2008.

[4] R. Takami, K. Shimonomura, S. Kameda, and T. Yagi, “A novel pre-processing vision system employing neuromorphic 100x100 pixel silicon retina,” Proc. of the 2005 IEEE ISCAS, pp.2771–2774, Kobe, Japan, May 2005.

第7章　結論

本研究では，視覚情報を用いた衝突検知システムを開発した．バッタの視覚神経系において，衝突回避行動を引き起こす神経細胞であるLGMDの計算原理に学んだ．実時間，小型，低消費電力，環境変化に頑強という昆虫視覚の持つ利点を生かすため，LGMDの計算原理をソフトウェアではなくハードウェアによる模倣を行った．

LGMDの計算原理を模倣したハードウェアの実現に向けて，この計算原理を模擬する電子回路モデルを考案した．ハードウェア化にとって大きな問題であった，莫大な数にのぼる接続を，抵抗回路網を用いて簡略化することにより，少数の回路素子からなる単純な画素回路を構成した．コンピュータシミュレーションを用いた電子回路モデルの検証からは，本モデルが至近距離物体への選択的応答を示すことが確認できた．

電子回路モデルをハードウェア実装するため，視覚情報を効率的に処理できるコンパクトなハードウェアを開発した．フロントエンドには，アナログ回路の利点を生かし，様々な時空間フィルタを瞬時に施すことができるシリコン網膜を用い，その後段には並列情報処理に適し，かつ多目的に扱えるFPGAを配した．

開発したアナログ・ディジタル混在型ハードウェアに，LGMDの計算原理を模倣した衝突検知システムを実装した．側抑制に求められる広い空間フィルタは，アナログ抵抗回路網により瞬時に実現される．ディジタル演算が苦手とする空間フィルタがフロントエンドでなされているため，FPGAにおける計算コスト及び回路規模は抑えられた．実装システムはシミュレーション動画を用いて評価を行い，至近距離物体への選択的応答を示すことを確認した．接近物体への応答特性は，電子回路モデル同様，側抑制に用いる時空間フィルタによって制御できることを確認した．

衝突検知システムを，小型模型自動車に搭載することにより，本システムの実環境での応答を検証した．実環境では，自己振動を始めとして，動画を用いたシミュレーションでは想定していなかった問題が認められた．実環境特有の問題への対策を施したシステムは，実環境でもノイズの少ない応答を示した．

以上，昆虫の視覚神経系の計算原理を，ハードウェアで模倣することにより，実時間，小型，低消費電力で実環境でも十分動作する衝突回避システムが開発できた．

本システムは瞬時に並列演算を行うアナログ回路の利点を活用しながらも，プログラマブルで多目的に扱えるディジタル回路の利点も合わせ持っている．昆虫の視覚情報処理の多くは，本システムが用いている光強度への一過性応答，及びその平滑化信号を用いて行われているため，他の機能を実現する構造をFPGAに実装することにより，衝突回避にとどまらない，多機能な視覚情報処理システムの実現が期待できる．

謝辞

本研究は大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻 八木哲也教授の御指導の下に行われたものであり，本研究を遂行するにあたり，終始懇切なる御指導と御鞭撻を賜りましたことに厚く御礼申し上げます.

本論文の作成にあたり，懇切なる御助言と御指導を頂きました大阪大学大学院工学研究科 谷口研二教授，尾崎雅則教授に厚く御礼申し上げます.

本論文の作成にあたり，貴重な御意見，御教示を頂きました大阪大学大学院工学研究科 伊藤利道教授，片山光浩教授，近藤正彦教授，杉野隆教授，栖原敏明教授，森勇介教授，森田清三教授に厚く御礼申し上げます.

本研究を遂行するにあたり，幾多の御指導と御意見を頂きました宋文杰教授 (熊本大学)，小山内実講師，亀田成司特任准教授 (広島大学) に厚く御礼申し上げます.

本研究を遂行するにあたり，日々懇切なる御助言と御意見を頂くと共に，様々な面で御協力を頂きました下ノ村和弘特任講師に深く感謝致します.

本研究を遂行するにあたり，幾多の御助言と御協力を頂くと共に，有意義な議論をして頂きました，井上恵介氏，長谷川潤氏をはじめとする八木研究室の皆様に深く感謝致します．また，事務面で多大なご支援を頂きました服部訓子女史，栄原晴子女史，竹川さくら女史，小寺昌子女史に深く感謝致します.

本研究の内容を英文公表するにあたり，有意義な御助言を頂いた Erik Granstedt 氏 (Princeton University)，Genie Moon 女史 (University of California, Los Angeles) に深く感謝致します.

最後に，学問に励む機会，環境をはじめ多くを与えて頂いた亡父と，長きに渡って学生生活を支えて頂いた母をはじめ家族の皆に，心より感謝致します.

研究業績

学術雑誌発表論文

1. H. Okuno, T. Yagi, “Bio-inspired real-time robot vision for collision avoidance,” Journal of Robotics and Mechatronics, vol.20, no.1, pp.68–74, Feb. 2008.

2. H. Okuno, T. Yagi, “A robot vision system for collision avoidance using a bio-inspired algorithm,” Lecture Notes in Computer Science, Springer, in press.

国際会議発表論文

1. H. Okuno, T. Yagi, “Real-time robot vision for collision avoidance inspired by neuronal circuits of insects,” Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), no.TuD8.1, pp.1302–1307, San Diego, CA, USA, Oct. 2007.

国際会議発表

1. H. Okuno, T. Yagi, “A neuromorphic system for detecting an approaching object inspired by insect vision,” SICE-ICASE International Joint Conference 2006, no.TA21-3, pp.572–575, Busan, Korea, Oct. 2006.

2. H. Okuno, T. Yagi, “Real-time robot vision for collision avoidance inspired by neuronal circuits of insects,” 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007), no.TuD8.1, pp.1302–1307, San Diego, CA, USA, Oct. 2007.

3. H. Okuno, T. Yagi, “A robot vision system for collision avoidance using a bio-inspired algorithm,” 14th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP 2007), no.WEC-4, pp.127, Kitakyushu, Japan, Nov. 2007.

4. H. Okuno, T. Yagi, “Real-time visual collision detection system using a bio-inspired algorithm,” 1st Global COE International Symposium “Electronic Devices Innovation” (EDIS 2008), no.O-7, pp.55–57, Osaka, Japan, Jan. 2008.

国内会議発表

1. 奥野弘嗣, 八木哲也, “昆虫視覚系の情報処理機構を模倣した接近物認識システム,” 信学技報, vol.105, no.335, pp.61–64, Oct. 2005.

2. 八木哲也，井上恵介，奥野弘嗣, “ロボットビジョンによるシネ表示動画像からの腫瘍性病変自動診断,” 文部科学省科学研究費補助金 特定領域研究 第四回公開シンポジウム 論文集，pp.101–106, Jan. 2007.

3. 奥野弘嗣, 八木哲也, “衝突回避のためのアナログ・デジタル混在型ロボットビジョン,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 講演論文集, pp.2P1-D04(1)–(4), May 2007.

4. 奥野弘嗣, 八木哲也, “昆虫の視覚神経系に学んだ小型視覚モジュールの開発,” 信学技報 vol.107, no.328, pp.7–11, Nov. 2007.