

東京電機大学

博士論文

自然光下における瞬目情報を用いた  
視線入力システムに関する研究

Study on an Eye-gaze Input System Using Eye Blink  
Information Based on Image Analysis Under Natural Light

2017年9月

佐藤 寛修



# 自然光下における瞬目情報を用いた 視線入力システムに関する研究

Study on an Eye-gaze Input System Using Eye Blink  
Information Based on Image Analysis Under Natural Light

佐藤 寛修

---

## 目次

1	序論	1
2	視線入力と瞬目入力	6
2.1	視線入力とは	6
2.2	視線計測の原理	8
2.2.1	視角	8
2.2.2	眼球運動の性質	9
2.2.3	視線計測法	10
2.2.3.1	EOG法	10
2.2.3.2	角膜反射法	11
2.2.3.3	強膜反射法	13
2.2.3.4	画像解析を用いる方法	14
2.3	視線入力システム	15
2.3.1	視線入力的方式	15
2.3.1.1	1スイッチ法を用いる方式	15

2.3.1.2	限定的な視線方向検出による方式	16
2.3.1.3	注視した指標を選択する方式	17
2.3.2	視線入力システムにおける決定方式	19
2.3.2.1	注視による方式	20
2.3.2.2	瞬目による方式	21
2.3.2.3	特定領域への到達による方式	21
2.4	瞬目入力とは	22
2.5	瞬目計測の原理	24
2.5.1	まぶた周辺の構造	24
2.5.2	瞬目の役割と性質	26
2.5.3	瞬目の種類	27
2.5.4	瞬目計測の歴史	29
2.5.5	瞬目計測法	32
2.5.5.1	EOG法	32
2.5.5.2	光センサ法	33
2.5.5.3	画像解析を用いる方法	34
2.5.5.4	その他の方法	36
2.6	瞬目入力システム	37
2.6.1	瞬目入力システムの決定方式	37
2.6.1.1	瞬目の持続時間による方式	37
2.6.1.2	瞬目の回数による方式	40
2.6.1.3	ウィンクによる方式	41
2.6.2	瞬目入力における決定方式の現状	42
2.7	コミュニケーション支援装置の利用状況の現状	44
2.8	視線入力に関する先行研究の知見と本研究の貢献	45
2.8.1	視線入力に関する先行研究の知見	46
2.8.2	視線入力の課題と本研究で解決した課題	50

<b>3</b>	<b>画像解析による瞬目計測とキャリブレーション</b>	<b>53</b>
3.1	画像解析による瞬目計測法の提案	53
3.2	計測環境	55
3.3	瞬目波形の計測	56
3.3.1	眼球開口部抽出のための画像処理	56
3.3.2	瞬目時波形の抽出	60
3.4	瞬目種類の自動識別法	62
3.4.1	識別に用いる特徴パラメータ	62
3.4.2	瞬目種類識別法の提案	63
3.5	瞬目種類識別のキャリブレーション法の検討	64
3.5.1	瞬目種類識別のキャリブレーションの必要性	64
3.5.2	瞬目種類識別のキャリブレーション法の検討のための 予備実験	65
3.5.3	瞬目自動抽出の結果	66
3.5.4	瞬目種類識別の結果	66
3.6	瞬目種類識別のためのキャリブレーション法の評価	69
3.6.1	瞬目種類識別のキャリブレーションのための瞬目抽出	70
3.6.2	瞬目種類識別のためのキャリブレーション法の評価実験	70
3.6.3	実験結果	72
<b>4</b>	<b>2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別</b>	<b>76</b>
4.1	識別可能な瞬目種類を追加する利点	76
4.2	2種類の随意性瞬目	77
4.2.1	2種類の随意性瞬目の定義	77
4.2.2	瞬目パラメータの定義	78
4.2.3	2種類の随意性瞬目の特徴	81
4.3	拡張した瞬目種類識別法	84

4.3.1	複数の瞬目種類識別法	84
4.3.2	拡張した瞬目種類識別法の検討方法	85
4.4	瞬目種類識別法の評価	87
4.4.1	瞬目計測実験	87
4.4.2	瞬目種類識別の結果	88
4.4.3	関連手法との比較	91
<b>5</b>	<b>瞬目情報を用いた視線入力システム</b>	<b>93</b>
5.1	視線入力システムの概要	93
5.1.1	視線入力システムの要件	93
5.1.2	視線入力システムの構成	94
5.2	瞬目による入力インタフェースの検討	95
5.2.1	視線入力の方式	95
5.2.2	瞬目計測の適用	96
5.3	日本語文字入力システムへの応用	97
5.3.1	視線入力の方式	97
5.3.2	日本語文字入力の機能	99
5.3.3	瞬目計測と視線計測の並行処理	101
5.3.4	瞬目計測の適用	103
5.4	提案システムの評価	106
5.4.1	評価実験	106
5.4.2	実験結果	109
5.4.3	誤選択が入力時間へ及ぼす影響	113
5.4.4	視線入力速度の理論値との比較	115
5.4.5	考察および関連研究との比較	117
<b>6</b>	<b>総合考察</b>	<b>122</b>
6.1	本研究に関するユーザビリティ評価	122

6.2	本研究の貢献と今後の課題 . . . . .	124
<b>7</b>	<b>結論</b>	<b>128</b>
	謝辞	133
	参考文献	135
	研究業績一覧	149
付録 A	視線入力システムのハードウェア仕様	155
付録 B	瞬目種類識別キャリブレーション法の検討結果	157
	B.1 予備実験における瞬目抽出結果 . . . . .	157
	B.2 予備実験における瞬目種類識別結果の詳細 . . . . .	158
	B.2.1 各種類 1 個ずつの瞬目から代表値を求めた場合 . . . . .	158
	B.2.2 各種類 2 個ずつの瞬目から代表値を求めた場合 . . . . .	160
	B.2.3 各種類 3 個ずつの瞬目から代表値を求めた場合 . . . . .	161
	B.2.4 各種類 4 個ずつの瞬目から代表値を求めた場合 . . . . .	163
	B.2.5 各種類 5 個ずつの瞬目から代表値を求めた場合 . . . . .	165
	B.3 評価実験における瞬目抽出結果 . . . . .	167
	B.4 評価実験における瞬目種類識別結果の詳細 . . . . .	168
	B.5 関連する先行研究の方法による瞬目種類識別結果 . . . . .	169
	B.5.1 200 ミリ秒の固定値を持続時間のしきい値とした場合 . . . . .	169
	B.5.2 250.5 ミリ秒の固定値を持続時間のしきい値とした場合 . . . . .	171
	B.5.3 300 ミリ秒の固定値を持続時間のしきい値とした場合 . . . . .	172
	B.5.4 随意性瞬目の持続時間の最小値をしきい値とした場合 . . . . .	173
	B.5.5 持続時間のしきい値を複数の被験者から求めて得た 平均値を用いた場合 . . . . .	175

付録 C	2 種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別における実験結果	177
C.1	予備実験における瞬目パラメータの計測結果 . . . . .	177
C.2	評価実験における瞬目種類識別結果の詳細 . . . . .	180
C.2.1	条件 C1 の場合 . . . . .	180
C.2.2	条件 C2 の場合 . . . . .	182
C.2.3	条件 C3 の場合 . . . . .	184
C.2.4	条件 C4 の場合 . . . . .	186
C.2.5	条件 C5 の場合 . . . . .	188

# 1 序論

重度の ALS (Amyotrophic Lateral Sclerosis : 筋萎縮性側索硬化症) 患者のような、重度肢体不自由者とのコミュニケーション支援を目的として、視線入力についての研究がさかんにおこなわれている [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21]. 視線入力とは、人の視線を何らかの方法で捉え、コンピュータの操作などに用いるヒューマンインタフェースの総称である。視線入力にはさまざまな方式があり、かねてより多く採用されていたのは、赤外光照明を眼球に照射して、視線移動にともなって生じる角膜反射像の移動を計測する角膜反射法を用いた方法である [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. この方法は、視線入力研究のうちでも比較的早くに理論が確立し、高精度な計測が可能である。このような計測法を備えた入力装置を用いると、たとえばパソコンの画面上に表示した指標（文字やアイコン）を視線によって選択し、文字入力による意思伝達などを行なうことが可能となる。

視線入力の方式には、角膜反射法のほかにもいくつか提案されている。他には、眼球の周辺に複数の電極を装着し、眼球運動にともなって生じる電位変化から視線移動を計測する、EOG 法 [10, 11, 12, 13, 14] がある。また、眼球付近に設置した赤外線などの光源と光センサにより、眼球の強膜（白目）と角膜（黒目）の反射率の違いから眼球運動によって生じる光強度の変化を計測する強膜反射法がある [15]. これらの方法は、いずれも赤外線光源の照射や電極の貼り付けが必要である。また、コンピュータにこれらの計測信号を入力して操作などに用いるためには、信号を増幅するアンプと A/D 変換器が必要になる。著者らはこれらの問題を解決するため、自然光<sup>1</sup> 下の画像解析による視線入力システムをすでに開発している [22]. この視線入力システムは、ビデオカメラで撮影した眼球近傍の画像に強

---

<sup>1</sup>自然光

視線入力の計測方式には赤外光照明を用いる方法がよく知られている。本論文ではこれと対比し、赤外光を用いない蛍光灯や LED 電球などによる照明を自然光とよぶ。

膜反射法を応用した画像解析などを適用し、ソフトウェア処理によって指標の選択が可能である。とくに、計測に用いるビデオカメラに一般的に市販されているものを採用し、一般のユーザが家庭などでも利用できるようなシステムの構成を達成した。

この視線入力システムにおいて、所望の指標を選択する場合には、指標を一定時間にわたって注視し続ける必要がある。この注視判定に用いる視線の停留時間のしきい値は、経験的に決定した設定値を採用していた。この停留時間のしきい値が大きくなると指標の1選択あたりに要する時間が大きくなり、全体の入力時間が大きくなる。停留時間のしきい値を小さくすると指標の1選択あたりに要する時間は短くなるが、入力意図のない視線の到達を指標の注視と判定する場合があります。誤選択を生じやすくなる。そこで著者は、他の先行研究において、どのような停留時間の設定値を用いているかを調査した。

先行研究に用いられている停留時間のしきい値を比較してみると、167ミリ秒～1.12秒とばらつきがあり）[6, 7, 14, 19, 20]、視線移動の速度によって注視状態を判定するシステムでは選択決定のために3秒以上を設定しているもの[2]もあった。著者らのシステムにおいては、停留時間のしきい値を必要に応じてカスタマイズできるように設計した[22]が、適切な設定値を明らかにすることは難しい。

注視による入力方式以外の方法として、まばたき（瞬目）による入力決定方式がある[6, 8, 11, 12, 21]。瞬目を意識的に行なうことによる指標の入力決定が実現すれば、入力決定の意図を意識的な動作によって示すため、入力決定の操作が主体的に実行できる。次に著者は、他の先行研究で開発されている瞬目入力インタフェースについて調査した。この瞬目入力インタフェースは、視線入力との組み合わせに限らず、瞬目の動作のみで操作可能なものや、顔姿勢の変化による操作と組み合わせたものなどを含んでいる。

意識的な瞬目（随意性瞬目）による入力を実現することを考えると、随意性瞬目と自然に生じる瞬目（自発性瞬目）の瞬目種類を識別する必要がある。先行研究における画像解析を用いた瞬目種類の識別法には、瞬目の持続時間による方式

と、瞬目の回数による方式 [23, 24, 25] およびウィンクによる方式 [6, 21, 25, 26, 27] がある。先行研究では、瞬目の持続時間による方法が多くみられる [8, 20, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37]。この方式では、随意性瞬目と自発性瞬目との間に瞬目の持続時間のしきい値を設定して識別を行なう。このときに設定する値はシステムによってことなり、短いものでは 200 ミリ秒 [28] としているが、長いものは 5 秒に設定している [29]。この持続時間のしきい値は、システムごとに経験的または統計的に決定した固定値を用いており、瞬目の持続時間のパラメータに現れる個人差は考慮されていない。

そこで著者は、画像解析による瞬目計測法により、瞬目特性の個人差を考慮した随意性瞬目と自発性瞬目の識別を行なうため、ユーザが主観的に「しっかり」と行なう随意性瞬目と自発性瞬目との識別における持続時間のしきい値をキャリブレーション処理によって決定する方法を提案した [38]。このとき、瞬目の動作は高速であるため、ビデオカメラでこれを計測するためには、工夫が必要であった。著者らはこの課題を、1 枚のインタレース画像を分割して得た 2 枚のフィールド画像を用いて計測を行なう、フレーム分割法によって解決した。上述の瞬目種類識別において、とくにユーザの負担に配慮し、キャリブレーション処理に用いる瞬目の個数なるべく少数で完了する方法を実験によって調査した。この実験の結果、持続時間のしきい値を決定するために用いる瞬目の個数は、3 個ずつでよいことが明らかとなった。この個数の条件によるキャリブレーションのもとで瞬目種類識別を行なった結果、随意性瞬目と自発性瞬目を含む全体の識別率は被験者 8 名の平均で約 99.3 % に達し、他の先行研究の方法により設定したしきい値の場合よりも高い識別率を得られることがわかった [38]。

このキャリブレーションを行なう瞬目種類識別法によって、ユーザが主観的に実行できる 1 種類の入力意図が識別できるようになった。著者はさらにもう 1 種類、すなわち 2 種類の入力意図を識別することを目標とした [39, 40, 41]。2 種類の入力意図として、たとえば第 1 の入力を通常の入力決定とし、第 2 の入力を訂正の機能に割り当てることができる。著者はこの目的のため、「しっかり」と行な

う瞬目と、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目を、自発性瞬目と識別する方法を開発した [39, 40, 41]. 識別法を確立するにあたっては、識別対象の 3 種類の瞬目について、瞬目の形状特徴に関するパラメータ（瞬目パラメータ）の複数を比較し、個人内での大小関係が一定になるものを明らかにした. それとともに、瞬目パラメータに 2 段階のしきい値を設定して処理することで、2 種類の随意性瞬目と自発性瞬目を識別する方法を確立した. これにより、被験者 10 名の平均で約 95 % の識別率を得ることができるようになった [41].

それまでの瞬目種類識別の研究においては、瞬目計測処理を記録済みの動画像に適用することで、瞬目種類識別法の評価を行ってきた. このオフライン処理による解析は、瞬目の性質を明らかにし、提案する瞬目種類識別が可能かどうかを確かめるといった目的には適していた. しかし、実際の視線入力インタフェースに適用するためには、その処理時間に課題があった. 著者の瞬目計測にはフレーム分割法を採用していることから、瞬目計測処理をリアルタイムに行なうためには、動画像（60 フィールド/秒）のフィールド画像のサンプリング時間である 16.67 ミリ秒以内に処理を完了する必要がある. 瞬目を記録した動画像はハイビジョン解像度で撮影されたものであり、著者らのハードウェア環境では、瞬目計測に用いる眼球開口部の面積を求めるために 1 フレームあたり 100 ミリ秒程度を要していた. 著者は動画像の各フィールドを間引くことにより、低解像度であっても識別率を著しく低下させることなく処理時間を満足する条件を調査し、著者らの視線による文字入力システムと同じ、DV の解像度（360 × 240 画素）で処理できることを明らかにした [42, 43]. この瞬目計測の処理を、視線計測の処理と同時に行なうため、これらの処理をマルチスレッド構成とし並列に処理させることで、見かけ上、互いの処理に影響なく動作させることができるようになった. このリアルタイムの瞬目計測および瞬目種類識別の機能を追加した、視線による文字入力システムを用いて、漢字変換を含む日本語文字入力の実験を行ない、被験者 9 名で 5.2 字/分の入力速度を達成した [43]. この速度は、著者らの先行研究で開発した注視により決定する視線入力システム [22] よりも高速である. また、専用の光源

や計測装置を用いることなく、先行研究における EOG 法の文字入力システム [12] と同程度の速度を実現することができた [43].

本論文では、以下 2 章において、視線を用いた入力と瞬目を用いた入力のインタフェースに関して、その技術的な背景と従来の視線入力および瞬目入力システムの現状を述べる。3 章では瞬目による入力決定のための瞬目種類識別法とその初期キャリブレーションの方法を、4 章では 3 章の瞬目種類識別法を拡張した 2 種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別法を、5 章では 3 章で述べた瞬目種類識別法を適用した瞬目情報を用いた視線文字入力システムを詳述する。そして、6 章では本研究を通しての総合的な考察を行ない、今後の課題を述べる。最後に、7 章において本研究の総括として結論を述べる。

## 2 視線入力と瞬目入力

視線の情報と、瞬目の情報を用いて入力を行なうために、それぞれの情報を何らかの方法で捉える必要がある。本章では、視線計測および瞬目計測の原理を述べ、従来の視線入力システムおよび瞬目計測システムの例を示す。とくに、入力インタフェースの設計に重要な入力決定の方法について概説し、現状を述べる。

### 2.1 視線入力とは

重度の ALS<sup>1</sup> 患者などの重度肢体不自由者とのコミュニケーション支援を目的として、人間の視線方向の変化を捉え、それによりコンピュータへ文字などを入力する視線入力に関する研究がさかんに行われている。視線入力とは、人の視線を何らかの手段で計測し、それによってコンピュータに文字などを入力するヒューマンインタフェースの総称である。具体的には眼球運動を光学的あるいは電気的などの手法を用いて計測し、それから求められる視線方向をもとに指標（アイコンや文字など）の選択などを行ったり、カーソルを移動させたりする。視線入力には様々な手法があるが、現在の視線入力システムは、人がどの位置を見ているかを計測し、その箇所に対応した指標を選択する方法が多い。たとえば、図 2.1 のような指標群が画面上に表示され、そのうち入力したい文字に対応する箇所（図 2.1 では「う」に相当する）をある時間注視する（停留時間と呼ぶ）と、その文字が入力される。

視線入力は、その名のとおり視線のみにより使用できる入力インタフェースであり、キーボードやマウスなどの通常の入力インタフェースが使用できない状態

---

<sup>1</sup>ALS（筋萎縮性側索硬化症）

運動ニューロンが侵され、神経信号が筋肉へ伝わりにくくなる難病。中年以降の男性での発生が多い。進行性の経過をとり、そのため重度の患者は、ほぼ身体が麻痺してしまう。知覚神経や自律神経は侵されないため、五感（視覚、聴覚、臭覚、味覚、触覚）、記憶、知性を司る神経には原則として障害はみられないが、独力で外部との意思疎通がとりにくくなり、患者は非常に大きな精神的苦痛を感じる。眼球運動は原則として健常者と変わらない。

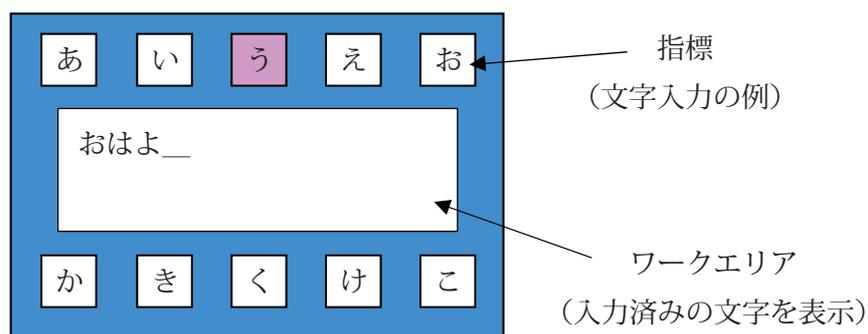


図 2.1: 肢体不自由者向け入力インターフェースの画面例

においても動作する．そのため，重度肢体不自由者であっても，自らの意思で使用することが可能である．現在，これらの人たちのために種々の視線入力システムの研究が行われており [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]，実用に供されているものもある．多くは赤外線照明や高速化のための画像処理用ハードウェアなど特殊な装置が必要である．このほか，電氣的に眼球運動を計測し（2.2.3.1目 で述べる EOG 法），視線入力インターフェースに用いる研究もなされているが，電極をつねに顔部に貼り付けなければならないための不快感があり，信号を増幅するためのアンプや A/D 変換のためのハードウェアが必要になるという課題がある．

これらに対し，自然光のもとで眼球を撮影して画像処理し，その結果から視線入力を行なう方法が研究されている [16, 17, 18, 19, 20, 21, 29, 44, 45, 46]．これらの方法のうち，視線計測に必要なパラメータなどをリアルタイムに求めたり，頭部の移動を許容した視線計測を行なう目的で，複数台のカメラなど特殊な装置を使用しているものもある [45, 46]．自然光下における視線計測には，とくに虹彩（黒目）の位置情報を用いるものが多く使われている [16, 17, 18, 19, 21, 29]．こうした自然光下での視線計測は，特殊な装置を用いなくても可能なので，計測装置が赤外線を用いたものよりも格段に安価であり，とくに 1 台のカメラを用いた方式では設置に特殊な技術を必要としない．そのため，これらのシステムは個人の自由な使用に向いているという利点がある．

## 2.2 視線計測の原理

視線入力では人の眼球運動を計測し，その結果から視線方向を推定して指標の選択などを行なう．この節では，視線計測の原理について述べる．

### 2.2.1 視角

視角とは，見る対象の大きさや位置を示す単位であり，視線計測精度や，注視対象である指標の大きさを表す際にも使用される．

注視対象である指標の位置と，計測された注視点の位置の差を一般に注視点計測誤差といい，視線計測システムの精度を示す尺度として用いられる．注視点の位置や注視対象となる画面上のオブジェクトの大きさなどを示すパラメータは，視角によって表される．われわれ人間は，網膜に投影された映像を知覚，認識して物体を見ているが，見ている対象の大きさを問題にする場合，対象そのものの物理的な大きさである長さを示すのみでは，網膜に投影される像の大きさが一意に決定しない．なぜなら，眼から対象までの距離（視距離）によって，像の大きさが変化するからである．この点を解決するために定義された概念が視角であり，この視角による表現によって大きさの1次元的な比較が可能となる．

視角は図 2.2 に示す  $\theta$  として定義され，この視角による表現によって大きさの1次元的な比較が可能になる．

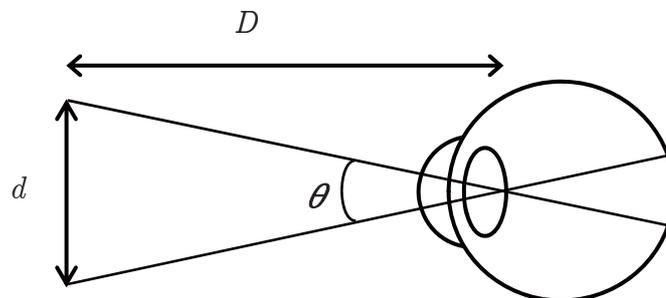


図 2.2: 視角の定義図

図 2.2 において、見る対象の大きさを  $d$ 、視距離を  $D$ 、視角を  $\theta$  とすると、以下の式がなり立つ。

$$\tan(\theta/2) = d/2D \quad (2.1)$$

式 2.1 から  $\theta$  は以下のように与えられる。

$$\theta = 2 \arctan(d/2D) \quad (2.2)$$

$\arctan$  関数は線形関数ではないため、視角  $\theta$  が大きくなればなるほど、眼球と平行面上にある物体の大きさの歪は大きくなる。

### 2.2.2 眼球運動の性質

視線入力インタフェースとは眼球運動をもとに視線計測を行ない、その情報を用いて入力を行なう。眼球運動は大きく分けて、視線が水平および垂直に移動する水平垂直運動と、視線には直接影響しないが眼球が回旋する回旋運動がある [47]。これらのうち、視線入力に用いられるのは前者の水平垂直運動であり、これは固視微動、随従運動、跳躍運動 (Saccade, 以下、サッカードと呼ぶ) の 3 つに分けられる。このうち、固視微動は指標などの視対象を注視 (固視) したときに現れる運動であり、さらにフリック、トレモア、ドリフトの 3 つに分けることができる [48]。フリックは、0.03~5 秒の時間間隔で生じる視角で 1~20 分程度の振幅をもつステップ状の変位のことであるが、注視状態で現れるステップ状の変位全般を指すこともある。トレモアは、視角で 1 分程度の角度の振幅をもち、20~100Hz 程度のランダムな振動のことである。ドリフトは、変位角 5 分程度の非常にゆっくりした変動であり、フリックの間に存在する。

また、随従運動は速度の比較的遅い移動物体を目で追うときの眼球運動であり、最高速度は 30 度/秒に達するが、通常は数度/秒である。しかし、速度の速い移動物体を目で追う場合には、この随従運動では追跡しきれないため、視線を飛ばすようにして物体を追跡する。これがサッカードである。サッカードの最高速度

は 600 度/秒に及ぶ [48]. 静止画を見たときに注目している視対象を移動させる際に生じる運動は、すべてこのサッカードである.

## 2.2.3 視線計測法

### 2.2.3.1 EOG 法

EOG(electro-oculography) 法は、眼球のもつ生理的な電位を計測することで視線検出を行なう手法である. 角膜は網膜に対して 1 ミリボルト弱の正の電位を有しており、この電位差の一部は眼球付近に皮膚電極を取り付けることで検出可能である. ここで検出される電圧変化と眼球の回転角との関係は、線形に近い関数関係であるため眼球運動が検出できる. たとえば、視角に比例した表示位置に指標を複数提示し、それを被験者が順次注視すると、1 次関数に近い形で電圧変化が計測される. この特徴から、取得された電圧変化のデータから近似直線をたとえば最小 2 乗法により決定し、それを個人ごとのキャリブレーションデータとして、眼球運動の計測結果を比較して視線計測を行なう方法が一般に用いられている [10]. なお、この特性は皮膚の状態などによって変化するため、計測のたびにキャリブレーションをしない必要がある. この方法は眼電図法とも呼ばれる. なお、後述の交流増幅による方法と区別するため、直流結合増幅眼電図 [49]、直流増幅 EOG[14] などと呼ぶこともある.

直流増幅 EOG によって注視点計測を行なう場合、高精度な計測は難しい. たとえば、内富らによる水平方向の注視点計測を行なった実験 [49] において、3 度~5 度程度の誤差を考慮する必要があると述べられている. とくに長時間の計測を想定すると、眼球運動とは無関係に電位が変動する現象 (ドリフト) に対処しなくてはならない. ドリフトによる影響への対処方法として、眼球電位の変化を交流として計測し、視線移動の前後の差分を用いて計測をする手法が考案されている [11, 13, 14, 50]. この方法は交流増幅 EOG[14] と呼ばれ、EOG 法による視線入力インタフェースの研究において、多く採用されている [11, 12, 13, 14, 50]. 交流増

幅 EOG は差分値を得る計測法であるため、インタフェースへの応用には工夫が必要である。キャリブレーションや算出方法を工夫して、注視点計測を行なう入力インタフェースが開発されているが、垂直方向の高精度化に課題が残されている [13]。注視点の計測が難しいため、眼球運動の上下左右の動きを検出して利用するような、2.3.1.2 目で述べる限定的な視線方向検出による入力インタフェースも提案されている [11, 12]。

これらの EOG 法は、被験者の顔面に電極を装着する必要がある、さらに入力信号を増幅するためのアンプが必要である。そのため、インタフェースとしての応用など一般の利用を考えるとこの条件はユーザの負担となるが、近年では眼鏡に組み込んだ乾電極と小型のアンプによって視線計測が可能なシステムも開発されており [51]、今後の発展が期待される。

### 2.2.3.2 角膜反射法

角膜反射法とは、角膜に点光源照明を照射した際に明るく現れる角膜反射像（第 1 プルキンエ像）の位置をもとに、眼球運動を計測する方法である。眼球の構造上、眼球の回転中心と角膜の凸面の中心とは一致しない。そのため、角膜を凸面鏡とし光源の反射点を凸レンズなどで集光すると、この集光点は眼球の回転にともなって移動する。この点を写真フィルム、ビデオカメラ、フォトセルなどで受け、それによって眼球運動を計測する [47]。この手法は、基礎理論が確立されており、実用化されている視線入力システムのほとんどがこの方法を用いている。この手法の概念図を図 2.3 に示す。

この手法では十分な位置あわせを行なうと、検出精度が 0.5 度程度となるが、頭部の移動が計測に大きく影響するという問題点がある [47, 52]。実用的な計測装置では、頭部移動の影響を軽減させるため、角膜反射像と瞳孔中心を利用する方法が多く採用されている。赤外線(point light source)の点光源を眼球に照射すると、第 1 プルキンエ像が角膜上に輝点として現われ、瞳孔は暗い円として撮影されるため、簡単な画像

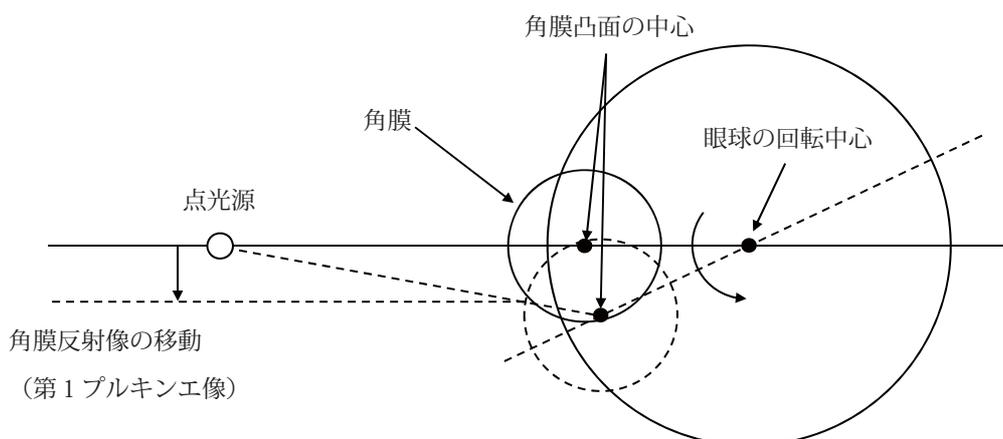


図 2.3: 角膜反射法の概念図



図 2.4: 第1プルキンエ像の撮影例

処理によって第1プルキンエ像を抽出することができる。図2.4に、第1プルキンエ像の撮影例を示す。

図2.4において、瞳孔領域内にみられる輝点が第1プルキンエ像である。瞳孔と第1プルキンエ像の相対位置は頭部が移動しても変化しないため、瞳孔の中心を参照点として補正を行なうことにより、頭部の動きをほぼ打ち消すことができ、高精度に計測が可能となる。こういった計測装置は被験者への負担が軽く、数社から製品化されている。近年では、小形化が進み、簡易に設定できるものもある。市販されている計測装置の一例を図2.5に示す。瞳孔位置の検出による頭部移動の

補正を行なった場合，市販の計測装置では分解能がおよそ 0.25 度程度となり，注視点計測誤差は 0.5～1 度程度となる [53]．

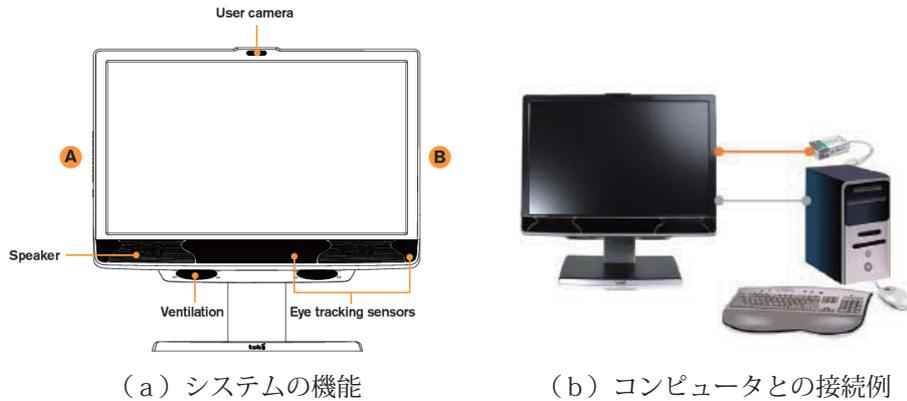


図 2.5: 角膜反射法を用いた視線計測装置 [53]

### 2.2.3.3 強膜反射法

強膜反射法は角膜と強膜の反射率の違いを利用し，眼球運動を計測する方法である．この手法では，角膜と強膜の曲率半径などにより光の反射がことなることを利用して計測を行なうほか，実際には角膜の下に存在する虹彩と強膜の反射率の違いを含めて計測している．現在の強膜反射法の計測には，1950 年代に L.Stark らが考案した，差動検出の原理を用いた視線計測の方法 [47] が多く用いられている．この手法の概念図を図 2.6 に示す．水平方向の検出範囲は  $\pm 15$  度程度であり，特性としてよい直線性が得られる [54]，また B.L.Zuber により，頭部を十分に固定することで数度の眼球運動に対して 10 分の分解能を得たという報告がされている [47]．

差動検出による方法では，水平方向に比べて垂直方向における眼球運動の検出が容易でないが，L.Mitrani らは眼球の垂直方向の動きに対応して下まぶたが前後に動くことを利用し，第 3 の光源検出器を加えて垂直方向の眼球運動を検出している [47, 52]．

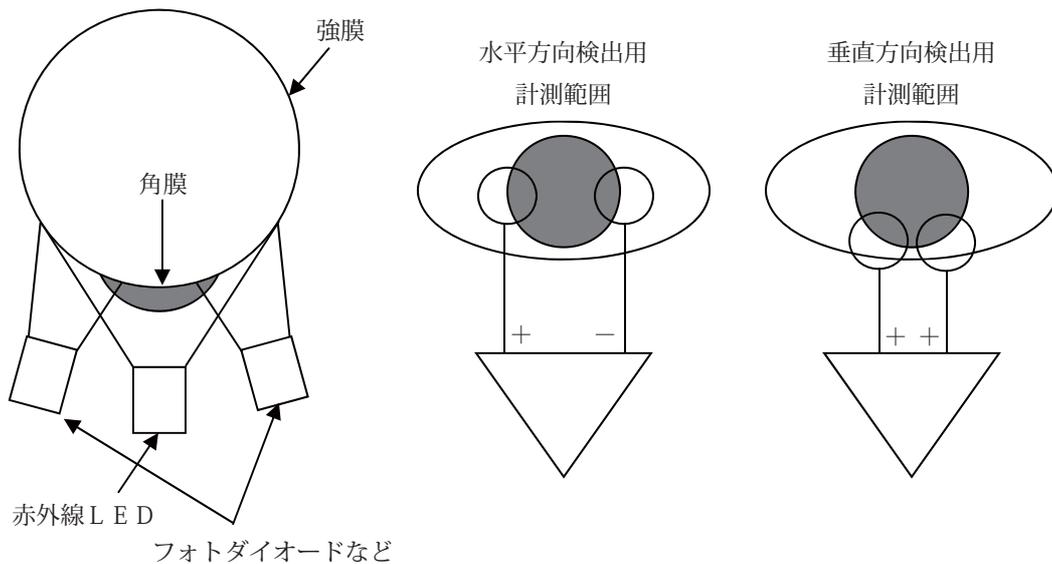


図 2.6: 強膜反射法概念図

また、瞳孔の上下の縁にスリット状の光を照射した場合の反射光の差を検出して、垂直方向の眼球運動計測の精度を向上させる方法や [47]、45 度傾けたスリット状の光を照射し、それぞれの反射光をマトリクス回路により処理することで、水平方向と垂直方向の眼球運動を計測する方法が提案されている [47]。さらに、6 ミリメートル×25 ミリメートルの空間に 10 個の LED と 12 個のフォトダイオードを取りつけることで、計測精度の向上を図った例についての報告もある [47]。

近年では、眼鏡のレンズ上に透明な光センサを複数配置し、眼球運動にともなって変化する環境光の反射量を検出することで、視線計測を行なう試みがなされている [55]。この研究では、眼鏡のレンズそのものにセンサを生成しているため、センサを追加した専用の眼鏡型デバイスが必要になるものの、光源やフォトダイオードなどが不要になり、計測に用いるデバイスを軽量化できる利点がある。

#### 2.2.3.4 画像解析を用いる方法

近年、コンピュータの高速化や動画像取込み装置が普及したことにより、自然光下で撮影された眼球近傍または眼球を含む顔画像から、視線計測を行なう方法

が数多く研究されている [16, 17, 18, 19, 20, 21, 29]. 2.2.3.2 目で述べた角膜反射法においても画像解析を行なう手法が多く用いられているが, これには赤外線点光源などの特殊な照明を必要とする. それに対して, 自然光下で撮影された画像を用いる方式は, 環境光 (室内照明) のみで計測を行なうものが多い. 自然光下で 1 台のカメラを用いる視線入力システムがいくつか提案されている. これらの多くは, 眼球近傍画像を 2 値化し虹彩形状を抽出し, その位置情報を幾何学的に取得して視線計測を行なっている [16, 19, 21, 29]. 自然光下で 1 台のカメラを使用する手法では頭部移動による計測誤差を抑えるため, Web カメラなどの小形のカメラを眼前に配置する手法が提案されている [20, 21, 29]. また, 1 台の家庭用のビデオカメラによって虹彩形状を撮影するものもある [18]. カメラ 1 台による方法は, 計測精度が低いなどの問題点はあるものの, 赤外線照明などの特殊な装置を要しないため, 個人でも利用可能な安価で実用的なシステム構築に適しており, 福祉分野への応用を目的にさかんに研究が進められている.

## 2.3 視線入力システム

### 2.3.1 視線入力的方式

#### 2.3.1.1 1 スイッチ法を用いる方式

視線移動の距離を逐次計測し, その大きさがあるしきい値以上になったときにスイッチングを行なうことによって選択を行なう方式である [15]. この方式は, 1 スイッチ法の入力スイッチを視線移動で代替したものと考えることができ, 通常は文字やアイコンなどの選択肢の上をカーソルが自動で走査する端末などと合わせて, その入力決定として使用する. この方式は視線情報を 2 値の情報として扱っているため, しきい値を適切に設定すれば極めて正確に動作する. しかし文字入力に時間を要する点や, 入力ミスをするとカーソルが一巡するまで訂正できないという点に課題がある. 図 2.7 に, この方式をもとに構築された視線入力システム

の概略図とその入力画面を示す。

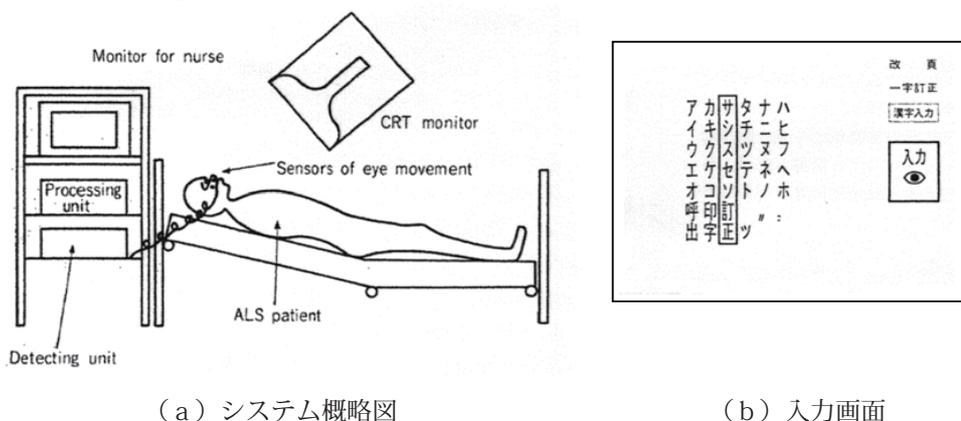


図 2.7: 眼球の動きを選択スイッチとして利用した視線入力システム [15]

このシステムでは赤外線 LED とフォトダイオードを用い、強膜反射法によって視線計測を行なっている。情報提示用のモニタ画面上には、図 2.7(b) のような入力画面が示されており、提示された文字の上を自動的に移動するカーソル（図 2.7(b) における、サ行を囲んだ矩形）によって、所望の文字などを選択する。文字の入力は、文字を含む列の選択と、列内の文字の選択の 2 段階によって行なわれる。まず、図 2.7(b) に示したように、文字の上を列ごとにカーソルが移動する。ユーザは、所望の文字を含む列にカーソルが達したときに入力画面上の「入力」と書かれたアイコンに視線を合わせると、カーソルが指示している列が選択される。次に、選択された列内の文字を対象に、文字ごとにカーソルが移動する。所望の文字にカーソルが達したときに再度「入力」と書かれたアイコンに視線を合わせると、対象の文字が入力される。

### 2.3.1.2 限定的な視線方向検出による方式

何らかの方法で眼球近傍の状態を捉え、視線が左右のどちらか（または上下のどちらか）を向いているかを推定し、それにより入力画面上のカーソルを移動させる方式である。画像処理を用いた視線計測法においては、虹彩や瞳孔の位置な

どから視線の向きを推定することができ、EOG法においては、網膜角膜間電位の電位変化のパターンによって視線の動作方向を識別することができる。入力したい文字やアイコンを選択する際には、瞬きを検出しスイッチとして利用することが多い。

この方式は視線がどちらを向いているかという情報のみを利用しているため、厳密な注視点位置を計測する必要がなく、2.3.1.1目で述べた眼球の動きを選択スイッチとして利用する方式と同じように判定条件を適切に設定すれば正確に動作する。しかし、注視している文字やアイコンが直接選択されるわけではないので、入力画面のインタフェースに工夫が必要であり、どの文字（アイコン）が選択されているか判断しづらいため、システムの使用にある程度の経験を必要とする。

この方式にはビデオカメラで撮影された被験者の顔画像を2値化し、瞳の位置を検出することによって視線方向を推定する方法[21]がある。この方法は通常のパソコンを用いた場合に数秒で処理が行えるほどの処理コストであるが、やはり視線から得ている情報が少ないため、文字入力に時間を要する。そのほか、交流増幅EOG法によって、視線の上下および左右の移動を検出する方法も提案されている[11, 12]。この方法により、図2.8のような入力画面上のカーソルを移動させて入力する文字入力システムを実現している。梶原らは、入力決定のたびに入力画面を90度回転させて、より検出が容易な水平方向のみの選択による入力操作を可能にした[12]。しかし、EOG法を用いているため、電極の貼り付けが必須であり、専用の計測機器が必要である。

### 2.3.1.3 注視した指標を選択する方式

視線計測によって入力画面上のどの位置を注視しているかを判定し、その位置にある指標（文字やアイコン）を選択し入力する方式である。視線の動きに追従するようにカーソルを移動させ、視線が注視状態になるとカーソルで選択されている文字などを入力する方式が研究されている[2, 10, 19]。注視している、すなわち

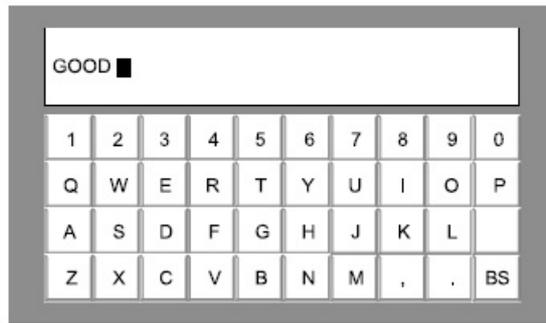


図 2.8: 限定的な視線方向検出による文字入力システムの画面例 [11]

見つめている指標が選択されるため，入力したいキーを押すだけでよいキーボードと同様の感覚で使用することができる．しかし注視点の位置を判定するため高精度な視線計測が必要であり，それだけ複雑な処理をとらなければならない．また指標を選択するには注視状態を判定しなくてはならず，それには眼球運動を高頻度取得してその速度を高精度に計測する必要がある．この方式をもとに構築された視線入力システム [2] の入力画面とその概略図を図 2.9 に示す．

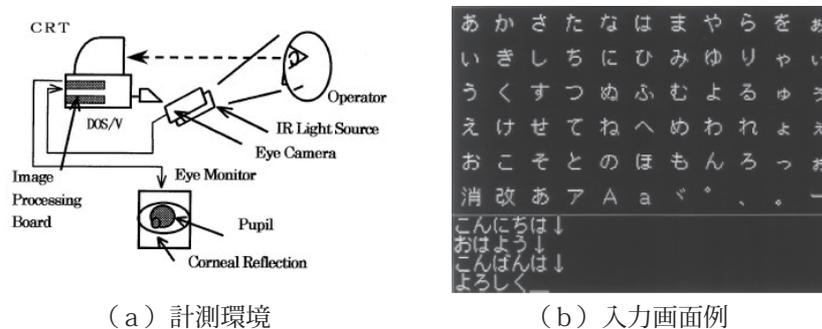


図 2.9: 注視した指標を選択する視線入力システム [2]

この方式は視線入力にもっとも適していると考えられており，多くの研究が進められているが，問題点も多い．とくに高精度かつ高頻度に計測を行なうために，従来の視線計測法では眼球への赤外線照射を前提としている点に問題があるといわれている．図 2.9 に示した視線入力システムでも，赤外線を眼球に照射している．

この方式では，注視対象の指標を判別するためにユーザの注視点を計測してい

る。十分に高い注視点計測の精度が得られれば、注視している位置にマウスポインタを追従させることが可能となる。近年では、1台のカメラによって実現した自然光下の画像解析による視線計測においても、マウスポインタとして動作させる目的のものも出てきている [29] が、この報告では2度程度の誤差が示されており、課題が残されている。

注視点に高精度にマウスポインタを追従できれば、興味の対象を注視することとポインティング操作が同時に行われるため、効率の良い入力インタフェースの構築が期待できる。そして、ユーザの視線移動の動作とマウスポインタの動作が一致し、きわめて直感的な操作を実現できるという利点があるが、自然光下の画像処理によるマウスカーソル操作を目指した視線入力システムでは、注視点の計測にとどまっている [18, 29]。

### 2.3.2 視線入力システムにおける決定方式

注視点を計測し指標選択を行なう視線入力システムによって入力を行なう場合には、一般に目的の入力機能を持つ指標などの視対象の位置を探索し、その視対象を選択する。目的の視対象をユーザが探索する場合に、通常はユーザの視線がいくつかの視対象上またはその付近に達する。このとき、視線の到達のみを入力決定の条件とすると、探索時の注視点の到達によって入力決定される場合がある。ここで決定した視対象が目的の視対象であった場合には問題はないが、探索の途中で目的とことなる視対象を選択してしまうこともある。この選択は誤選択であり、入力効率の低下やユーザの負担の増加につながる。この問題は、Midas Touch Problem と呼ばれ、視線入力研究の分野において古くから提起されていた [56]。本項では、この問題に対処するために採用されている、各種の入力決定方式について述べる。

### 2.3.2.1 注視による方式

視対象を一定時間にわたり注視し続けさせることによって、入力決定を行なう方法である。注視を判定する方法には主に2種類があり、注視点が指標などの一定の領域内に連続して観測されたことによって判定する方法と、視線の移動速度を計測して一定以下の速度になったときに注視と判定する方法がある。入力意図の判定条件に注視を用いることによって、目標の探索中に生じるような短時間の注視点の到達を許容し、入力意図を持った注視との識別が可能となる。

注視点が領域内に連続して観測されたことによる判定方法は、すなわち視線が対象領域内に一定時間にわたって停留していることを検出している。この注視判定に用いる停留時間のしきい値を大きくすれば、探索による誤選択は低減できるが、1選択あたりに要する時間が増大する。また、入力決定の判定が完了するまで注視を継続する必要がある、この条件がユーザの負担になる場合がある。したがって、よりよいインタフェースの構築のためには、設定する停留時間のしきい値について、適切な値を選定しなくてはならない。

具体的な設定値には、167ミリ秒(1/6秒) [6]、400ミリ秒 [20]、500ミリ秒 [7]、1秒 [14]、1.12秒 [19]の例がある。角膜反射法による視線入力システムにおいて、この停留時間のしきい値をユーザ自身に変更させながら慣れてきた場合の設定値を調査し、10日間の使用後の停留時間のしきい値として282ミリ秒を最適として示している報告がある [9]。しかし、この結果を詳細にみると、被験者ごとに最終的に得た最適値がことなっている。この他にも、画面上に表示する指標上の文字数などの情報量の違いによって、適切な停留時間のしきい値がことなることも指摘されており [7]、唯一の最適値を決めることは難しい。

視線の移動速度による判定方法では、視角にして5度/秒以下となった場合に注視とみなす例 [48]がある。伊藤らは、目的の視対象付近で視線の移動速度が小さくなる場合があり、単に速度のみで判定を行なうと誤った視対象を選択してしまう可能性が高いと指摘している [2]。その対処のために、視線の移動速度が小さく

なった停留状態と、停留のあとに注視点の移動距離が一定以内である注視状態を分けて判定する方法を提案した [2]。この時の注視状態は、3 秒間にわたって継続した場合を判定している。

この注視による入力決定方式は、注視点や視線の移動速度などの視線の位置に関する情報のみで実現可能であるため、次に述べる瞬目による方式よりも適用が容易な場合が多い。

### 2.3.2.2 瞬目による方式

瞬目による決定方式は、注視点を計測することなく入力決定できる特徴がある。この特徴から、選択操作の際に注視点の計測を行なわない、限定的な視線移動によって検出する方式の視線入力システムに適用すると都合がよく、多く採用されている [6, 11, 12, 21]。この瞬目による方式は、注視による方式とことなり、入力決定のトリガとしては注視点の情報を用いない。したがって、目的とことなる視対象に注視点が到達しても誤入力は生じない。そのため、ユーザの心理的な負担を軽減できる可能性がある。

しかし、瞬目はユーザの入力意図がないときにも自然に生じるものであり、この自然に生じる瞬目（自発性瞬目）とユーザの意思によって行なう瞬目（随意性瞬目）とを識別する仕組みが必要になる。この瞬目種類の識別法にも、いくつかの手法が提案されている。瞬目種類識別は、2.6 節の瞬目入力システムの要点であるため、視線入力以外の入力インタフェースの例とあわせて、2.6.1 項で詳細に述べる。

### 2.3.2.3 特定領域への到達による方式

注視点を、入力決定の判定を行なうための特定領域に到達させることによって入力決定を行なう方法である。大野は、視線入力によって指標選択するシステムにおいて、機能を表示した指標に隣接する位置に入力決定のための領域を設けて

おき、ユーザが指標を注視したのちに決定領域に視線を移すと入力決定される方法を提案した [57].

このほか、Wobbrock らは四隅に選択のための領域を設けておき、その注視する順序によってことなる機能を入力決定する方法を提案している [3]. 図 2.10 に、四隅の選択順による入力インタフェースの画面例を示す. Huckauf らは、円形の領域を扇形に分割した指標を表示して、領域に到達するたびに開かれるサブメニューを視線の軌跡によって順次選択していく方法を提案している [4, 5]. 図 2.11 に、円形領域の逐次選択による入力インタフェースの画面例を示す.

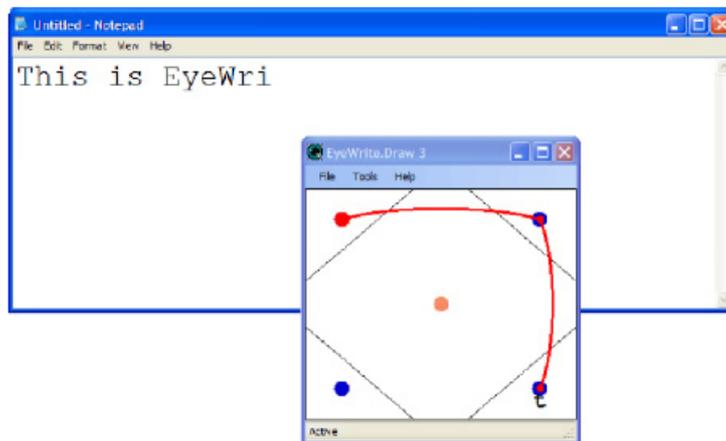


図 2.10: 四隅の選択順による入力インタフェースの画面例 [3]

これらの方法は、視線の到達によって選択が完了するため、注視による方法に要する停留時間や、瞬目に要する時間が不要になり、入力時間の短縮が期待できる。しかし、注視点の到達を判定する特性上、高精度な注視点計測が必要となる。また、この種の文字入力インタフェースを注視による方式と比較し、同程度の入力速度を得るまでには十分な訓練を要したという報告もある [5].

## 2.4 瞬目入力とは

ひとの視覚系の機能から情報を取得し利用する入力インタフェースには、2.1 節で述べた視線入力のほかに、まばたき（瞬目）の情報を用いる瞬目入力がある。瞬

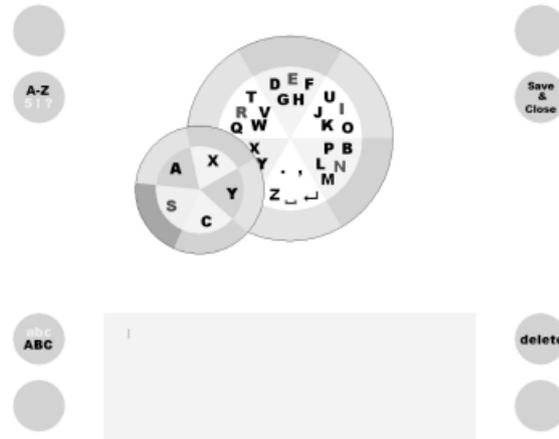


図 2.11: 円形領域の逐次選択による入力インタフェースの画面例 [4, 5]

目入力は、ユーザが入力を求めるときに、意図的に瞬目を生じさせることによって操作する。そのためには、ユーザの瞬目を何らかの方法で計測し、瞬目が生じたことを検出する必要がある。

瞬目によって入力するインタフェースは、様々なものが提案されている。もっとも単純な構成は、ユーザが行なう瞬目の動作のみで入力が可能である。この方式では、所望の入力対象の選択は、入力対象のオブジェクト上に対し順番にカーソルを移動させ、カーソルが所望の入力対象上に達したときに瞬目を行なうことによって実行される。そのほか、入力対象の選択の操作を他の情報によって行なうインタフェースがあり、入力の決定に瞬目を用いているものがある。本節では、これらの瞬目によって入力決定を行なうインタフェースについて述べる。

瞬目のみによって入力決定を行なうインタフェースは、1スイッチ法のスイッチとして瞬目動作を用いる構成となっている。2.3.1.1目で述べたとおり、1スイッチ法では画面上にソフトウェアキーボードが表示されており、その上をカーソルが自動的に走査する。そして所望の入力対象にカーソルが達したときに、瞬目を行なうことでカーソル位置、すなわち入力対象が決定する。

この自動的に移動するカーソルの機能を、別のジェスチャによって代替するものが多い。具体的には、顔領域の動画像を入力とし、黒目や鼻の頭頂部を追跡する

ことで、画像中の位置変化を検出して選択操作をする。この種のシステムは、ソフトウェアキーボード上の文字を選択するもののみでなく、ポインティングデバイスとして動作し、汎用的なコンピュータ操作が可能なものもある。

画像処理により顔姿勢の変化を用いて操作する入力インタフェースを設計する際には、その多くに眼球の領域が含まれている。また、視線入力システムにおいては、視線の情報を得るために眼球およびその周辺を何らかの方法で計測している。すなわち、これらの入力インタフェースは眼球に関する情報を得ることができ、主たる操作とは別に瞬目を入力に利用することは容易に着想される。しかし、瞬目にはユーザの意図と関わらずに生じる自発性瞬目が含まれており、これを随意性瞬目と識別する仕組みが必要になる。

ユーザの随意性瞬目と自発性瞬目を識別する方法は、3種類に大別される。まず、瞬目の持続時間によって識別する方法がある。そして、瞬目の生起回数を用いる方法がある。この他、両眼を同時に計測するシステムにおいては、片眼のみの瞬目（ウィンク）によって識別する方法がある。これらの方法について、2.6節で詳細に述べる。

## 2.5 瞬目計測の原理

瞬目によって動作する入力インタフェースを構築するためには、その性質の理解が不可欠である。本節では瞬目について概説し、代表的な計測方法とそれらを応用した入力インタフェースについて述べる。

### 2.5.1 まぶた周辺の構造

まぶた周辺の瞬目に関わる筋の構造を示すため、図 2.12 に眼球および眼瞼の断面図を示す。瞬目の動作は、上眼瞼挙筋が弛緩した後に続いて眼輪筋が収縮することによって起こる。開眼動作および開眼の維持には、上直筋からの側枝である

上眼瞼挙筋がかかっている。上眼瞼挙筋は、浅板、深板および最深板の3層からなる。浅板（第一層）は横紋筋でできており、眼窩角膜と眼輪筋眼瞼部を貫いて上眼瞼の皮膚に至る。深板（第二層）は平滑筋でできており、上眼瞼上縁に至る。最深板（第三層）は上結膜円蓋に至る構造になっている。浅板および最深板の横紋筋線維は動眼神経支配であり、深板は上頸神経節でシナプス結合した交感神経節後線維によって支配されている。したがって、上眼瞼は眼球の垂直方向の運動にともなって挙上または下垂するだけでなく、覚醒水準の低下によって下垂し、興奮によって強く挙上される [58].

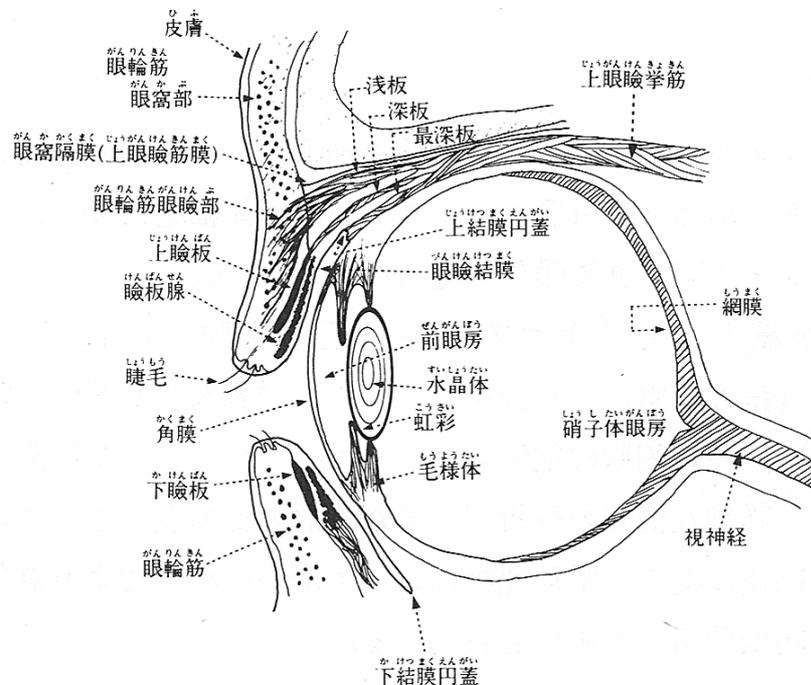


図 2.12: 眼瞼および眼球の断面図 [58]

眼輪筋と、その周辺の筋構造を図 2.13 に示す。眼輪筋は、表情筋のひとつであり、眼瞼を覆う眼輪筋眼瞼部、目の周囲を覆う眼輪筋眼窩部、および内眼角部の眼輪筋涙嚢部に分けられる。眼輪筋眼瞼部は、上眼瞼と下眼瞼とに分かれてその第三層を通過し、外側眼瞼靭帯の浅部で合い、外側眼瞼縫線を形成する。眼輪筋眼瞼部は、高頻度な瞬目動作のほか、まぶしいときに目を細める動作などの繊細なまぶたの動作にかかわる随意筋とされている。眼輪筋眼窩部は、内眼角に発し、

眼窩周囲を前額から外眼角、そして頬骨上を経て内眼角に戻る輪状の括約筋であり、眼瞼を強く閉じるときに動作するとされる。眼輪筋涙嚢部は、涙骨の眼窩面にある後涙嚢稜に発し内眼角に至る。涙嚢に接することによって涙嚢を拡大させ、涙液が鼻涙管を経て鼻腔に流出するのを助ける働きがある。また、眼瞼後面を眼球表面に密着させて、涙液がその隙間に拡散するのを助けるとされている [58]。

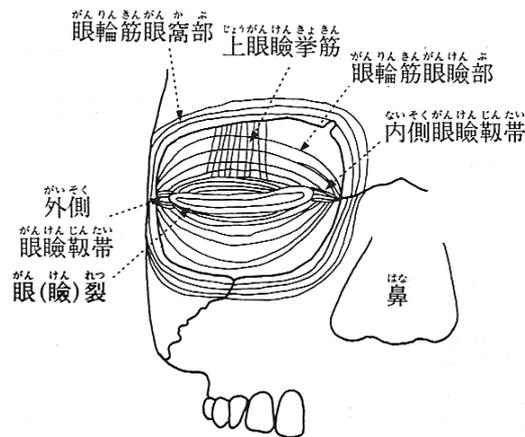


図 2.13: 眼輪筋とその周辺 [58]

## 2.5.2 瞬目の役割と性質

普段、我々が覚醒しているときには、まぶた（眼瞼）が開閉する。この開閉の動作を瞬目と呼ぶ。瞬目過程の閉眼中には、眼瞼によって数 100 ミリ秒の間の視覚情報が遮断される。このような不利にもかかわらず、通常は 1 分間に数 10 回の瞬目が生じる。瞬目によって視覚情報が遮断された状態をブラックアウトという [58]。このブラックアウトの持続時間は約 100 ミリ秒程度であるといわれているが、目の前が暗くなったようには感じない。これは、瞬目の際に視覚感度が低下するためである [47]。この視覚感度の低下は、後述するいずれの種類瞬目でも生じることがわかっており、上眼瞼が瞳孔を覆う 30 ミリ秒～40 ミリ秒前に最も低下する [47]。この視覚の抑制が起こる神経機構として、開眼ではなく閉眼に強く関係して

いることが示唆されており，眼瞼を動かす神経信号に関連した中枢による随伴発射ではないかと推論されているが，詳細は不明である [47].

瞬目には，眼球の保護および湿潤の役割がある．たとえば，目の前に異物が現れると，その侵入を防ぐために瞬目が生じる．また，目の中に異物が侵入した場合には角膜が刺激されて瞬目が生じる．その時に生じる瞬目は，涙腺からの涙液を眼球全体に広げて，異物を外に流出させる役割を果たす．このほか，瞬目には眼筋を休息させるために生じるとも考えられている [58].

瞬目は一般に，閉眼時よりも開眼時の方が遅い動きになり，とくに，自然と生じる瞬目（自発性瞬目）では，開眼時の後半の変化がかなり緩やかになり，ゆっくりと完全な開眼状態に戻る [47]. 瞬目の発生頻度は，1分あたりの発生回数によって表現されることが多い [58]. 被験者の置かれた状態によっても変化するが，通常時は1分間に15回 [47]～20回 [58] 程度の瞬目が発生する．

### 2.5.3 瞬目の種類

われわれが日常で体験している通り，瞬目は自然と生じる．瞬目の発生回数は，目に何らかの異物が入った時や，ものをじっと見たあとに増加し，ものを見ている最中や考え事をしている時などには減少する．このように瞬目に影響する要因は様々であり，瞬目について調査した研究者は，その役割や心理状態との関係を明らかにすることを目的としてきた．それらの瞬目研究において，瞬目をいくつかの種類に分類することにより，その役割などを捉えている．

眼科医であった Hall は，瞬目を反射経路の明確なものと不明確なものの2つに分類した [58]. 瞬目の原因が特定できるものを反射性瞬目とし，その原因として「角膜への接触」，「突然のまぶしい光」および「脅威事態」の3つに分けている．そして，原因なしに生じるものを不確定性機序瞬目とし，それらの例として眼球の表面を一定の湿潤状態に保つなどの生理的な働きを持つ瞬目や，興奮や緊張などの心理状態で生じる瞬目について述べている [58].

生理学者の McEwen と Goodner は、瞬目を末梢反射性瞬目、中枢反射性瞬目および周期性瞬目の3つに分類している [58]。末梢反射性瞬目は、視神経、三叉神経、聴神経を入力経路として生じる瞬目であるとしている。中枢反射性瞬目として、末梢神経よりも上位の中枢を想定し、くしゃみ、あくびなどの協同運動として生じる瞬目を挙げており、出力経路は顔面神経であるとしている。周期性瞬目とは、反射経路からの入力がなくとも周期的に生じるものとしている [58]。

生理学者の Moses や Records は、随意性の有無によって随意性瞬目と不随意性瞬目に分類している [58]。随意性瞬目は随意にコントロールできる瞬目であり、この中には人に何らかの合図を送る時などに頻繁に行なうような瞬目も含まれ、我慢することもできる。不随意性瞬目は、コントロールできない瞬目で、これはさらに反射性瞬目と自発性瞬目に分類される。反射性瞬目は外からの刺激によって引き起こされるものであり、自発性瞬目は反射性瞬目のような誘発刺激によらない瞬目であると述べている [58]。

心理学者の Stern らは、瞬目を随意性瞬目、反射性瞬目および内因性瞬目の3つに分類している [59]。随意性瞬目は、実験操作的に実験者の要請に応じて行なう瞬目である。反射性瞬目は、生体の防御反応で、生体を傷つける可能性のある刺激に対して生じる瞬目である。内因性瞬目とは、外的刺激が特定できない瞬目で、その瞬目の特性が認知過程や注意の程度と関係することを示唆している [58]。

これらの研究をもとに、田多らは、瞬目が心理状態とどのように関わるのかを明らかにする目的で、瞬目を随意性瞬目、反射性瞬目および自発性瞬目の3つに分類した [58]。随意性瞬目は、被験者の意思の関与が明確な瞬目であり、上述の Moses, Records および Stern らの定義に従っている。反射性瞬目は、外的刺激に対する瞬目潜時（瞬目が生じるまでの時間）が数 10 ミリ秒程度のものと定義している。自発性瞬目は随意的でもなく、外的反射誘発刺激を特定できない瞬目を指す。

本論文においても、被験者に生じる瞬目を分類して取り扱う。本論文では、瞬目の情報をトリガとして用いる入力インタフェースの開発が目的であり、分類する際に注目すべき点は被験者の意思の有無についてである。したがって、田多ら

と同様に、本論文においても被験者が意図的に生じさせる瞬目を随意性瞬目と定義する。また、それ以外の瞬目は不随意性の瞬目とみなすことができるが、著者が実施した各実験において外的刺激を明示的に与えることはないため、本論文においては随意性瞬目以外を自発性瞬目と呼ぶことにする。

#### 2.5.4 瞬目計測の歴史

瞬目に関する研究において、自発性瞬目の分析は比較的早い時期から行われていた。1927年に、生理学者の Ponder らは個人差や環境条件による瞬目への影響を詳細に調査し、結果を発表した [60]。この調査は生理学的な観点のみでなく、怒り、興奮、緊張などの心理学的な要因にもおよび、心理的要因の変化によって瞬目の増減が生じることを明らかにした。それまで、自発性瞬目は、角膜の乾燥を防止するために周期的に生起するとだけ考えられており、この Ponder らによる調査は新たな視点を与える画期的なものであった [58]。

この自発性瞬目の分析において、自動計測法を用いたことが述べられている。被験者の頭部に支柱の付いたバンドを装着し、その支柱が軽量のばねと絹糸を介して上まぶたに接着されている。ばねはプラチナ製の2つの端子に接触しており、通常は閉回路を形成している。この閉回路が、瞬目によって切れることでその動作を記録できる。信号の記録はすすを塗った記録紙上に行われた。この自動計測が実施できない場合には、被験者を目視によって観察し、瞬目生起時に観察者が押下するキーの信号を記録して解析に用いたことも述べられている [60]。

Spence らは 1951 年に、ポテンシオメータ法を提案した [61]。この方法は、頭部に装着するバンドにポテンシオメータが取り付けられており、回転軸に直角にレバーがつけられている。このレバーの先に糸が追加されており、糸が被験者の上眼瞼に接着されている。閉眼時にはまぶたに引かれてポテンシオメータが回転し、開眼時にはレバーがばねによって自動的に戻る。こうしてポテンシオメータから得られる電気信号を増幅して記録すると、瞬目の波形として記録することができる。

Gordon らは 1951 年の論文において、急峻な眼球運動および瞬目生起時における眼輪筋の筋電位を測定し、それぞれの動作において活性化する運動単位について調査している [62]。この研究は、筋電位の計測によって、瞬目測定が可能であることを示している。この眼輪筋の筋電位を測定する方法は、その後の反射性瞬目の研究に多く採用された。

内藤らは 1969 年に、幼児を対象とした眼瞼の条件反射を調査するため、光センサ法による瞬目計測を行なっている [61]。この方法は、それまでに多かった機械式計測のようにまぶたへの絹糸などの貼り付けを不要とし、筋電位測定による方法にみられる眼球や頭部移動によるノイズの影響を回避できるため、とくに被験者が動くことの多い幼児を対象とした研究に適していた [61]。

1974 年には、Osborne らが EOG 法による瞬目計測によって得た波形が、眼瞼の動きを忠実に再現することを報告した [63]。とくに、この報告では EOG の計測のための電極と、機械式測定のひとつであるポテンショメータ法による測定のためのヘッドバンドの両方を装着し、同一の瞬目を対象とした波形比較を行なっている。同様の比較を山田らも行なっており [58]、これらの結果から EOG 法と機械式測定法が同一の波形を得られることが明らかとなり、EOG 法による瞬目計測法は広く採用されるようになった。

福田は 1989 年に発表した心理学分野の瞬目研究において、瞬目時の上眼瞼の運動を動画像として記録し、手動で解析した [58]。この研究では、30 フレーム/秒で撮影した動画像の各フレームを静止画像として手動で計測し、その結果をトレースすることで瞬目過程における眼瞼裂の大きさを波形として得ている。当時は、動画像の自動解析は不可能であるとされており、その計測に膨大な労力を要することから自動測定装置の開発が望まれていた。

田辺らは 1993 年に、心理学の分野における瞬目解析のため、録画済みの動画像向けに画像処理による瞬目の自動抽出法を提案した。この研究では、画像中の上眼瞼の領域を、眼球領域との色情報の違いによって逐次抽出し、その面積変化によって瞬目過程を波形として取得した。この手法以降、画像解析による瞬目計測

法がさかんに提案されるようになり、それまで目視による手操作で1フレームずつ行なっていた瞬目動画像の解析が、自動化できるようになった。

山本らは1995年に、自動車運転中のドライバの意識低下を測定する目的で、前面から撮影した動画像の画像解析によって上下のまぶた間の距離を計測し、瞬目の生起を検出するシステムを提案した[64]。それまで、ドライバの瞬目情報についてもEOG法によって計測が行なわれており、ドライバの視界や動作の制限が懸念されていたが、この非接触の方式によってそれらの問題を回避した。

これとほぼ同時期の1996年、松尾らによって、撮影された動画像から瞬目生起の情報を自動解析するシステムが提案された[65]。このシステムでは、録画済みの動画像を、1/60秒のサンプリング周期で取り込み、専用の画像解析ハードウェアによって処理することで、上眼瞼の変位データを記録している。この方法で得た瞬目の波形データが、同時に計測したEOG法による波形と同様になることが示されている[65]。

1997年には、Esakiらの角膜反射法による視線文字入力システムに、画像解析によって瞳孔面積を算出し、瞬目によって入力決定する機能が採用された[8]。翌年には、コミュニケーション支援装置に応用するため、矢野らが画像処理ハードウェアを搭載したパソコンに顔を撮影した動画像を入力し、フレーム間差分によって瞬目生起時の検出を実現した[66]。同年に、加納らは、コミュニケーション支援を目的とし、画像を入力としたニューラルネットワークによって、瞬目計測および随意性瞬目の識別を実現した[67]。

このように、瞬目計測は生理学や心理学の分野で考案されたものが、計測時の制約条件や計測データの使用目的に応じて改良され、発展してきた。今日ではポテンショメータ法による計測はみられないが、EOG法、光センサ法および画像解析法による測定は利用されており、入力インタフェースにも応用されている。

## 2.5.5 瞬目計測法

2.5.4 項で述べた通り、瞬目の動作は対象となる研究分野が多く、種々の計測法が提案されている。本項では、これまでに提案された瞬目計測法について列挙し、概説する。

### 2.5.5.1 EOG 法

眼球近傍に配置した電極によって、瞬目生起時に生じる電位変化を捉えることで計測を行なう方法である。2.2.3 項において、眼球運動によって生じる電位変化を測定することで、視線の移動を計測できることを述べた。このとき瞬目が生じると、それにともなって、垂直方向の計測信号に視線移動とは別の電位変化が混入する。この急峻な電位変化を捉えることができれば、瞬目を検出できる [58]。具体的な測定法としては、眼球をはさむように電極を上下に配置し、そこから得られた電圧を増幅すると、瞬目に同期した鋭い波形が得られる [58]。

瞬目時に EOG の波形において急峻な電位変化が生じるのは、瞬目時に起こる眼球の上転運動 (Bell 現象) による影響が大きいと考えられていたが、いくつかの反証がみられる [58]。この他の理由として、瞬目にともなって上眼瞼裏の結膜と角膜との接触面積が変化することによる、電気抵抗および静電容量の変化が挙げられる [58]。開眼時には、前額部と頬骨部電極にほぼ等しい電位である。瞬目にともなって上眼瞼が下降すると、上眼瞼裏の結膜部は涙液を介して角膜との接触面積を増す。これにともなって、角膜電位は上眼瞼結膜を経て前額部に及ぶ。そして、前額部と頬骨部電極に電位差が発生する。この電位差が、急峻な変化として測定される。

この EOG 法における電位変化は、眼瞼の運動と直線的に対応するため、瞬目過程の解析に都合がよい [58]。なおかつ、上眼瞼運動にともなう変位をポテンシオメータによって測定する機械式測定法による電位変化と比較し、類似した波形として得られることがわかっている [58, 63] ため、まぶたへの絹糸の貼り付けなど被

験者への比較的大きな負担のある機械式測定法の弱点を回避した，標準的な瞬目計測法となっている [58].

#### 2.5.5.2 光センサ法

光センサ法は，可視光または赤外光を眼球近傍に照射し，瞬目にともなう反射光量の変化を計測することによって瞬目を検出する方法である．実際には，被験者が光源および光センサ（CdS，フォトランジスタまたはフォトダイオードなど）を取り付けた眼鏡 [58] や，ヘッドバンド [68] を装着する．図 2.14 に眼鏡装着型の光センサ法計測装置の例を，図 2.15 にヘッドバンド装着型の光センサ法計測装置の例を，それぞれ示す．



図 2.14: 光センサ法の計測装置例 1（眼鏡型） [58]

図 2.14 および図 2.15 から明らかなように，光源と光センサは眼鏡のフレームやヘッドバンドから延長した支柱などによって眼前に配置され，被験者の角膜に光源を照射する．瞬目が生起すると，角膜が眼瞼に遮られることによって照射位置の反射率が変わり，光量の変化が生じる．このときの電気的变化を捉えることで瞬目生起の情報が得られる [58].

可視光を計測する場合には，測定した信号波形に対し外部光量が大きく影響することがある．そのため，2つのフォトランジスタを額と角膜にそれぞれ向けて，それらをブリッジ回路に隣り合わせに入れて，外部光の影響を相殺する方法が提案された [61]. これとは別に，外部光の影響を抑えるため，赤外線 LED と赤外線

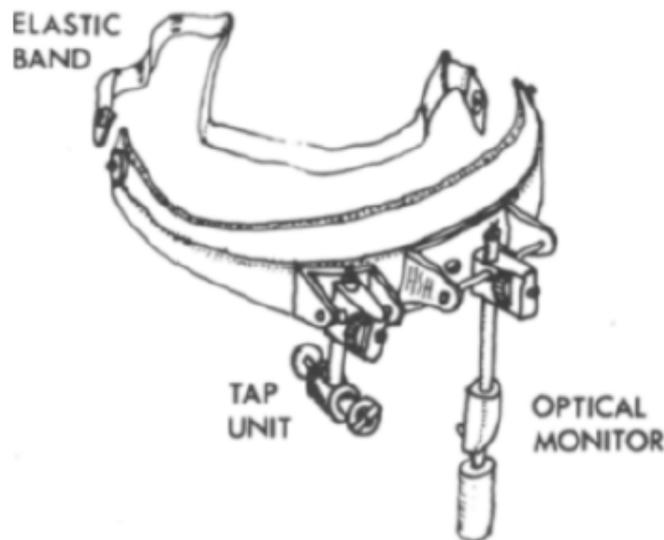


図 2.15: 光センサ法の計測装置例 2 (ヘッドバンド型) [68]

フォトトランジスタの組み合わせによって本手法を実現する方法も提案されている [68]. さらに, 近年では角膜と眼瞼の反射率の違いによる光量変化ではなく, 瞬目時に生じる眼瞼の形状変化にともなう眼瞼とセンサ間の距離変化による光量変化を計測し, 瞬目を検出する方法も検討されている [37].

光センサ法は非接触の計測が可能であり, 被験者の負担は比較的小さいものの, 光源や光センサなどの専用装置が原理的に必須である. 角膜と眼瞼の反射率の違いによって瞬目検出を行なう場合, 瞬目時に得られる信号波形において, 眼瞼の動作と得られる電圧値との間の線型性は必ずしも高くなく, 詳細な瞬目過程の記録には適さない. しかし, 眼瞼の条件反射についての調査や自発性瞬目の発生頻度の分析などを対象として, 瞬目の有無を検知する目的には十分である.

### 2.5.5.3 画像解析を用いる方法

眼球近傍の瞬目過程をビデオカメラによって撮影し, 得られた動画像に対して画像解析を適用することで, 瞬目の生起情報や瞬目の形状の特徴情報を計測する方法である.

画像解析による瞬目計測法においてよく用いられるパラメータは、テンプレートマッチングの相関係数である [23, 32, 33]. あらかじめ、開眼時の眼球近傍画像をテンプレートとして記録しておき、テンプレートマッチングによって眼球位置を追跡する。瞬目が生じたときには開眼中のテンプレートとの相関係数が低下するため、その変化が大きくなった時点を瞬目の生起として検出できる。また、頭部に固定した Web カメラによって眼球を撮影する視線計測システムにおいては、閉眼中のテンプレートとのテンプレートマッチングにより、相関係数が大きくなったときに瞬目を検出しているものもある [20].

自然光下で得た眼球近傍の画像では、日本人（アジア人）を対象とすると、虹彩および瞳孔を含む黒目の領域と白目や肌などの領域との間で輝度や色情報が大きくことなる。このことから、眼球近傍の面積に関するパラメータとして、黒目領域に着目して瞬目を検出している例がみられる。具体的には、自然光下で得た眼球近傍画像を 2 値化処理し、黒目部分の面積変化をパラメータに用いている例がある [34]. また、眼球近傍画像から黒目部分の幅および高さから矩形の面積をもとめ、黒目領域の近似値として用いているものもある [35].

色情報を用いて瞬目計測を行なう例としては、眼球開口部の領域が無彩色（白目および黒目）から有彩色（肌色）になることを利用して、画像処理により瞬目中の眼瞼領域の変化から瞬目の過程を計測する方法が提案されている [69]. Królak らは、眼球開口部の輪郭を抽出することによって、瞬目を計測することを試みている [31].

Su らは、黒目位置の上下左右に設けた矩形の小領域におけるオプティカルフローによって瞬目を計測している [70]. そのほか、時間遅れニューラルネットワークを構成し、眼球近傍の画像を入力として学習させて瞬目の検出および随意性瞬目の識別を行なう方法も提案されている [67, 71].

赤外線照明を眼球領域に照射し、赤外線カメラによって得られる画像では、瞳孔の領域の輝度が虹彩などの周囲の領域よりも暗くなる。瞬目が生じると、眼球の開口部全体がまぶたによって隠され、瞳孔の領域が小さく撮影される。この特

徴を利用すると、角膜反射法などの赤外線照明を用いる方法において、この瞳孔の大きさの変化を計測し、瞬目を検出することができる [72]. Esaki らは、角膜反射法の視線入力に用いる瞳孔領域の抽出手法として、赤外線カメラの周囲に輪状に配置した赤外光照明と、カメラの光軸から離れた位置に配置した赤外光照明の2つを切り替え、明瞳孔画像と暗瞳孔画像を得る方法を提案した。これらの画像の差分によって瞳孔の領域が得られ、上述の角膜反射法 [72] と同様に、その面積によって瞬目を検出できる [8].

#### 2.5.5.4 その他の方法

2.5.5.1 目～2.5.5.3 目で述べた方法の他の瞬目計測法として、磁気センサ法と COG 法がある [58]. 磁気センサ法は、被験者の上眼瞼に小形の磁石を取り付け、眼鏡に取り付けたホール素子によって上眼瞼の上下運動を計測する方法である。初期に Lintz らの提案した手法では、地磁気などの影響が大きかったが、吉田らが2つのホール素子によって定常的な磁界を打ち消す方法を開発し、この問題を解決した。この方法は、EOG 法と類似の瞬目波形が得られ、なおかつ脳波や筋電などのノイズの影響が小さい。また、測定のためのセンサを眼鏡に固定するため、被験者の不快感が少ない。ただし、上眼瞼の形状や磁石の接着位置によって波形が変わる点と、磁石を上眼瞼に接着するため負担がかかる点が弱点として挙げられている [58].

COG (capacito-oculography) 法は、電気容量センサを用いた眼球運動および眼瞼運動の計測法である [58]. 眼球の前方約 10 ミリメートルの位置に、発振回路および共振回路と並列に接続された一对の電極を設置する。眼球運動が生じると、この電極と眼球表面との間に生じている電気容量が変化し、発振周波数に偏位が生じる。この周波数の偏位を検出することで、眼球運動を計測できる。この方法によって、非接触な瞬目計測が可能であることが明らかになっている [58].

## 2.6 瞬目入力システム

瞬目入力システムは、瞬目計測を用いてユーザの入力意図を感知し、コンピュータの操作などを行なう。本節では、瞬目入力システムについて、その入力の決定方法に着目して分類し、概説する。

### 2.6.1 瞬目入力システムの決定方式

瞬目の情報を入力インタフェースの操作に用いるためには、ユーザが意図的に生じさせる随意性瞬目を識別する必要がある。EOG法による瞬目計測においては、角膜網膜電位波形から得た振幅の情報によって、自発性瞬目と随意性瞬目を識別することができる [11, 73]。画像処理によってユーザの瞬目を検出する場合には、何らかの特徴的な瞬目パターンにより随意性瞬目を識別する方法が提案されている。特徴的な瞬目のパターンとして、一定時間以上の随意性瞬目を行なうことで自発性瞬目と区別する方法 [8, 28, 30, 31, 33, 34, 35, 36] と、連続した複数回の瞬目を行ない、随意性瞬目を識別する方法 [23, 24, 25] がある。また、片眼のみの瞬目（いわゆるウィンク）を随意性瞬目として識別するものもある [6, 21, 25, 26, 27]。

本項では、本研究に関連の強い画像解析法について、随意性瞬目を識別する方法の現状を述べる。

#### 2.6.1.1 瞬目の持続時間による方式

瞬目入力システムは、EOG法を採用したもののほかに、光センサ法または画像解析法を採用したものが提案されている。これらの瞬目入力システムにおいて、随意性瞬目を識別するための特徴パラメータとして、瞬目の持続時間を採用しているものが多い。瞬目の持続時間を用いて識別を行なう場合には、識別の基準値、すなわち持続時間のしきい値を設定し、対象の瞬目の持続時間がそれをこえた場合

に随意性瞬目と判定する。この持続時間のしきい値の決定方法には、入力システムの設計者によって工夫がみられる。

もっとも単純なものは、持続時間のしきい値をユーザ間で共通の固定値とする方法である。持続時間のしきい値を固定にした場合には、ユーザがシステムの動作条件に合わせて瞬目を行なうため、個人ごとのキャリブレーションが不要になるという利点がある。

あらかじめ複数人の瞬目持続時間を計測して求めた最小値を共通の固定値として、持続時間のしきい値に採用した瞬目入力システムが提案されている [30]。この他に、持続時間のしきい値を固定にしておき、随意性瞬目と判定される持続時間に達したときに音声によってフィードバックする瞬目入力システムも提案されている [28]。このシステムでは、200 ミリ秒と 500 ミリ秒の 2 段階に持続時間のしきい値を設け、2 種類の入力意図を識別できるようにしている。これらのシステムは、2.3.1.1 目で述べた 1 スイッチ法の入力スイッチとして、瞬目の実行を代替することで動作している。

新井らは、専用の眼鏡型デバイスを用いた視線による文字入力システムを開発した [20]。このシステムに用いるデバイスは、小形のディスプレイと Web カメラがそれぞれ片眼ずつの眼前に位置するよう固定されている。この小形のディスプレイに縦 3 個 × 横 3 個の 9 個の指標が表示されており、指標に割り当てられた所望の文字などを選択する。このとき、指標の判別のために 9 個の指標それぞれを見たときの眼球近傍画像をテンプレートとして記録しておき、テンプレートマッチングによって注視指標が識別される。入力決定のために閉眼中の眼球近傍画像もあわせて記録しており、瞬目も同様に検出できる。このシステムにおいて、随意性瞬目の判定には 300 ミリ秒という固定値を持続時間のしきい値として用いている。

Królak らは、1 スイッチ法のトリガとして随意性瞬目を用いた瞬目入力システムを提案した。瞬目を検出するために、顔画像中の眼球近傍領域を追跡しており、その際に開眼状態の眼球近傍画像をテンプレートとしたテンプレートマッチング

の相関係数を逐次求めて、瞬目検出のための波形として用いている [31]. 瞬目種類の識別には、瞬目の持続時間のしきい値として、200 ミリ秒という固定値を採用している. Marnik らは、1 スイッチ法によるマウスカーソル操作システムを開発している. このシステムにおいてもテンプレートマッチングによる瞬目検出を行っており、持続時間が 500 ミリ秒～1500 ミリ秒の範囲の瞬目を随意性瞬目として識別している [33].

この他、画像解析を用いた角膜反射法において、Esaki らが瞬目による決定を採用した文字入力システムを開発している [8]. このシステムでは、瞬目にともなって瞳孔領域がまぶたに遮られ、その面積が減少することを利用して瞬目を検出している. 具体的な数値は示されていないが、持続時間にしきい値を設けて随意性瞬目を識別していることが述べられている.

落合らは、顔姿勢の変化によって生じる撮影画像中の眼球位置の移動を検出し、ソフトウェアキーボード上のカーソルを操作する文字入力システムを開発した [34]. このシステムでは閉眼時と開眼時の顔画像間の差分を求め、その 2 値化画像の水平および垂直方向のヒストグラムから初期の眼球位置を求める. その後、前フレームの眼球位置をもとに 2 値化処理およびラベリング処理を用いて眼球領域を逐次特定し、画像中の眼球位置を追跡する. 瞬目の検出には、眼球近傍領域の 2 値化により求めた面積をパラメータとして用いる. 入力のために瞬目の持続時間によって随意性瞬目を識別することを述べているが、瞬目の持続時間のしきい値として用いた具体的な数値は示されていない.

柘植らは、上述したような顔姿勢変化にともなう眼球位置の移動を、マウスカーソルの操作に応用した入力インタフェースを開発した [35]. このシステムでは、黒目に当たる部分を探索するため、十字形のテンプレート [36] を用いて眼球位置の追跡を行なっている. このシステムでは黒目の幅と高さを計測し、その面積を概算した値を瞬目検出のパラメータとして用いている. 随意性瞬目は、瞬目の持続時間が 0.5 秒～1 秒のものを識別しており、これをクリックのコマンド入力として用いている.

中村らは、光センサ法による瞬目計測を行なっている [37]。眼鏡に赤外線 LED とフォトトランジスタの対をセンサとして水平に 6 個並べ、眼瞼とセンサとの距離を計測する。このシステムにおいて、瞬目の持続時間による瞬目種類識別が行われており、持続時間のしきい値は 300 ミリ秒である。

持続時間のしきい値をユーザ間で共通にしない場合には、瞬目の持続時間をシステムの使用初期に取得すれば、個人ごとの持続時間の偏りに対応することができると考えられるが、このような仕組みを採用している瞬目入力システムは見当たらない。

#### 2.6.1.2 瞬目の回数による方式

中西らは EOG 法を採用した瞬目による車椅子の操作システムを開発した [25]。このシステムは瞬目のみの動作によって操作可能であり、車椅子の前進または停止の切り替えにダブルブリンク、すなわち 2 連続の瞬目を採用している。この研究では、500 ミリ秒以内に複数の瞬目が含まれた場合をダブルブリンクとして識別している。

Krapic らは、自然光下の画像処理により、顔姿勢の変化によって操作するマウス操作インタフェースのための、瞬目種類識別法を提案している [23]。この方法では、随意性瞬目をマウスクリックのコマンドに割り当てることを目指しており、目的のクリック回数より 1 回多くの瞬目、すなわち 1 回のマウスクリックを実行するために 2 回の瞬目を行ない、ダブルクリックのためには 3 回の瞬目を行なう。

Gorodnichy は、自然光下の画像処理を用い、顔姿勢の変化として鼻の頭頂部を特徴点として用いるマウス操作システムを開発している [24]。このシステムでは、ダブルブリンクによってマウスカーソル動作のオンとオフを切り替えることができる。

瞬目の回数による方式は、瞬目の持続時間による方式の持続時間のしきい値のような、瞬目の形状の特徴にもとづく設定は不要になるが、ユーザは随意性瞬目

のたびに実行中の瞬目の回数を数える必要がある。また、自発性瞬目が連続して生じることもあるが、その場合には誤入力につながる。

### 2.6.1.3 ウィンクによる方式

入力意図を示す随意性瞬目を、ユーザが片眼の瞬目、つまりウィンクをすることで識別するシステムがある。岸本らは、両眼を含む顔画像を入力するカメラから得た画像を処理し、視線の上下左右の眼球運動を検出する視線入力システムを開発した。この入力決定に、片眼の閉眼を用いている [21]。

また、2.6.1.2 目に述べた中西らによる EOG 法を採用した車椅子の操作システム [25] では、ダブルブリンクのほかに、車椅子の左右の移動のために左眼および右眼のウィンクを採用している。自発性瞬目では、垂直方向の EOG 波形のみにピークが生じるのに対し、ウィンクでは水平方向と垂直方向の両方にピークが生じることから、それらの識別が可能となる。

Missimer らは、顔画像中の上唇の位置を追跡し、マウスカーソルを操作する入力システムを開発した [26]。このシステムでは、上唇位置をオプティカルフローによって追跡し、画面上の上唇位置の変化に応じてマウスカーソルを移動する。入力決定の方法にウィンクを採用しており、上唇と同時に追跡する両眼それぞれの眼球領域を対象に、テンプレートマッチングの相関係数をパラメータとして片眼の瞬目を検出している。入力決定の機能として、左右のウィンクそれぞれに左右のマウスボタンクリックのコマンドを割り当てている。

海老澤は、ビデオカメラと光軸を合わせた赤外光照明によって得られる明瞳孔画像から、瞳孔位置を検出し追跡することで頭部位置を追跡するシステムを提案している [27]。このシステムでも、Missimer らのシステムと同様に左右のウィンクを、それぞれ左右のマウスクリックのコマンドに割り当てている。

ウィンクによる方式は、瞬目の持続時間や瞬目の回数をユーザがカウントする必要がない。しかしながら、ウィンクすることができないユーザがいることも報

告されており [26], この方式が利用できない場合がある。

## 2.6.2 瞬目入力における決定方式の現状

2.3.1 項で述べてきたように、視線入力にはさまざまな方式がある。著者は過去に、画像解析による視線入力システムを開発した。この視線入力システムは、赤外光照明を用いることなく自然光下で利用でき、EOG 法のように電極などを装着する必要がなく、非接触で計測が可能である。とくに、計測に用いるビデオカメラに一般的に市販されているものを用いて、画像処理をパソコンのソフトウェアによって行なうことで、一般のユーザが家庭などでも利用できるようなシステムの構成を目指してきた。

この視線入力システムの選択方式には、2.3.1.3 目で述べた指標を注視する方式を採用しており、12 個の指標群の機能を適宜切り替えて操作可能であった。このシステムでは、入力の決定のために注視による方式を採用しており、視線移動のみによる操作が可能になった。しかし、より良いインタフェースを構築するためには、ユーザの負担が小さく、なおかつユーザ自身が主体的に実行できる入力決定の方法が求められる。

視線入力の決定方式として、注視による方式、瞬目による方式および特定領域への到達による方式の 3 種類があることを 2.3.2 項で述べた。注視による方式は、入力意図を持った注視を判定するための停留時間のしきい値の設定が必要である。この停留時間のしきい値が大きくなると 1 選択あたりに要する時間が大きくなり、全体の入力時間が大きくなる。停留時間のしきい値を小さくすると 1 選択あたりに要する時間は短くなるが、入力意図のない視線の到達を注視と判定する場合があります。誤選択を生じやすくなる。この停留時間のしきい値の設定は、入力時の視対象となる指標上に示される字数などの情報量や、指標の大きさ、ユーザの個人差などの要因によって最適値がことなり、適切に設定することは難しい。さらに、長い時間にわたって 1 か所を注視し続けることは、ユーザの負担が大きい。

特定領域の到達による方式では、注視点の特定領域への到達によって即時に入力が行なわれるため、注視による方式のような停留時間の設定が問題になることはなく、注視によって入力に時間を消費することもないため、速やかに入力が可能である。しかしながら、これまでに提案されたシステムでは、高精度な視線計測法が必要であり、適用可能な視線計測法が限定される。また、所望の入力を行なうために、システムに固有の特殊な視線移動が必要になるため、注視による方式のシステムと同様に使用できるまでに訓練を要するという報告もあり、この点がユーザの負担になり得る。

瞬目による決定方式には、瞬目の持続時間による方式と、瞬目の回数による方式およびウィンクによる方式があることを 2.6.1 項で述べた。瞬目の持続時間による方式は、入力意図を持つ随意性瞬目と、自然に生じる自発性瞬目との間に瞬目の持続時間のしきい値を設定して識別を行なう。このときに設定する値はシステムによって、短いものでは 200 ミリ秒としているが、長いものは 5 秒に設定しており、大きくことなっている。この持続時間のしきい値は、システムごとに経験的または統計的に決定した固定値を用いており、瞬目の持続時間のパラメータに現れる個人差は考慮されていない。

瞬目の回数による方式では、2 連続の瞬目などによって随意性瞬目を識別する。この方式では、ユーザは持続時間を気にせずに入力できるが、実行中の瞬目の回数を数える必要があり、負担につながる。

ウィンクによる方式は、瞬目の持続時間や瞬目の回数を数える必要がなく、明確に入力意図を示すことができるが、ウィンクができないユーザがいることも報告されており、その場合にはこの方式が利用できない。

このような状況のもと、著者は、負担の少ない入力決定方式として瞬目の持続時間による方式に着目し、個人差を考慮した瞬目種類識別によって実現する入力決定法の開発を目指す。

## 2.7 コミュニケーション支援装置の利用状況の現状

ALS 患者などの重度肢体不自由者のコミュニケーションを支援するため、何らかの支援装置を用いることが多い。コミュニケーション支援装置の利用状況について、日本 ALS 協会の会員を対象とした調査結果が報告されている [74]。本節では、この調査結果をもとに、視線入力に限らない一般のコミュニケーション支援装置の利用状況の現状と、視線入力の利用状況について述べる。

この調査結果 [74] は、日本 ALS 協会の患者会員および家族会員の 1801 人を対象として行なわれたアンケートによるものであり、有効回答数は 469 件であった。この調査結果の中で、「コミュニケーション支援装置（IT 機器）を用いてコミュニケーションを行なっているか」との設問に、54.9 %の回答者が「機器を利用している」と答えている [74]。支援装置を利用している回答者の中で、もっともよく利用している機器を尋ねた設問に対し、73.2 %の回答者が具体的な 1 スイッチ法などによる走査入力方式の支援装置（伝の心 [75]、オペレートナビ [76] など）を挙げている。視線入力方式の支援装置（Tobii[53] など）についての回答は、3.4 %であった。そのほか、通常のパソコン（11.3 %）やタブレット PC（4.2 %）の回答もみられた [74]。このアンケートにおいて、それぞれの利用機器をどの程度使えているかという設問があり、ここで挙げられた唯一の視線入力装置である Tobii の利用者は、「とても使えている」と回答する割合が他の機器よりも高かった [74]。

この調査 [74] において、通常キーボードやマウス操作が困難な場合に利用している入力装置についても報告されている。複数回答の項目であり割合は不明であるが、使用している装置は各種のスイッチが多い。スイッチの種類としては、頭部、手の指、足など、様々な部位に向けたものが選べる接点式の回答が最多であった。操作方法も、単純に押すもののほか、握るもの、ひもを引くもの、センサを傾けるものなどがある [77]。ほかには、手の指か手掌でエアバッグを押す空気圧式 [77] や、頬、手の指、舌でセンサに触れることで操作する帯電式 [77] も多く利用されている。このように、入力装置としてのスイッチは多くの種類が用意されてお

り、ユーザにとって利用しやすいものと考えられる。

視線入力を用いる支援装置についての利用状況調査[78]についても、報告がある。この報告では、視線入力装置 Tobii[53] の購入者を対象としたアンケート（対象者 140 名、有効回答 36 件）を分析している。Tobii は、機器に内蔵された赤外光照明を用いて、角膜反射法によって計測を行なう視線計測装置である。この報告[78]によれば、利用目的について尋ねた設問（複数回答）においては、「日常的な会話」（17.1 %）や「介護要望や身体状況の伝達」（16.5 %）が多く、「呼び鈴（ナースコールなど）としての利用」（10.6 %）もみられた。また、「メールでのやりとりのため」（12.9 %）という回答も多く、IT 機器を用いないコミュニケーションでは難しい用途があることがわかる。Tobii 利用の満足度について 100 点を満点として尋ねたところ、100 点-50 点群が 75 % 程度であり、満足度の高い利用者が多いと結論付けている [78]。

ここで述べた調査結果 [74, 78] は、著者らの採用する方法とはことなる計測方式によるものであるが、これらの調査結果 [74, 78] より、視線入力によるコミュニケーション支援は、利用数の割合は少ないものの、利用することができれば高い満足度が期待できる方式であると考えられる。

## 2.8 視線入力に関する先行研究の知見と本研究の貢献

本研究は、瞬目による入力決定を行なう視線入力システムの開発を目的としている。とくに、随意性瞬目による入力決定法についての議論が本論文の主たる内容である。一方、多指標の選択を行なう視線入力の基盤システムは、著者の研究グループで行なった共同研究の知見を用いている。本節では、著者らの研究グループで開発した先行研究である、多指標選択式の視線入力システムについての概要を述べ、本研究で取り組んだ内容との区別を明確にする。

### 2.8.1 視線入力に関する先行研究の知見

本研究では、多指標を選択する視線入力システムに、随意性瞬目の動作による入力決定法を適用することを目指す。この多指標を選択する視線入力方式について、視線計測法の理論は先行研究においてすでに提案済みであった [79]。この研究には、著者の貢献は含まれていない。そして、この視線計測法を用いてシステム化した、注視によって入力決定する視線入力システムが、著者らの研究グループの共同研究として開発された [22, 80]。この注視によって入力決定する視線入力システムは共同研究であるものの、ビデオカメラから入力される眼球近傍の動画像を逐次処理するオンライン動作の実現や、文字入力を含むコンピュータの汎用的な操作を行なうアプリケーションの開発に著者が大きく貢献した [80]。本研究は、この注視によって入力決定する視線入力システムの入力決定部分を随意性瞬目による動作に置き換えることで、瞬目情報を用いた視線入力システムを実現する。

本研究で採用する視線計測法の詳細は5章で後述するが、水平方向に強膜反射法を応用した画像解析を用いており、垂直方向は画像の縦軸方向の光強度分布のマッチングによって実現している。この方式による視線計測の精度は、先行研究において指標を注視したときの判別率によってすでに評価されている [79, 81]。

文献 [79] において、図 2.16 に示す 27 個（水平 9 個 × 垂直 3 個）の指標群の指標判別率を検証している。図 2.16 において、指標の中心間隔は、水平方向は各 3 度、垂直方向は各 10 度である。この条件において、指標判別率は被験者 10 名の平均で約 86 %であったと報告されている。また、水平方向の指標数を 5（水平の指標間隔を 6 度）とした場合には、約 95 %の指標判別率を得られることを示しており、実用的なアプリケーションには水平方向の指標間隔を 6 度程度にするとういと結論付けている [79]。

文献 [81] では、文献 [79] と同じ垂直方向の視線計測法により垂直方向の指標判別率について詳細に検証している。図 2.17 に示すように垂直方向に指標を配置し、個数が 3, 5, 7, 9, 11（指標中心間隔が 9 度, 4.5 度, 3 度, 2.25 度, 1.8 度）の条

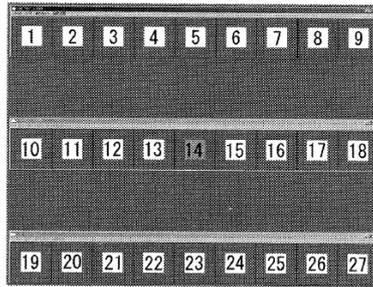


図 2.16: 指標判別率を検証した指標配置例 [79]

件で、垂直方向の指標判別率を求めている。その結果、被験者7名の平均で、垂直方向の指標数が3の場合に約99%、指標数が5の場合に約96%をそれぞれ示しており、実用上十分であるとしている [81]。指標数7の場合には指標判別率が約88%、指標数9の場合には約66%という結果が示されており、垂直方向の実用的な指標数の限界は5から7個と結論付けている [81]。

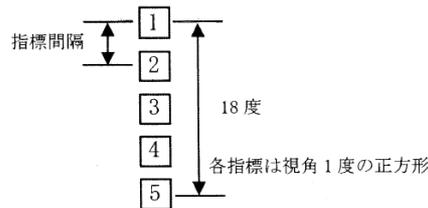


図 2.17: 垂直方向の指標判別率を検証した指標配置例 [81]

以上のように、先行研究における指標数の限界は、90%以上の識別率を目指すとして、水平方向に5個程度 [79]、垂直方向に5個程度 [81] となる。

本研究では、著者らの研究グループの共同研究 [22] において検討した、日本語文字入力のアプリケーションに適した水平方向6個の指標数を用い、図 2.18 に示すような12個の指標を5章で述べる視線入力システムに採用する。図 2.18 において、指標間隔は水平方向4.8度、垂直方向18度である。また、指標の大きさは、一辺が1.5度の正方形である。この指標配置における指標判別率は、被験者5名で約92.3%であった [22]。著者らの研究グループの共同研究において、この図 2.18 の指標配置を採用し、注視によって入力決定する日本語文字入力システムを

すでに開発している [22]. 5章では, この注視によって入力決定する視線入力システムをもとに, 随意性瞬目による入力決定を行なう新しい視線入力システムを開発する.

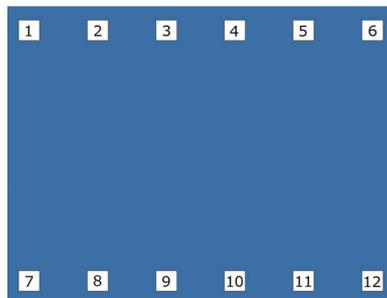


図 2.18: 5章で述べる視線入力システムに採用する指標配置

入力インタフェースの性能評価のひとつとして, 入力速度を比較する方法がある. 本論文においても, 5章で提案する視線入力システムの性能評価において, 入力速度による比較を行なう. ここで, 一般に入力成功率が同一の条件では入力速度が大きいほどよいと思われるが, 理論的な限界はどの程度であろうか. この疑問にこたえるため, 図 2.18 に示した指標群を用いた視線入力システムを想定し, 先行研究の知見にもとづいた最小の入力時間を求める. この理論的な最小の入力時間をもとに最大の入力速度の理論値を算出する.

図 2.18 では, 選択対象となる 12 個の指標があり, これらの指標群の中から目的の指標を選択し, 入力決定する. このときの手順は, (1) 複数の選択肢の中から目的のひとつを選ぶ手順と, (2) 現時点から目的の選択肢に向かって移動する手順, そして (3) 入力決定を行なう手順の 3 つに分けられる. (1) の手順および (2) の手順の入力時間を求めるためには, それぞれ Hick の法則 [82, 83] および Fitts の法則 [83, 84, 85, 86] が有効である. また, (3) の手順に要する時間は, 入力決定の方法によって決定づけられる.

Hick の法則は, 複数の選択肢から 1 つを選択するとき, 選択肢の数が多いほど決定に要する時間が大きくなることを示す法則 [83] である. 平均選択反応時間  $RT$  は, 各選択肢の選択確率が同一の場合に, 単純反応時間  $K$ , 選択肢の数  $n$  を用い

て、次式によって求めることができる [82].

$$RT = K \log_2(n + 1) \quad (2.3)$$

Fittsの法則とは、素早いポインティング操作を行なう際に、目標にたどり着くまでの時間は目標の大きさと目標までの距離に依存し、目標が小さくて遠いほど大きな時間を要することを示す法則 [83] である。目標にたどり着くまでの時間  $MT$  は、目標までの距離  $D$  と、目標の大きさ  $W$  およびシステムに依存する定数  $a, b$  を用いて、次式により求めることができる [84, 85]。なお、 $MT$  の算出式は式 2.4 に改良を加えたものも提案されている [86] が、本論文では、後の議論に用いる定数の算出時の条件 [85] に合わせ、文献 [84] による式 2.4 を用いる。

$$MT = a + b \log_2\left(\frac{D}{W} + 0.5\right) \quad (2.4)$$

そして、入力決定に要する時間を  $ST$  とすると、視線入力の1回あたりの入力に要する操作時間  $OT$  は、次のように求められる。

$$\begin{aligned} OT &= RT + MT + ST \\ &= K \log_2(n + 1) + \left\{ a + b \log_2\left(\frac{D}{W} + 0.5\right) \right\} + ST \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、目標（指標）の距離  $D$  および目標の大きさ  $W$  には、図 2.18 に示した指標配置の条件を用い、そのほかの各定数には文献値を用いて操作時間  $OT$  を求める。文献に示されている各定数を表 2.1 に示す。

表 2.1 の各定数を式 2.5 に適用すると、操作時間  $OT$  は次のようになる。

$$\begin{aligned} OT &= 150 \log_2(12 + 1) + \left\{ 298 + 176 \log_2\left(\frac{14.5}{1.5} + 0.5\right) \right\} + ST \\ &\doteq 555.1 + 886.9 + ST \\ &= 1442 [\text{ミリ秒}] + ST \\ &\doteq 1.4 [\text{秒}] + ST \end{aligned} \quad (2.6)$$

表 2.1: 操作時間の算出に用いる定数

定数名	定数の意味	値	引用元または算出方法
$K$	単純反応時間	150 [ミリ秒]	文献 [82]
$n$	1 選択あたりの選択肢 (指標) の数	12	図 2.18 の指標数
$a$	システムに依存する定数	298 [ミリ秒]	文献 [85]
$b$	システムに依存する定数	176 [ミリ秒]	文献 [85]
$D$	目標 (指標) 間の距離	14.5 [度]	図 2.18 の指標の指標間間隔の平均値
$W$	目標 (指標) 間の大きさ	1.5 [度]	図 2.18 の指標の 1 辺の長さ

式 2.6 の結果を用い、入力決定方式ごとに  $ST$  の値を代入すると、理論的な  $OT$  の値が得られる。3 秒間の注視による入力決定法を仮定すると、 $ST = 3.0$  [秒] の値が適用でき、 $OT = 4.4$  [秒] (1 分あたり約 14.3 回の選択) という結果が得られた。また、3 章以降で採用する「しっかり」と行なう随意性瞬目による入力決定法を仮定すると、この種の瞬目の持続時間は 0.7 秒程度 (10 名の平均値) [87] であるため、 $ST = 0.7$  [秒] の値が適用でき、 $OT = 2.1$  [秒] (1 分あたり約 28.6 回の選択) という結果が得られた。これらの入力速度が、図 2.18 の指標を用いた場合の理論的な限界と考えられる。

## 2.8.2 視線入力 of 課題と本研究で解決した課題

著者らが先行研究において開発した注視により入力決定する視線入力システムは、市販のビデオカメラからの入力を画像解析することにより、非接触の計測方式を実現した。この自然光下の画像解析による視線入力システムを前提とすると、入力決定法に関していくつかの課題がある。これらのうち、本論文で取り扱った課題の現状と本論文における解決法について、表 2.2 に示す。なお、表 2.2 には、文献 [28] を除き、自然光下の画像処理によって計測する手法の文献番号を示した。

まず、視線入力の入力決定法として随意性瞬目を採用する場合に、課題があっ

表 2.2: 視線入力課題と本研究で解決した課題

課題	現状	本論文での解決策	章番号
瞬目による 入力決定法	持続時間を一定以上に指定し、 個人差を考慮していない [20, 30, 31]	個人差を考慮した 随意性瞬目の識別による 精度の向上 [38, 87]	3 章
瞬目計測の キャリブレーション法	入力システムに適した 手順と要件が不明であった [87]	瞬目種類識別のための キャリブレーション法の確立 [38]	3 章
複数種類の 随意性瞬目 の識別	長時間の瞬目 [28]*, 複数回の瞬目 [23], ウィンク [26, 88] を識別	「しっかり」および「しっかり となるべく短く」行なう瞬目 の 2 種を識別 [41]	4 章
システム化	多くの被験者で検証した、視線 と瞬目による入力システムは 見当たらない (2 名 [17], 3 名 [20] の例にとどまっている)	視線と瞬目を利用した入力 システムを構築し、9 名の 被験者での入力成功を確認 [43]	5 章

\* 文献 [28] は、赤外光を用いた計測装置を採用している。

た。先行研究では、入力意図を示す随意性瞬目を自発性瞬目と識別するため、被験者に一定以上の持続時間を指示している例が多い [20, 30, 31]。これらの研究において、瞬目種類の識別のために設定する瞬目の持続時間のしきい値として、統計的または経験的に求めた固定値を用いており、個人差を考慮しているものが見当たらなかった。そこで、本研究では、個人ごとに瞬目計測のキャリブレーションを行なうことで実現した、個人差を考慮した瞬目種類識別法を採用し、瞬目種類識別率の向上を図った。

また、上述の瞬目計測のキャリブレーションの実用的な手順と要件が不明であるという課題があった。この課題に対し、本論文では、比較的少数の瞬目の取得によって完了する瞬目種類識別のためのキャリブレーション法を検討し、具体的な方法を確認した。以上の 2 つの課題について、3 章で述べている。

そして、より効率的な瞬目による入力決定を実現するため、複数種類の随意性

瞬目の識別法の実現が課題であった。従来は、通常の随意性瞬目に加えて、長時間の瞬目 [28]、複数回の瞬目 [23] およびウィンク（片眼の瞬目） [26, 88] を用いる方法が提案されていた。本論文では、ユーザが主観的に実行できる随意性瞬目として、「しっかり」と行なう瞬目と「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目の2種類を採用し、自発性瞬目との識別法を開発した。この2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別法について、4章で述べている。

さらに、瞬目による入力決定のシステム化として、従来の自然光下の画像解析による視線入力システムにおいては、2名 [17] や3名 [20] によって操作できたとの報告があるが、多くの被験者によって動作を検証した例はみられなかった。そこで、本研究では、著者らの先行研究で開発した多指標選択型の視線入力システムに瞬目計測および随意性瞬目（1種類）の識別処理を追加し、随意性瞬目によって入力決定可能な日本語文字入力システムを開発した。この視線入力システムの評価実験において、9名の被験者により漢字変換を含む文字入力の実験を行なったところ、対象とした被験者全員が課題の入力を完了でき、従来よりも多くの被験者が操作可能であることを確かめた。このシステム化についての詳細を、5章で述べている。

なお、本研究で取り扱わなかった視線入力の課題もあるが、それらについては6章で述べる。

# 3 画像解析による瞬目計測と キャリブレーション

本章では，瞬目情報を用いた入力インタフェースを構築するため，著者らが提案する画像解析による瞬目計測法について詳述する．また，応用システムの構築に向け，瞬目計測および瞬目種類識別のための初期キャリブレーションの方法について検討する．

## 3.1 画像解析による瞬目計測法の提案

瞬目の計測には，眼球近傍の皮膚に電極を貼り付け電位の変化を検出する EOG 法 [12, 73, 89] や，赤外線 LED などをまぶたに照射し反射光の強度変化をセンサにより検出する光センサ法 [37]，そしてビデオカメラで撮影された眼球近傍の画像を解析する方法 [30, 31, 66, 69, 70, 71, 72, 90] などがある．これらのうち，ビデオカメラで撮影された眼球近傍画像を解析する方法では，EOG 法のように電極などの接触の必要がなく，赤外線光源などの専用ハードウェアが不要であり，一般のユーザにとってシステムを導入しやすい利点がある．

EOG 法では，ユーザの動作によって電極から得られる信号変化を増幅し，A/D 変換してコンピュータに入力する．このとき，入力のサンプリングレートは数 100Hz のオーダーである [58]．瞬目は数 100 ミリ秒程度で一連の動作を完了する比較的高速な運動であり [47]，数 100 ミリ秒程度の速度があれば波形の概形を得ることができる．これを画像処理法によって実現しようとした場合，フレームレートが 30 フレーム／秒である一般的な NTSC ビデオカメラで瞬目の有無は検出できるが，その時間的変化の詳細な計測は難しいとの報告がある [65, 90]．そのため，瞬目の詳細な計測には高速度撮影が可能なビデオカメラを用いる手法が提案されている [90]．

著者らは、この課題に対処するため、一般的な NTSC または 1080i のハイビジョン規格のカメラにより 2 倍の時間分解能を実現する、フレーム分割法を採用した瞬目計測システムを開発した [87, 91, 92, 93]。一般的な NTSC ビデオカメラおよび、1080i のハイビジョンビデオカメラは、インタレース方式の動画像を出力する。インタレース方式の 1 枚のフレーム画像は、約 1/60 秒の時間差がある 2 枚のフィールド画像を偶数および奇数フィールドに畳み込んだ構成となっている。したがって、入力されたインタレース画像の偶数および奇数番目の走査線をそれぞれフィールド画像として抽出すると、垂直方向の情報量は半分になるが、2 倍の時間分解能を得ることができる。このように入力されたインタレース画像のフレームを分割する手法を、フレーム分割法と呼ぶ。図 3.1 に、フレーム分割法 の概念図を示す。このフレーム分割法により、瞬目の詳細な波形変化を取得可能にし、3.4.1 項で述べる、瞬目種類の識別に必要な特徴パラメータを十分に抽出可能であることを確かめた [93]。本研究では、このフレーム分割法を適用した画像処理による瞬目計測法を採用する。

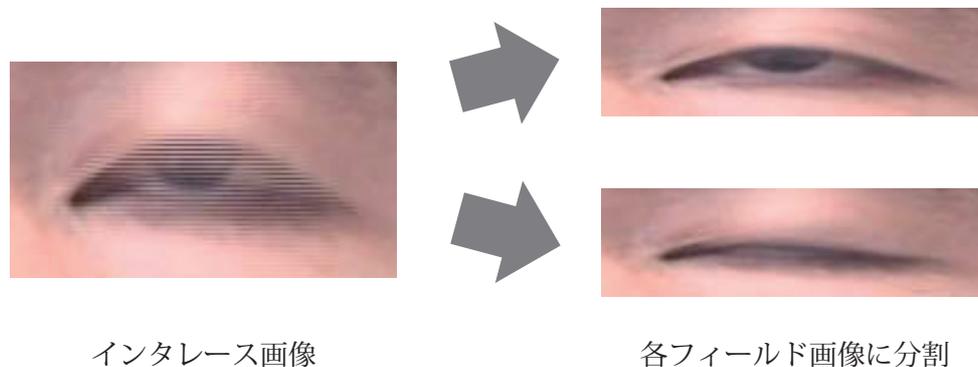


図 3.1: フレーム分割法 [91] の概念図

## 3.2 計測環境

本論文で実験に用いた計測システムは、瞬目画像を撮影するための1080i規格のハイビジョンビデオカメラ（ソニー HDR-HC9）と、撮影された動画画像から各フレームを抽出し瞬目波形を求めるパソコン（OS:Windows 7, CPU:Core i7, クロック周波数:2.8GHz）により構成されている。図3.2に計測環境の外観を示し、図3.3にハードウェア構成の模式図を示す。



図 3.2: 計測環境の外観

眼球近傍を拡大して撮影するため、カメラのレンズ前方にクローズアップレンズを装着している。撮影された動画画像はインタレース方式であり、フレームレートは30フレーム/秒、画像サイズは水平1920×垂直1080画素である。本研究の実験においては、瞬目の性質などを分析するため、詳細に記録した実験中の動画画像を実験後に参照できることが望ましい。そこで、カメラで撮影された動画画像を、HDMIを経由して記録用パソコンのSSDに記録する構成を採用した。HDMI規格を採用したことによって、前述の解像度の動画画像を時間方向に非圧縮で取り込むことができる。また、記録媒体にSSDを採用しており、前述の解像度の動画画像（毎秒約180MB）を記録する目的に十分な書き込み速度を有している。この構成により、記録した動画画像からフレーム分割法により得られた各フィールド画像に対し

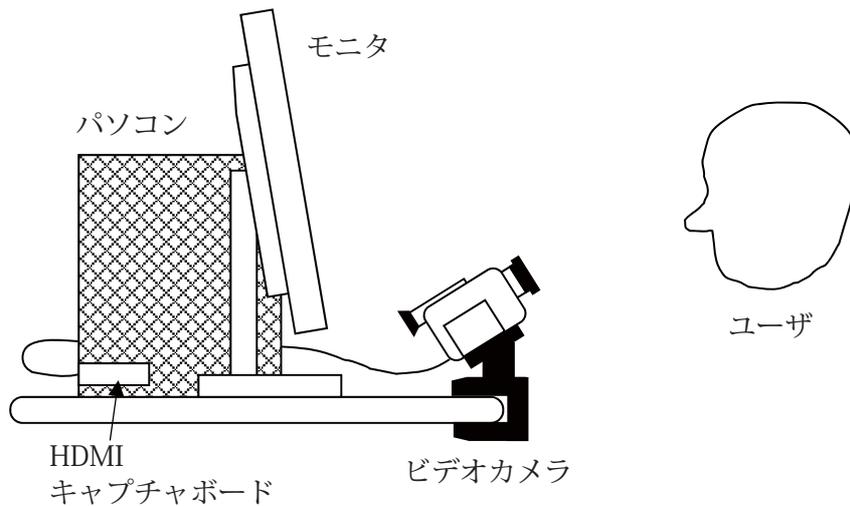


図 3.3: ハードウェア構成の模式図

て、オフラインで瞬目計測処理をする。

### 3.3 瞬目波形の計測

3.2 節で述べた通り，本研究では自然光照明下で撮影した動画像に画像処理を適用し，眼球開口部の面積を逐次算出する．この眼球開口部面積の変化を波形として取得し，ユーザが行なう瞬目の情報を得る．本節では，本研究の瞬目計測に用いる画像処理の方法と，瞬目の波形から瞬目生起時の部分（瞬目時波形）を抽出する方法を詳述する．

#### 3.3.1 眼球開口部抽出のための画像処理

本項では，瞬目過程における眼球開口部の面積変化を計測するための画像処理について，詳細を述べる．

先行研究において，自然光下で撮影した眼球近傍の画像から，眼球開口部の領域を抽出する手法が提案されている [94, 95]．著者らは，これらの手法を参考にし

て、画像中の眼球開口部の領域と皮膚の領域とを、 $YC_bC_r$  表色系の色情報を用いて識別する方法をすでに開発している [91, 96]. 具体的な手順は、まず RGB 表色系で記録された動画像を、各フィールドごとに  $YC_bC_r$  表色系に変換し、各画素の  $Y$ ,  $C_b$  および  $C_r$  の値を得る. そして、各画素の色差比  $C_r/C_b$  の値を求め、それをパラメータとして 2 値化処理を行なう. RGB- $YC_bC_r$  変換には、ITU-R<sup>1</sup> BT.601 で規定された変換式を採用している. 本研究で採用した RGB- $YC_bC_r$  変換の式を、以下に示す.

$$Y = 0.257R + 0.504G + 0.098B + 16 \quad (3.1)$$

$$C_b = -0.148R - 0.291G + 0.439B + 128 \quad (3.2)$$

$$C_r = 0.439R - 0.368G - 0.071B + 128 \quad (3.3)$$

式 3.1, 式 3.2, 式 3.3 において,  $R$ ,  $G$ ,  $B$  はそれぞれ赤, 緑, 青の輝度値を表しており,  $Y$ ,  $C_b$ ,  $C_r$  はそれぞれ輝度, 色差  $B - Y$ , 色差  $R - Y$  を表している. ただし, それぞれの式における計算結果の小数点以下は切り捨てとした.



図 3.4: 眼球近傍画像の例

図 3.4 に示した 1 枚の眼球近傍画像の全体から計測した色差比  $C_r/C_b$  を, ヒストグラムとして図 3.5 に示す. 図 3.5 から明らかなように, 眼球近傍画像の色差比は

<sup>1</sup>ITU-R (国際電気通信連合 無線通信部門)

ITU (International Telecommunication Union: 国際電気通信連合) の無線通信部門 (Radiocommunication Sector) の略称であり, 無線通信に関する規格や標準の策定を行なう国際機関である. ほかの部門として, 電気通信部門 (Telecommunication Standardization Sector) の ITU-T などがある.

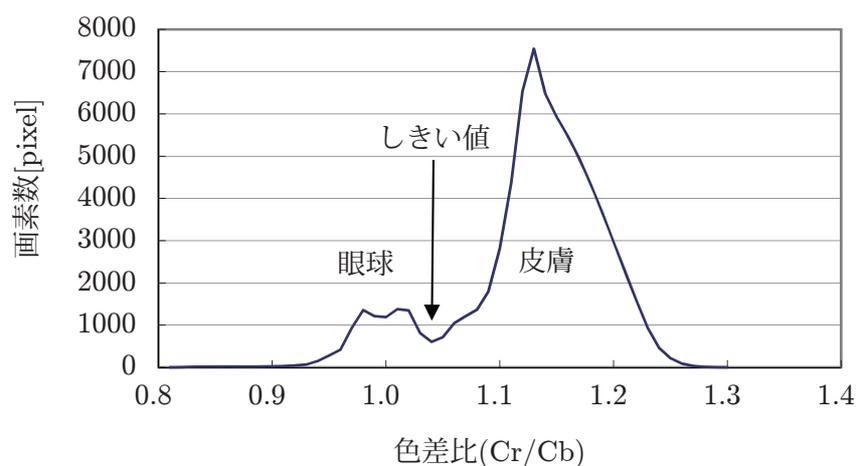


図 3.5: 色差比ヒストグラムの例

ヒストグラムは大小2つの山をもつ。一般に日本人（アジア人）の場合、肌の領域は色差比が1よりも大きくなり、それ以外の眼球などの領域は1に近づく。図3.5のヒストグラムでは、大きい山は色差比が1よりも大きい位置にピークがあり、これが皮膚の部分を表している。小さい山は色差比が1を含む範囲に位置しており、皮膚以外の部分（眼球など）を表している。このような傾向から、2つの山の間にある谷の位置をしきい値として2値化処理を行なうことで、眼球開口部の形状に近い領域が抽出できる [96]。図3.4の画像に対し、このカラー情報による2値化を適用した結果を図3.6に示す。図3.6において、黒色で表された領域が眼球開口部として抽出された部分である。この図から、この方法で眼球開口部の大まかな形状が抽出できることがわかる。



図 3.6: カラー情報による2値化画像

色差比を用いたカラー情報による2値化処理によって、おおまかな眼球開口部の形状は抽出可能である。しかし、被験者によっては目頭近傍の色差比が肌色に近くなってしまい、眼球形状が欠損して抽出される場合がある。この問題に対処するため、本研究では前述のカラー情報による2値化とともに、輝度情報による2値化を用いる。輝度情報による2値化では、眼球近傍画像の各画素について輝度値を算出し、一定の輝度値（輝度のしきい値）以下の領域を抽出する。ここで抽出の対象とするのは、瞳孔および虹彩(黒目)、そして強膜(白目)の影の部分である。ただし、この方法で目的の領域を抽出するには、画像によってことなつた輝度のしきい値を自動決定する必要がある。

輝度のしきい値を決定するため、上述の処理で得られたカラー情報による2値化画像と輝度情報による2値化した画像を比較することで、もっとも形状に近い条件を探索する。比較は輝度情報による2値化のしきい値を変化させながら繰り返す。カラー情報による2値化画像と輝度情報による2値化画像との残差を求め、残差のもっとも少ないときの輝度のしきい値を探索することによって、目的のしきい値を決定できる [96]。図 3.4 の画像に対し、この輝度情報による2値化を行なった抽出結果を図 3.7 に黒色の領域で示す。図 3.7 から明らかなように、輝度情報による2値化の手法を用いることで、目的とした瞳孔および虹彩、そして強膜の影の部分が抽出できる。この図 3.7 には、カラー情報による2値化処理によって欠損する場合のあつた目頭近傍の部分が含まれている。



図 3.7: 輝度情報による2値化画像



図 3.8: 眼球開口部形状の抽出画像

カラー情報による 2 値化によって求めた図 3.6 の領域と、輝度による 2 値化によって求めた図 3.7 の領域を合成すると、眼球開口部の形状として図 3.8 に示す領域が決定される [96]. こうして求めた図 3.8 の領域について、その面積 (画素数) をカウントすることで眼球開口部の面積を得る.

### 3.3.2 瞬目時波形の抽出

画像解析によって動画から瞬目を計測するためには、一般に眼球開口部の面積や上下のまぶたの移動距離などを求める. すなわち、瞬目の過程で生じる眼球開口部形状の変化に応じて変動する何らかのパラメータを取得することで、計測を実現している. 本研究では、3.3.1 項で述べた一連の画像処理によって、フィールド画像における眼球開口部の面積を逐次計測し、その時間的な進行過程を波形として得る手法 [87, 91, 92, 93] を採用する. この眼球開口部の面積を時系列に配置することによって構成される波形を、瞬目波形と定義する. 図 3.9 に、瞬目波形の例を示す.

この瞬目波形には、瞬目時波形のほかに、開眼中の状態における眼球開口部面積の変化の波形も含まれている. 瞬目を入力インタフェースに用いる場合には、これらのうち瞬目が生起している箇所を検出する必要がある. 著者らは、瞬目波形から統計情報を用いて自動的に瞬目を抽出する方法を採用している [38, 87]. この

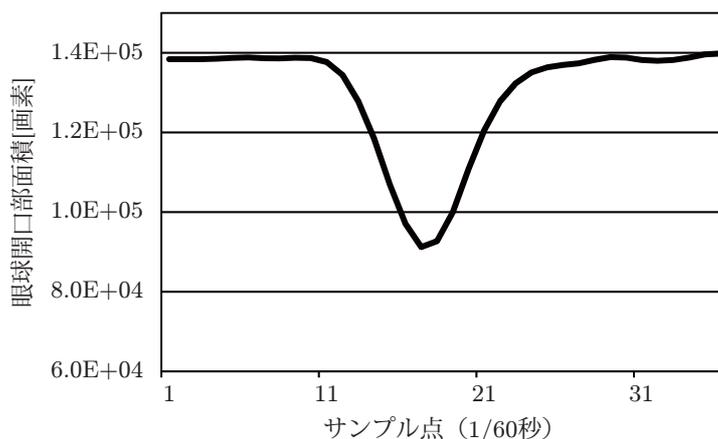


図 3.9: 瞬目波形の例

方法では、次式により瞬目の状態を判定するしきい値を求める。

$$Th_1 = \bar{E} + 2\sigma \quad (3.4)$$

$$Th_2 = \bar{E} - 2\sigma \quad (3.5)$$

式 3.4 および式 3.5 において、 $\bar{E}$  は開眼時における眼球開口部面積（サンプル値）の差分値の平均を表し、 $\sigma$  はその標準偏差を表す。ここで、差分値はあるサンプル点のサンプル値とその 1 つ前のサンプル値との差により定義される。また、平均および標準偏差は、システム使用の初期にユーザが開眼を維持する一定の期間を設けて、その期間の各サンプルから得た差分値のデータ群により求める。3.5.2 項で述べる予備実験では、この期間を 3 秒間（180 サンプル）とした。また、3.6.2 項で述べる瞬目種類識別のキャリブレーション法の評価実験では、ユーザが開眼を維持する明示的な期間を不要にし、開眼状態と瞬目時波形の混在する 7 秒間（420 サンプル）のサンプル群から開眼状態の部分を抽出する方法を示す。この手法によって得た開眼状態のサンプル群を対象に、各サンプルから求めた差分値のデータ群を用いて、式 3.4 および式 3.5 の平均および標準偏差を算出する。眼球開口部面積の変化により得られた差分値が  $Th_1$  以上のサンプルは開眼過程、 $Th_2$  以下のサンプルは閉眼過程として検出する。これら閉眼過程または開眼過程のサンプルが 5 サンプル以上連続した箇所をそれぞれ閉眼時波形または開眼時波形とし、時

系列に沿って走査したときの閉眼時波形の先頭を瞬目の開始点、開眼時波形の末尾を終了点として、その間の波形を抽出する。

## 3.4 瞬目種類の自動識別法

瞬目の情報を用いてコンピュータに何らかのコマンドを入力するインタフェースを構築する場合に、随意性瞬目と自発性瞬目を識別することができれば、ユーザの意識的な瞬目をトリガとした入力を実現できる。本節では、これらの瞬目種類を識別するために利用可能な瞬目の特徴パラメータについて検討し、自動識別の方法を提案する。

### 3.4.1 識別に用いる特徴パラメータ

瞬目の種類を識別するためには、識別処理に用いるパラメータを選定する必要がある。3.3.2項の瞬目抽出処理によって、瞬目波形から瞬目時波形のみを自動抽出することができる。瞬目計測に関する研究において、随意性瞬目と自発性瞬目とは、おもに瞬目の持続時間と瞬目の最大振幅値にそれぞれ差があると言われている [31, 47]。著者の環境においてもこれらの瞬目波形の形状特徴パラメータが有効であると予想し、実験にもとづく検討を行なった。図3.10に、3.3.2項に定義を述べた瞬目波形の概形を示す。それとあわせて、著者が本章の実験において調査の対象とした瞬目の特徴パラメータを太字で示す。

図3.10において、持続時間のパラメータは、抽出された波形の開始点から終了点までの経過時間により定義される。最大振幅値のパラメータは、開始点と振幅変化が最大となるサンプル点との間の振幅の差を、開始点のサンプル値によって正規化した値として定義される。

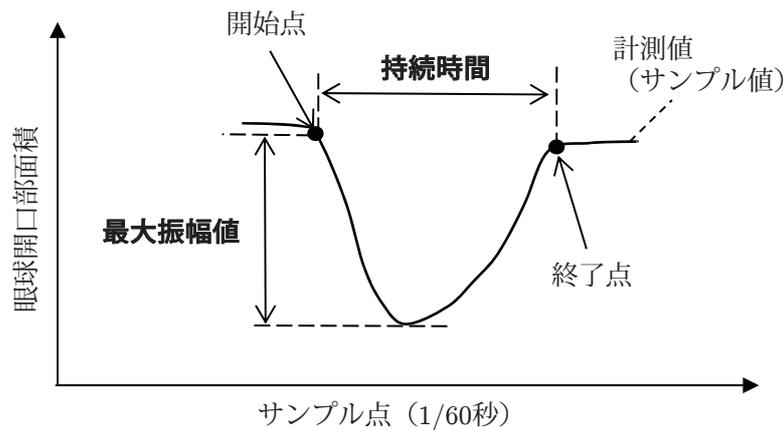


図 3.10: 瞬目特徴パラメータの定義

### 3.4.2 瞬目種類識別法の提案

これまでも、瞬目による入力システムを実現するため、画像処理によってユーザの瞬目を検出し、何らかの特徴的な瞬目パターンにより随意性瞬目を識別する方法が提案されている [23, 26, 27, 28, 32, 88, 97]. この特徴的な瞬目のパターンとして、一定時間以上の随意性瞬目を行なうことで自発性瞬目と区別する方法が多く採用されている [28, 32, 97]. 著者らは、ユーザの制約を軽減することを目的とし、主観により「しっかり」と意識的な瞬目をしたときに入力が行なわれるインタフェースの開発を目指す. 著者らはまず、この指示のもと瞬目の持続時間のパラメータに顕著な差があることを確かめた [87]. この調査において、各種類の瞬目持続時間の代表となる値（代表値）を求め、持続時間が次式により定めたしきい値  $Th_c$  以上の瞬目を随意性瞬目として識別を行なった.

$$Th_c = \frac{Td_v - Td_{iv}}{2} + Td_{iv} \quad (3.6)$$

式 3.6 において、 $Td_v$  と  $Td_{iv}$  はそれぞれ随意性および自発性瞬目の代表値である. 著者らの先行研究 [87] では、計測対象の瞬目データ全体から 2 種類の瞬目について持続時間の各平均値を求め、それらを代表値として識別精度を検証した. その結果、識別率はそれぞれ随意性瞬目が 95.0 %, 自発性瞬目が 99.3 % となり、全

体で 97.9 % となった。この結果から、瞬目の持続時間パラメータによって、式 3.6 を用いた高精度の識別が可能であることが確かめられた [87]。

本章の瞬目種類識別のキャリブレーション法の検討においては、本項で述べた式 3.6 による識別を採用する。3.5 節では、式 3.6 に用いる自発性瞬目と随意性瞬目の代表値を決定する複数の条件を比較し、瞬目種類識別のキャリブレーション法を検討する。

### 3.5 瞬目種類識別のキャリブレーション法の検討

3.4.2 項で述べた検証における識別処理は、すべての瞬目データを撮影し終えたのちにオフラインで行なっている。しかしながら、実際のインタフェースへの適用を考えると、コマンド入力などのアプリケーション操作を行なう時点で識別が可能でなくてはならない。本節では、3.4.2 項の式 3.6 により、複数の条件で代表値を求めた場合における瞬目種類識別のキャリブレーション法を検討する [38]。

#### 3.5.1 瞬目種類識別のキャリブレーションの必要性

従来にも、瞬目の持続時間にしきい値を設けて随意性瞬目を識別する手法は提案されていた [30, 31, 37, 70, 72]。EOG 法では、角膜網膜電位の波形から得た振幅の情報を用いると、随意性瞬目と自発性瞬目との間に有意な差がみられ、あらかじめ個人ごとの随意性瞬目の振幅値についてキャリブレーションを行なうことで、角膜網膜電位波形の振幅のしきい値により瞬目種類の識別が可能である [73]。しかし、画像解析による瞬目計測において、振幅のパラメータのみで瞬目種類の識別を行なっている研究は見当たらない。また、著者らが採用している画像処理による瞬目計測において、持続時間の長短による瞬目種類識別を行なう際に、先行研究では持続時間のしきい値として統計的あるいは経験的に得た固定値を用いており [30, 31, 70, 72]、この持続時間のパラメータについて個人差を考慮したし

きい値の決定法については議論されていない。瞬目の持続時間には個人差があり、このパラメータによって瞬目種類の識別を行なう場合には、識別に用いるしきい値を個人ごとに設定することでよい結果が得られる [87]。

本研究では、3.4.2 項で述べた通り、瞬目の持続時間のパラメータによって随意性瞬目と自発性瞬目を識別する方法を採用する。このとき、システムとして随意性瞬目を抽出し入力インタフェースに用いるためには、2種類の瞬目の持続時間を識別するしきい値を、システムの使用に際して個人ごとに定める瞬目種類識別のキャリブレーション処理が必要である。本節ではこの瞬目種類識別のキャリブレーションを行なう方法について検討し、実験によって得られた知見から、比較的少数の瞬目（1～5回程度）の取得により完了する高精度な方法を提案する。

### 3.5.2 瞬目種類識別のキャリブレーション法の検討のための

#### 予備実験

キャリブレーション法の検討のため、被験者8名（30代男性2名、20代男性6名）の随意性および自発性瞬目を動画像で撮影し、瞬目抽出および瞬目種類の識別を行なった [38]。被験者に計測開始直後から3秒間の開眼を続けてもらい、開眼時の情報を取得する。その後、瞬目計測の期間として180秒を設ける。この期間中には、自発性瞬目を記録するとともに、ビープ音を5～7秒間隔でランダムに発生させて、随意性瞬目を促す。一般に自発性瞬目の発生頻度は15[47]～20[58]回／分（平均で約3～4秒間隔）といわれ、随意性瞬目の合間に自発性瞬目が取得できるよう、ビープ音の発生間隔は自発性瞬目の平均間隔より少し長めに設定した。被験者には、このビープ音を聞いたときに随意性瞬目を「しっかり」と行なうよう、事前に指示した。

### 3.5.3 瞬目自動抽出の結果

3.5.2項の実験から得た瞬目の動画像データから、瞬目時波形の自動抽出を行なった結果を本項で述べる。自動抽出結果の評価のため、瞬目の検出率および抽出成功率を求める。検出率  $D_r$  および抽出成功率  $C_r$  は、先行研究 [89] を参考に次式より求める [38, 87].

$$D_r[\%] = \frac{I_c - (P_d + F_d)}{I_c} \times 100 \quad (3.7)$$

$$C_r[\%] = \frac{I_c - D_e}{I_c} \times 100 \quad (3.8)$$

式 3.7 および式 3.8 において、手動検出回数を  $I_c$ 、自動検出時の見落とし回数を  $P_d$ 、誤検出回数を  $F_d$ 、手動と自動抽出で得られた瞬目時波形が不一致である回数を  $D_e$  としている。ここで不一致である回数  $D_e$  は、手動と自動抽出に 12 サンプル以上の時間差があった瞬目回数であり、これには見落としの回数  $P_d$  および誤検出の回数  $F_d$  が含まれている。なお、手動抽出の作業は実施者 1 名で行なった。このとき、瞬目の読み飛ばしなどの実施者によるヒューマンエラーを抑えるため、通常の再生に加えてコマ送り再生を用いて各データにつき 3 回ずつの観察を行なった。その 3 回で観察結果がことなった場合には、該当する箇所を再度確認することで正確性に配慮している。

式 3.7 および式 3.8 によって、検出率および抽出成功率を求めたところ、被験者 8 名の平均でそれぞれ 97.3 % および 94.8 % であった。ここで抽出に成功した瞬目のみを、3.5.4 項の識別に用いる。

### 3.5.4 瞬目種類識別の結果

本項では、計測の初期に得た瞬目を用いて識別した結果を比較し、3.4.2 項の式 3.6 における代表値の決定に必要な瞬目の個数を決定する。各種類の瞬目について持続時間の代表値を決定する方法として、(1) 出現順に 1~5 個の随意性および自発性瞬目から求めた平均値を用いる方法、および (2) 出現順に 1~5 個の随意性

および自発性瞬目から求めた中央値を用いる方法により、それぞれのしきい値を算出した。また、すべての場合について瞬目の開始から30秒間に得た瞬目を瞬目種類識別のキャリブレーションの対象とし、残りの150秒間に生じた瞬目を識別の対象とした。したがって、以下に述べる複数の結果は同一の瞬目データを処理したものである。

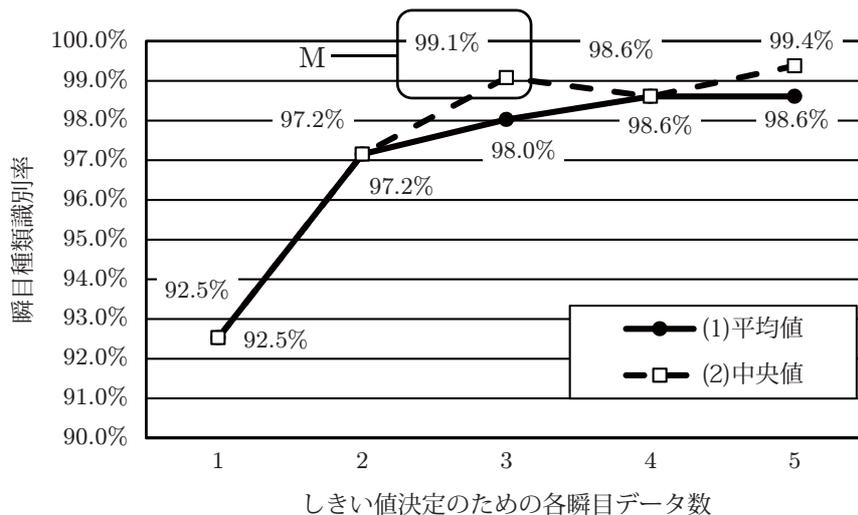


図 3.11: 瞬目種類識別率の比較 [38]

各キャリブレーションの方法に対する識別の結果を図3.11に示す。図3.11において、横軸はしきい値の決定に用いた各種類の瞬目個数、縦軸は随意性瞬目と自発性瞬目をあわせた識別率  $C_t$  である。本研究は随意性瞬目を識別して抽出することを主目的とするが、自発性瞬目を誤って随意性瞬目として検出したときはエラー処理が必要など、評価は自発性瞬目についても必要であり、随意性瞬目と自発性瞬目をあわせた識別率を使用している。識別率  $C_t$  を求めるため、著者らは次式を採用している [87].

$$C_t[\%] = \frac{(V_c + Iv_c) - (E_v + E_{iv})}{(V_c + Iv_c)} \times 100 \quad (3.9)$$

式3.9において、随意性および自発性瞬目の回数を  $V_c$ ,  $Iv_c$ , またそれぞれの識別時のエラー回数を  $E_v$  および  $E_{iv}$  とした。図3.11のグラフから、いずれの場合も、

瞬目種類識別のキャリブレーションに用いる瞬目の数が増加すると、識別率が向上する傾向があることがわかる。ここで瞬目データを詳細に分析したところ、エラーの多い被験者では第1番目の随意性瞬目が短い傾向にあった。本実験では、3秒間の開眼期間の終了と同時に第1番目の随意性瞬目を求めているが、被験者が開眼の指示のみを意識し、「しっかり」という指示の効果が十分に得られなかったことが考えられる。平均値と比べ、中央値を代表値とした場合には、この種の異常値を比較的少数のサンプル数で除去できるため、本実験データでは高い識別率を得ていると考えられる。

図 3.11 から、各種類の瞬目について 3 個ずつの平均値または中央値を代表値として求めた値で、識別率がほぼ飽和することが読みとれる。これらの条件のうち、中央値を用いる方法を図 3.11 中に条件 M として示した。この結果から、取得する瞬目個数をあらかじめ定める場合には、個数を 3 個に設定することで、少数かつ高精度な識別が可能になる。条件 M の識別結果の詳細を、表 3.1 に示す。

表 3.1: 検討データによる瞬目種類自動識別率 (条件 M)[38]

被験者	随意性瞬目 ( $C_v$ )[%]	自発性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	96.7	96.2
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	100	100
平均	99.5	98.7	99.1

表 3.1 において、随意性瞬目および自発性瞬目の識別率  $C_v$ ,  $C_{iv}$  の算出に次式を

それぞれ用い、それらをあわせた識別率  $C_t$  の算出には前述の式 3.9 を用いた [87].

$$C_v[\%] = \frac{V_c - E_v}{V_c} \times 100 \quad (3.10)$$

$$C_{iv}[\%] = \frac{Iv_c - E_{iv}}{Iv_c} \times 100 \quad (3.11)$$

式 3.10 および式 3.11 において、各変数は式 3.9 と同じである。随意性瞬目および自発性瞬目の識別率はそれぞれ 99.5 % および 98.7 % であり、全体の識別率は 99.1 % であった。

また、図 3.11 において、それぞれ 3 個ずつの瞬目を用いたときの平均値と中央値とで識別率の差がもっとも大きく、本実験のデータでは中央値を用いたほうが 8 名全体でよい識別率を得ている。そこで、3 個ずつの瞬目を用いた場合に「平均値よりも中央値のほうがよい」と仮説をたて、片側検定を行なった。その結果、平均値と中央値を用いた場合の有意な差はみられなかった ( $P = 0.09 > \alpha = 0.05$ )。本実験では、対象の瞬目データに含まれる大きな異常値を取り除くことを期待し、中央値を採用した。中央値の採用について、識別率の平均に差がみられるように一定の効果はある。しかし、大きな異常値を生じた被験者は少数であり、全体としては代表値の決定方法の違いによる識別率の差は大きいとは言えなかった。

本項の結果から明らかなように、随意性瞬目および自発性瞬目の代表値として、平均値または中央値のいずれを用いた場合でも 2 種類の瞬目を適切に識別できる。このとき、代表値の算出に用いる瞬目データの個数は、それぞれ 3 個ずつとすればよい識別率を得られる [38]。以上のことから、瞬目種類識別に用いる瞬目特徴パラメータについてキャリブレーションを行なう場合には、それぞれの瞬目データの個数を 3 個ずつとすることを提案する。

## 3.6 瞬目種類識別のためのキャリブレーション法の評価

3.5.4 項の結果から、随意性瞬目および自発性瞬目はそれぞれ 3 個ずつ取得すれば、瞬目種類識別のキャリブレーションとして満足であることがわかった。本節

では、入力インタフェースへの応用を想定し、システム使用の初期にユーザに求める入力手順を設計する。ここで設計した手順にもとづいた瞬目計測実験を行ない、3.6.3 項において瞬目種類識別のキャリブレーション法を評価する [38]。

### 3.6.1 瞬目種類識別のキャリブレーションのための瞬目抽出

3.5 節の実験では、瞬目時波形を抽出するため、計測開始直後に 3 秒間の開眼を被験者に要求した。しかしながら被験者は通常は開眼の状態にあり、瞬目波形はほぼ一定の値をとる。計測開始時点で波形が大きく変化しているときは自発性瞬目中であり、この部分のサンプルを除くと、開眼状態の値が取得できる。ここで取得した開眼状態の情報により、式 3.4 および式 3.5 を用いた瞬目抽出が可能になる。

式 3.4 および式 3.5 による瞬目抽出が可能になったのち、開眼状態から波形が大きく変化した箇所を自発性瞬目の瞬目時波形として取得し、瞬目種類識別のキャリブレーションに用いる。その後、随意性瞬目を求めるビーブ音を 3 秒間隔で 3 回鳴らして 3 個の随意性瞬目の瞬目時波形について取得を完了する。自発性瞬目は、それまでの期間の瞬目波形から抽出した瞬目時波形のうち随意性瞬目を除き、出現順に 3 個を取得すればよい。自発性瞬目の個数が 3 個に満たない場合は、その後の期間に瞬目の発生を待つ。各 3 個ずつの瞬目を得たのち、式 3.6 により持続時間のしきい値  $Th_c$  を求めて、瞬目種類識別のキャリブレーション処理を終了する。

### 3.6.2 瞬目種類識別のためのキャリブレーション法の評価実験

被験者 8 名 (30 代男性 2 名, 20 代男性 5 名, 20 代女性 1 名) で、評価実験を行った [38]。被験者 A~D の 4 名は 3.5 節と共通であり、他の 4 名はことなる。被験者にはあらかじめ、音を聞いたら「しっかり」と瞬目をするよう指示をした。

本実験の処理はオフラインで行なうため、キャリブレーションに用いる瞬目波形の計測開始から最初のビーブ音の前までを 7 秒とし、3 個目のビーブ音のあと、

キャリブレーションに用いる瞬目波形の計測終了までの時間を5秒に設定した。図 3.12 に、実験の流れを示す。

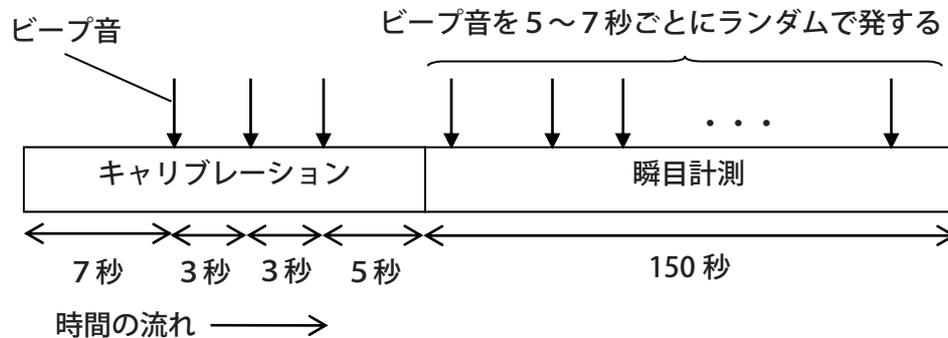


図 3.12: 評価実験の流れ

これらのうち前者の7秒間は、この期間に1~2個程度の自発性瞬目が含まれることを期待し、平均的な瞬目発生間隔の約3[58]~4[47]秒という値をもとに設定した。同様に、後者の5秒間は自発性瞬目の個数が不足した場合にそれを補うため、この期間に1個の自発性瞬目が含まれることを期待し設定した。これらの時間は、応用システムなどのオンライン処理では可変に設計できる。また、自発性瞬目は随意性瞬目の合間にも取得している。以上に述べたキャリブレーションに用いる瞬目波形の計測終了後から150秒間を計測期間として、ビーブ音を5~7秒のランダムで発生させ、自発性瞬目および随意性瞬目を計測した。なお、本実験においてはキャリブレーションに用いる瞬目波形の計測期間を固定にしており、3回の自発性瞬目が生じない場合もある。本実験はオフライン処理による解析を目的としているため、そのような自発性瞬目が含まれないデータは解析の対象としない。

3.3.2項で述べた通り、式3.4および式3.5を用いた瞬目抽出において、開眼時における眼球開口部面積の差分値の平均値 $\bar{E}$ および標準偏差 $\sigma$ を求めるために開眼状態のサンプル群が必要である。この開眼状態を、被験者に明示することなく取得可能にするため、瞬目時波形と混在する瞬目波形から自動抽出する。瞬目時波形、すなわち瞬目の発生時には、瞬目波形が大きく変化する。したがって、開眼状態を抽出するためには、瞬目波形の振幅の大きな箇所を検出し、その付近の瞬目時波

形を含む部分を除去すればよい。なお、この振幅の大きな箇所を検出による瞬目検出の方法では、著者らの採用する 3.4.1 項の定義による瞬目の特徴パラメータが取得できないため、ここで取得した開眼状態の情報を用いて、式 3.4 および式 3.5 による瞬目抽出を行なう必要がある。

本手法では、瞬目波形の振幅の大きな箇所を検出に次式を用いた [38]。

$$A_{th} = \frac{A_{max} - A_{min}}{2} + A_{min} \quad (3.12)$$

ビーブ音発生以前の瞬目波形から眼球開口部面積の最大値  $A_{max}$  (開眼状態近傍) と、最小値  $A_{min}$  (閉眼状態近傍) を取得する。それらの値から、面積のしきい値  $A_{th}$  を算出する。面積が  $A_{th}$  以下のサンプルを瞬目の中心箇所とみなして、閉眼および開眼過程を含む前後 12 サンプル (約 200 ミリ秒) を除去し、開眼状態のサンプル群を抽出した。なお、この約 200 ミリ秒という値は、著者らの先行研究 [87] において、自発性瞬目の持続時間平均値が最大であった被験者を参考とした。この被験者の持続時間の平均値は約 354.2 ミリ秒であり、その標準偏差の約 46.1 ミリ秒との合計である約 400.3 ミリ秒という値をもとに、前後に適用するため 2 分の 1 として求めている。上で述べた前後 12 サンプルと、瞬目の中心箇所の数サンプルをあわせると、自発性瞬目は除去される対象の範囲に十分含まれることが期待できる。

### 3.6.3 実験結果

自動抽出の結果、瞬目の検出率は 99.5 %、抽出成功率は 96.8 % となった [38]。被験者のうち、2 名で見落としが発生した。これらはいずれも不完全な自発性瞬目であった。また、1 名の被験者は開眼中に目を細めるような動きがあり誤検出が生じた。これらのエラーはいずれも瞬目の持続時間が短く、入力インタフェースに応用する場合には自発性瞬目として除去されるため、誤入力とみなされることはない。一方、被験者 3 名で生じた不一致の一部には、自発性瞬目が直前のまぶたの

動きと連結して瞬目が長く検出されたものがあり、誤入力につながるため、応用システムではエラー処理ができるよう設計に配慮する必要がある。

3.5節の実験結果から、瞬目種類識別のキャリブレーション方法として「第3番目までの随意性瞬目および自発性瞬目をを用いる」という手法を提案する（以降、提案手法と呼ぶ）。上述の抽出に成功した瞬目データを用いて、この手法による識別結果を評価する。提案手法を適用し、3.5章の実験データでより識別率の高かった、中央値を代表値としてしきい値を決定した場合の識別結果を表3.2に示す。入力インタフェースに応用した場合に重要な随意性瞬目の識別率は99.5%であった[38]。

表 3.2: 提案する条件下での瞬目種類識別率 [38]

被験者	随意性瞬目 ( $C_v$ )[%]	自発性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	93.4	94.0
I	100	100	100
J	100	100	100
K	100	100	100
L	100	100	100
平均	99.5	99.2	99.3

表 3.2 のとおり、被験者 D でのみエラーが生じた。とくに、自発性瞬目を随意性瞬目と誤認識したエラーが多く生じた。この種のエラーは入力インタフェースの誤入力となる。しかしながら、全体での識別率は99.3%であり、瞬目種類識別のキャリブレーションに3個ずつの瞬目を用いて、高精度に識別可能であることが確かめられた。なお中央値を平均値にかえて処理したところ、3.6.2項の実験に対しては表3.2とまったく同一の結果が得られた[38]。

著者の研究以外にも、画像処理を用いて瞬目の持続時間を求め、瞬目種類の識別を行なう手法が提案されている[30, 31, 70, 72]。提案手法により決定された瞬目

持続時間のしきい値による，瞬目種類識別の有効性を確かめるため，これらの先行研究の手法と比較する [38]．これらの先行研究では，瞬目種類識別の持続時間のしきい値として経験的または統計的に求めた固定値を用いている．著者らの研究とは瞬目波形の定義がことなり，単純な比較は難しいが，参考のためにそれぞれの値または統計的な手法を用いて著者らの計測データを識別し，提案手法との精度を比較する．

3.6.2 項の実験で得た計測データに Królak らの方法 [31] および Su らの方法 [70] と同一の固定値である 200 ミリ秒のしきい値を適用し識別を行なうと，対象のすべての瞬目を随意性瞬目と判定してしまい，識別不能であった．Królak らは，瞬目波形としてテンプレートマッチングの相関係数を用いており，Su らは顔画像中の黒目領域の上下左右に設けた小領域におけるオプティカルフローによって瞬目計測を行なっている．これらの方法はいずれも，瞬目過程の詳細な眼瞼の変化を捉えているわけではない．したがって，著者のように瞬目の開始および終了付近の眼瞼の変化を詳細に捉える方法よりも，瞬目の持続時間を短く見積もっているのではないかと考えられる．瞬目の持続時間が短く定義されると，瞬目の持続時間のしきい値も相対的に小さくなり，随意性瞬目と判定される割合が大きくなる．小澤らが採用している 250.5 ミリ秒 [72] をしきい値として用いると，随意性瞬目および自発性瞬目の識別率はそれぞれ 100 % および 6.8 %，全体で 39.7 % となり低い．小澤らは，眼球近傍に赤外線照明を照射した瞳孔の面積を瞬目波形として用いているため，眼球開口部面積を瞬目波形に用いる著者らの方法よりも瞬目の持続時間が短くなる．そのため，経験的に求めたと述べている小澤らの設定値は，著者らの瞬目データに対しては低い識別率を示したと考えられる．Grauman らの方法 [30] では，しきい値は示されていないが，あらかじめ計測した長短の瞬目の持続時間から，随意性とみなされる長い瞬目の最小値を複数の被験者から一つ求めている．比較のため，3.6.2 項の瞬目種類識別のためのキャリブレーション用に得たデータを，あらかじめ計測したものと仮定して随意性瞬目の最小値を求めると，しきい値は約 383.3 ミリ秒となり，随意性および自発性瞬目の識別率はそれぞれ

れ99.5%および76.5%，全体で84.4%となった。提案手法は，これよりも識別率が高い。

画像処理を用いた方法以外では，光センサ法により持続時間にしきい値を設けて瞬目種類の識別を行なう手法 [37] があり，予備実験から経験的に得た300ミリ秒という固定値を用いている。このしきい値により3.6.2項の計測データを識別してみると，随意性および自発性瞬目の識別率は99.5%および22.8%，全体で49.9%であり，識別率は低い。

また，統計的な手法として，3.6.2項の実験より得た瞬目種類識別のしきい値について，8名から求めた平均値を採用する方法も考えられる。提案手法で中央値を代表値として用いた場合に，8名のしきい値の平均は約634.4ミリ秒であった。このしきい値を用いると，随意性瞬目および自発性瞬目の識別率はそれぞれ88.6%および100%，全体では96.9%となり，とくに随意性瞬目の識別率が低下する。また全体の識別率を比べても，提案手法よりやや低下する。これらの結果は，著者らの先行研究 [87] と同様の傾向を示しており，システム使用初期に個人ごとに行なう瞬目種類識別のためのキャリブレーションについて有効性が確かめられた [38]。

## 4 2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別

3章において、ユーザが意図的に行なう1種類の随意性瞬目と、自発性瞬目との識別法に関し、詳細に検討した。本章では、ユーザが意図的に行なう瞬目の種類を新たに追加し、2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別を実現する方法を提案する。

### 4.1 識別可能な瞬目種類を追加する利点

瞬目入力インタフェースにおいてユーザの入力意図を判断するためには、ユーザの随意性瞬目を自動的に識別する必要がある。3章において、随意性瞬目（1種類）と自発性瞬目について自動識別する方法を提案した。随意性瞬目を入力インタフェースとして利用する場合、識別可能な随意性瞬目の種類を増すことができれば、それぞれの瞬目あるいはそれらの組合せに各々個別の機能を割り当てることができ、入力の効率が格段に向上する。たとえば、追加の入力に訂正の機能を割り当てておけば、その機能によって直前に生じた誤りを取り消すことができ、訂正に要する手数や時間を大幅に短縮することが期待できる。

3章の瞬目種類識別は、ユーザが「しっかり」と行なう随意性瞬目と自発性瞬目を識別の対象とした。著者は、この瞬目種類識別法を拡張し、上述とはことなる種類の随意性瞬目、つまり2種類の随意性瞬目を識別する方法を開発した[39, 41]。本章では、この目的のために著者らが採用した識別のためのパラメータの定義を述べ、それらを用いた複数の瞬目種類識別法について比較する。その結果にもとづき、高精度に識別可能な方法を明らかにする。

## 4.2 2種類の随意性瞬目

本節では、新たに追加する随意性瞬目を含めた瞬目種類の定義を述べる。この定義にもとづき、本章の目的である2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別を実現するため、著者らが調査した瞬目波形の形状特徴に関するパラメータ（瞬目パラメータ）の計測結果を示し、これら3種類の瞬目に対する瞬目パラメータの傾向を分析する。

### 4.2.1 2種類の随意性瞬目の定義

3.4.2 項では、従来の瞬目入力システムにおいて、一定時間以上の随意性瞬目によって自発性瞬目と区別する方法が多く採用されていることを述べた。その中には通常の決定の他に追加の入力を識別するため、持続時間のしきい値として、固定値を複数設けている方法がある [28]。その他に、連続した複数回の瞬目を行ない、随意性瞬目を識別するシステムが提案されている [23]。このシステムでは、瞬目の実行にマウスクリックと同等のイベントを割り当てている。通常のクリックのほかに、より多くの瞬目を行なうことでダブルクリックのイベントも入力できる。しかし、これらの方法はいずれも、追加のコマンドを入力するために持続時間や瞬目の回数をユーザ自身がカウントする必要があり、入力の心理的な負担となる可能性がある。さらに、両眼を同時に撮影して、左眼または右眼のみの瞬目（いわゆるウィンク）を随意性瞬目として検出することで、2種類の入力意図を識別する方法が提案されている [26, 27, 88]。しかし、片眼のみの瞬目ができないユーザがいることも報告されており、この手法が利用できない場合がある [26]。

3章の瞬目種類識別法は、ユーザが「しっかり」と行なう随意性瞬目（1種類）と自発性瞬目を識別することを目的としていた。本章では、次の目標として、これらの瞬目種類に加え、上述とはことなる種類の随意性瞬目、つまり2種類の随意性瞬目を識別する方法の実現を目指す。本章では、簡潔な指示によりユーザが主観的に実行できる動作として、「しっかり」と行なう瞬目に加えて、「しっかりとな

るべく短く」行なう随意性瞬目を新たに採用する。この追加した種類の随意性瞬目は、「しっかり」と行なう瞬目と同様に簡潔な指示により主観的に実行することができ、瞬目の回数や持続時間をユーザがカウントする必要がない。これら2種類の随意性瞬目と自発性瞬目を対象とし、高精度な瞬目種類識別法を開発する。

#### 4.2.2 瞬目パラメータの定義

3章の瞬目種類識別の検討段階において、瞬目波形における持続時間と、最大振幅値という2つのパラメータに着目し、瞬目の特徴を調査した[38, 87]。前述の通り、持続時間パラメータは、抽出された波形の開始点から終了点までの経過時間により定義される。最大振幅値パラメータは、開始点と振幅変化が最大となるサンプル値との間の振幅の差により定義される。著者はまず、これらの2種類のパラメータについて、本章の課題である3種類の瞬目の間に大きな差があるかどうかを検討した[39, 41]。著者の採用する「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目、および「しっかり」と行なう瞬目および自発性瞬目の瞬目波形例を、図4.1に示す。

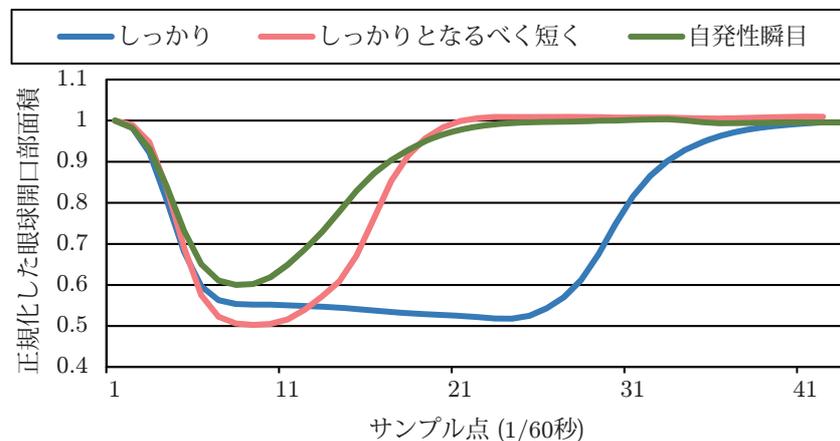


図 4.1: 2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の波形例 [39, 41]

図4.1において、横軸はサンプル点、縦軸は眼球開口部面積を表す。「しっかり」と行なう随意性瞬目の波形を青色で示し、「しっかりとなるべく短く」行なう随意性瞬目の波形を赤色で示した。また、自発性瞬目を緑色で示している。なお、縦

軸は最初のサンプル値を基準として正規化を行なっている。図 4.1 からわかるように、従来の「しっかり」と行なう随意性瞬目と「しっかりとなるべく短く」行なう随意性瞬目との間には持続時間に大きな差がある。しかし、「しっかりとなるべく短く」行なう随意性瞬目と自発性瞬目は持続時間の差が小さい場合がある。そのため、このパラメータのみを使って3つの瞬目種類を高い精度で識別することは難しい。そこで、瞬目波形の振幅の時間方向の積分値を新しいパラメータとして導入した [39, 41].

ここで新たに追加したパラメータを振幅の積分値（総和）と呼び、図 4.2 に灰色の領域で示す。図 4.2 において、縦軸は眼球開口部面積、横軸はサンプル点をそれぞれ表しており、実線は瞬目波形を表している。振幅の積分値パラメータは、瞬目波形の基線とサンプル値の差の総和によって定義される。この基線は、抽出した瞬目波形の開始点と終了点とで小さいほうのサンプル値に設定する。積分の対象となる期間は開始点から終了点までのうちでサンプル値が基線よりも小さい部分である。図 4.2 に示した振幅の積分値パラメータに、3.4.1 項で述べた瞬目の持続時間パラメータおよび瞬目の最大振幅値パラメータを加えた3つを、瞬目パラメータと定義する [41].

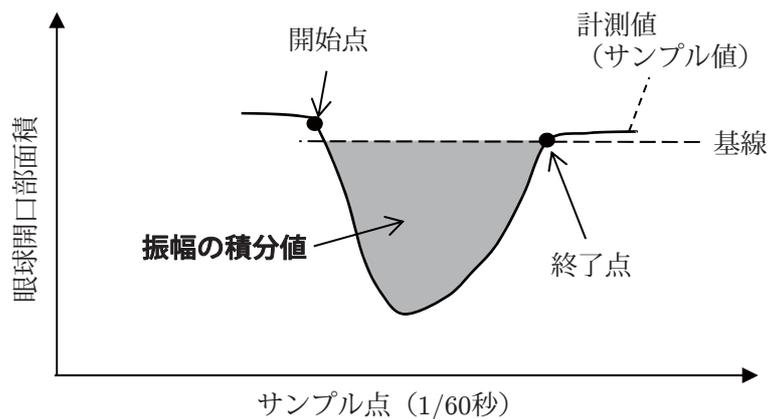


図 4.2: 振幅の積分値パラメータの定義 [41]

なお、振幅の積分値パラメータは、田多らによって EOG 法の瞬目波形のパラ

メータとして類似の概念が提案されており [58], それを参考にした. この田多ら先行研究 [58] では, EOG 法による計測を行っており, 角膜網膜間電位の変化を増幅し, A/D 変換して得たデジタル信号を対象している. 上で述べた定義は, 眼球近傍の動画像から得た瞬目波形を対象としている点が先行研究とことなるが, 抽出した瞬目波形の開始点と終了点に着目し, サンプル値の小さいほうを基線とする点と, 基線より小さい部分について基線とサンプル値との差の時間積分値を用いる点において共通である. この先行研究では, コンピュータによって自動取得が可能な瞬目波形の形状特徴パラメータのひとつとして, 振幅の積分値にあたるパラメータを提案している. 自発性瞬目の自動検出法の検討を研究の対象としており, そのなかで振幅の積分値にあたるパラメータを採用しているが, 随意性瞬目と自発性瞬目の瞬目種類識別を対象としていない. しかしながら, この振幅の積分値にあたるパラメータを用いる検出法と, 瞬目波形のピーク (最小値) を用いる検出法を比較し, 前者の方がよい検出成功率を示したことが述べられていることから, 振幅の積分値パラメータを採用すればよりよく瞬目の形状特徴を表現でき, 本研究で目的とする瞬目種類識別に有効であると期待できる.

また, 別の先行研究に, 著者と類似の画像処理法による瞬目計測を採用し, 1 種類の随意性瞬目と自発性瞬目を高精度に識別することを試みた研究がある [98]. 瞬目の抽出法はことなるものの, この研究においても, 瞬目波形の面積, すなわち瞬目中の振幅変化を時間方向に積分することで得る瞬目パラメータを識別のために採用している. この先行研究で採用されているパラメータは次式 [98] により算出される.

$$\text{Area} = \sum_{k=1}^{Dur} \left( \frac{p_s + p_e}{2} - p_k \right) \quad (4.1)$$

式 4.1 において,  $Dur$  は瞬目の持続時間 (サンプル数),  $p_s$  は瞬目開始点,  $p_e$  は瞬目の終了点,  $p_k$  は  $k$  番目のサンプル点における眼球開口部面積値をそれぞれ表している. 前述の方法と対比するためこの定義を模式的に表すと, 図 4.3 のように

なる。この図 4.3 は、著者が式 4.1 をもとに作図したものである。上述の式 4.1 は、図 4.3 における領域 A の面積から領域 B の面積を減じてパラメータ値を算出することと同値である。この定義は、著者の提案する図 4.2 のパラメータの定義と類似しており、これらの定義の違いによる瞬目種類識別結果への影響は小さいものと予想できる。

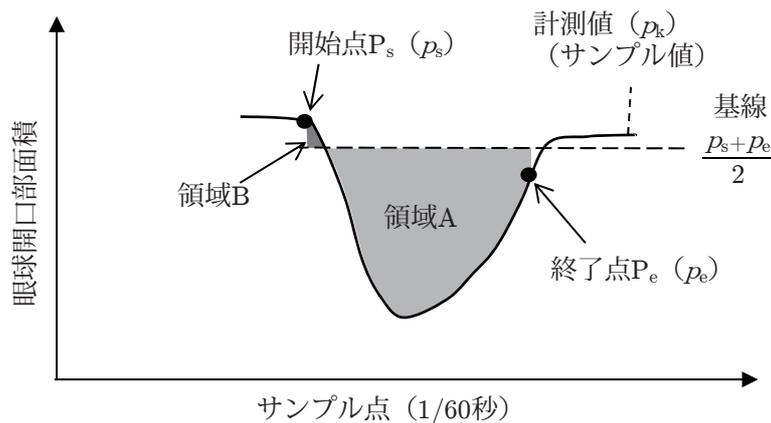


図 4.3: 先行研究 [98] における振幅の積分値パラメータの定義 [99]

この定義の違いによる瞬目種類識別の影響を、後述する予備実験の瞬目データの一部を用いて確かめた [99]。その結果、図 4.2 および図 4.3 の類似性から予想した通り、定義の違いによる影響は小さく、識別結果に大きな差はみられなかった。本論文では、振幅の積分値パラメータとして図 4.2 の方法 [41] を採用する。

### 4.2.3 2 種類の随意性瞬目の特徴

4.2.2 項で述べた各瞬目パラメータについての傾向を確かめるため、被験者 15 名 (20 代男性 7 名, 20 代女性 6 名, 30 代男性 2 名) による予備実験を行なった [41]。本項では、この結果を詳細に比較する。この予備実験では、各被験者について、「しっかり」と行なう瞬目と「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目を、個別の実験においてそれぞれ 5 回程度ずつ行なってもらった。それを撮影した動画像から抽出に成功した瞬目データを用いて、4.2.2 項の 3 つの瞬目パラメータを算出した。ま

た、実験中に生じた自発性瞬目もあわせて計測した。計測環境は、3.2節の内容と同様である。この予備実験により得られた瞬目について、持続時間、最大振幅値および振幅の積分値の各パラメータを瞬目種類ごとに集計し、比較する。

持続時間パラメータについての計測結果を図4.4に示す。図4.4において、縦軸は各種類の瞬目に対する持続時間を表している。また、各被験者について、棒グラフは左から順に「しっかり」と行なう瞬目、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目、自発性瞬目の各平均値を表している。エラーバーは、各種類の瞬目に対する標準偏差を表す。なお、被験者Kは計測期間中に得た自発性瞬目が1個であったため、この箇所にはエラーバーを示していない。

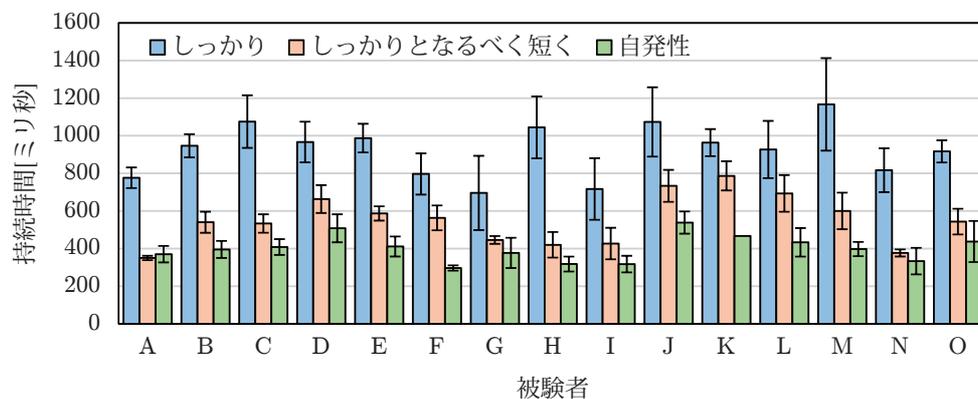


図 4.4: 瞬目の持続時間パラメータの計測結果 [41]

図4.4から明らかなように、「しっかり」と行なう瞬目と自発性瞬目との差はいずれの被験者も大きい。また、「しっかり」と行なう瞬目と、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目との間にも、大きな差がある。しかし、被験者A、GおよびNのように「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目と自発性瞬目の間では、差が小さい場合があることがわかる。

つぎに、最大振幅値パラメータについての計測結果を図4.5に示す。図4.5において、縦軸は正規化された最大振幅値を表しており、図4.4と同様に、棒グラフは各瞬目種類の平均値を、エラーバーは標準偏差をそれぞれ示す。このパラメータは、2種類の随意性瞬目の間で差が小さく、各随意性瞬目と自発性瞬目との差が大

きい被験者が多い。しかし、被験者Eのように、3種類の瞬目の間で差が小さい場合もある。また、このパラメータにおける3種類の瞬目の大小関係は、個人差が大きい。

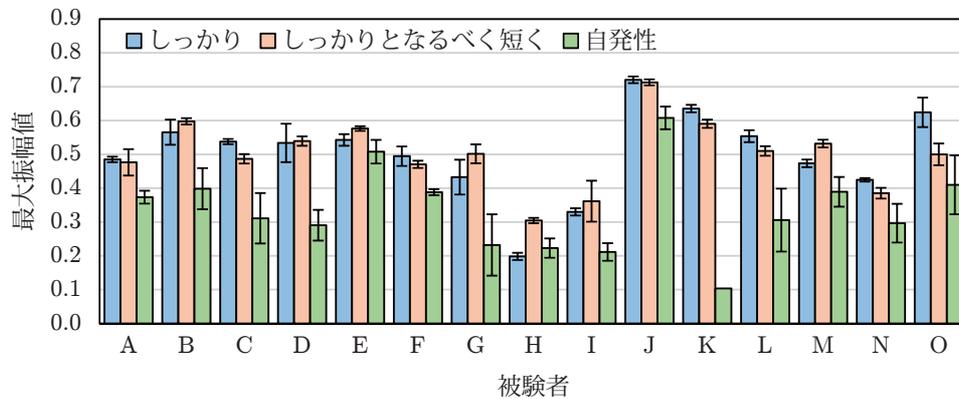


図 4.5: 瞬目の最大振幅値パラメータの計測結果 [41]

振幅の積分値パラメータについての計測結果を、図 4.6 に示す。図 4.6 において、縦軸は振幅の積分値を示す。このパラメータは、各瞬目時波形の開始点のサンプル値によって正規化されたサンプル値をもとに基線との差を求め、それを瞬目の開始点から終了点まで総和したものである。これら正規化されたサンプル値および基線の値はともに無次元量であり、それらの差も同じく無次元量である。その差をサンプル数に応じて加算したものであるため、振幅の積分値パラメータ自体もまた無次元量である。また、図 4.4 と同様に、棒グラフは各瞬目種類の平均値を、エラーバーは標準偏差をそれぞれ示している。図 4.6 の結果から、振幅の積分値パラメータは、「しっかり」と行なう瞬目、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目、自発性瞬目の順で小さくなっていることがわかる。また、各瞬目種類の間差は大きい。

図 4.4～図 4.6 を比較してみると、図 4.6 に示した瞬目の積分値パラメータは、パラメータ値の大小関係に被験者間で同一の傾向がみられるため、このパラメータに 2 段階のしきい値を設定すれば、単一のパラメータのみによって 3 種類の瞬目種類が識別可能であると考えられる。しかし、たとえば図 4.4 に示した瞬目の持続

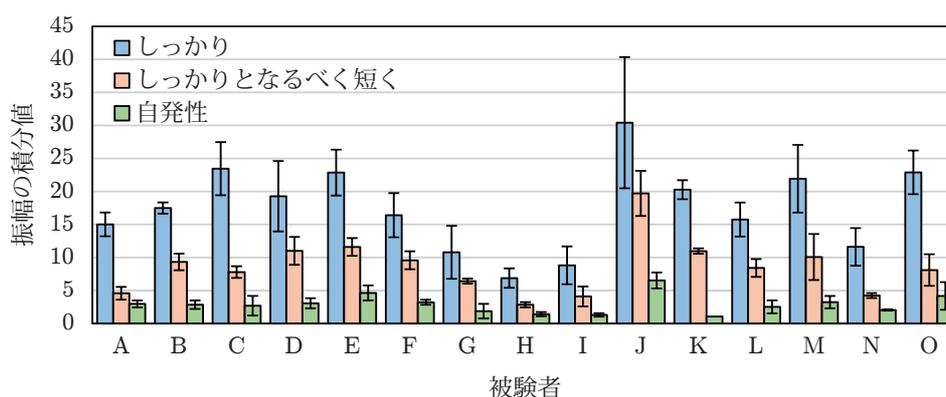


図 4.6: 振幅の積分値パラメータの計測結果 [41]

時間パラメータでは、「しっかり」と行なう瞬目とそれ以外の種類の瞬目とのパラメータ値の差が、被験者によっては振幅の積分値パラメータよりも大きい場合があります。このような特徴を反映できるように識別法を工夫すると、より高精度な識別法を実現できる可能性がある。そのため、4.3節において、単一の瞬目パラメータのみによる方法を含め、2つの瞬目パラメータを組み合わせる識別法を比較し、よりよい方法を求める。

### 4.3 拡張した瞬目種類識別法

本節では、3章で述べた1種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別法を拡張した、新しい瞬目種類識別法を提案する。本手法は、4.2.3項で詳細に示した瞬目種類ごとの特徴パラメータの傾向にもとづき、2種類の随意性瞬目と自発性瞬目を高精度に識別することを目標とする。

#### 4.3.1 複数の瞬目種類識別法

3章では、それぞれの瞬目種類の代表値から求めた瞬目の持続時間のしきい値を設定することで、1種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別を実現した。この2種類

の瞬目種類識別法を、本章で課題とした3種類の瞬目の識別に適用するため拡張すると、それらのしきい値として以下に示す式を用いる方法が考えられる [41].

$$\text{Th}_{d1} = \frac{\overline{D_{v1}} + \overline{D_{v2}}}{2} \quad (4.2)$$

$$\text{Th}_{d2} = \frac{\overline{D_{v2}} + \overline{D_{iv}}}{2} \quad (4.3)$$

式 4.2 および式 4.3 において、 $\overline{D_{v1}}$ 、 $\overline{D_{v2}}$ 、および  $\overline{D_{iv}}$  はそれぞれ、「しっかり」と行なう瞬目、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目、および自発性瞬目の持続時間の平均値を表す。識別対象の瞬目から得た持続時間の値を  $\text{Th}_{d1}$  と比較し、しきい値をこえたものを「しっかり」と行なう瞬目と判定する。それ以外で、持続時間の値が  $\text{Th}_{d2}$  より大きい瞬目を「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目と判定し、 $\text{Th}_{d2}$  以下の瞬目を自発性瞬目とみなす。

このように、3種類の瞬目種類識別は、2段階の判定により実現できる。以後の議論のため、これらのうち「しっかり」と行なう瞬目とその他の種類の瞬目の判定を判定1と呼ぶ。また、自発性瞬目とその他の瞬目との判定を判定2と呼ぶ。この例では判定に持続時間パラメータを用いているが、これらの判定はそれぞれ最大振幅値パラメータまたは振幅の積分値パラメータに替えて識別することができる。4.4節では、同一の瞬目パラメータにより識別を行なう条件を含め、すべての組合せについて識別率を求めて比較して、よりよい方法を決定する。

### 4.3.2 拡張した瞬目種類識別法の検討方法

4.3.1 項で述べた通り、瞬目種類を識別するために2段階の判定を行なう。判定ごとに3つの瞬目パラメータのいずれかを選択し2段階の判定を行なう場合に、 $3^2$  すなわち9通りの組合せが考えられる。4.2.3 項に示した瞬目パラメータにみられた傾向から、一部では良い識別率が見込まれる組合せがあり、別の一部では高い

識別率を期待できない組合せもある。4.4節では、9通りすべての識別率を比較し、適切に識別できる組合せを明らかにする。この比較に用いる瞬目種類の識別率は、以下の式により求める [41].

$$C_{v1}[\%] = \frac{V_{c1} - E_{v1}}{V_{c1}} \times 100 \quad (4.4)$$

$$C_{v2}[\%] = \frac{V_{c2} - E_{v2}}{V_{c2}} \times 100 \quad (4.5)$$

$$C_{iv}[\%] = \frac{Iv_c - E_{iv}}{Iv_c} \times 100 \quad (4.6)$$

$$C_t[\%] = \frac{C_{v1} + C_{v2} + C_{iv}}{3} \quad (4.7)$$

式4.4～式4.7において、 $C_{v1}$ 、 $C_{v2}$ 、および  $C_{iv}$  は順に「しっかり」と行なう瞬目、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目、および自発性瞬目の識別率をそれぞれ示す。また、 $V_{c1}$ 、 $V_{c2}$ 、および  $Iv_c$  は順にそれらの瞬目個数を、 $E_{v1}$ 、 $E_{v2}$ 、および  $E_{iv}$  は順にそれらの誤識別の個数をそれぞれ表している。

ここで、「しっかり」と行なう瞬目の個数  $V_{c1}$  および「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目の個数  $V_{c2}$  は、実験者（著者）が動画像を観察し、随意性瞬目を指示する2種類のピープ音それぞれの直後に生じた瞬目を手動でカウントする。自発性瞬目の個数  $Iv_c$  も同様に、動画像から手動でカウントして求める。また、誤識別は各種類の瞬目個数のうち、自動識別の結果が手動識別とことなった瞬目の個数を表している。そして、式4.7により3種類の各瞬目識別率から求めた平均値を、全体の識別率  $C_t$  として比較のための指標に用いる。

## 4.4 瞬目種類識別法の評価

本節では、複数の瞬目パラメータの組み合わせによる瞬目種類識別法のうち、よりよい条件を明らかにするため、瞬目計測の本実験を行なう。この実験により得た瞬目データを用いて瞬目種類の結果を比較する。また、他の関連研究との比較を行なうことで、提案する瞬目種類識別法の有効性を評価する。

### 4.4.1 瞬目計測実験

評価に用いる2種類の随意性瞬目を計測するため、以下の内容の本実験を行なった [41]。まず、式 3.4 および式 3.5 により瞬目抽出のしきい値  $Th_1$  と  $Th_2$  を決定するため、3秒間の開眼する期間を設ける。開眼する期間ののち、キャリブレーション用の瞬目パラメータを計測するため、単一のビーブ音と2連続のビーブ音とを3回ずつ発生させる。その後、瞬目を180秒間計測する。計測中には、5から7秒の間隔（ランダム）で2種類のビーブ音を交互に発生させる。被験者には、単一のビーブ音を聞いたら「しっかり」と瞬目を行なうよう指示を与え、2連続のビーブ音を聞いたら「しっかりとなるべく短く」瞬目を行なうよう指示を与えて、随意性瞬目を計測した。本実験では、被験者は2種類の随意性瞬目についてそれぞれ15回程度の実行を求められる。また、この実験中において生じた自発性瞬目も記録した。このとき、この瞬目種類識別は入力インタフェースへの応用を目的としていることを事前に被験者に伝えたが、具体的な瞬目の持続時間の指示は与えていない。

本実験の被験者は10名(20代男性6名, 20代女性2名, 30代男性2名)を対象とした。計測環境は、3.2節に示したものと同様であり、記録された動画はオフラインで処理される。式 3.4 および式 3.5 を用いた瞬目抽出法により抽出に成功した瞬目データをもとに、4.4.2項にて識別結果を示し、識別法の評価を行なう。識別法の評価では、上述のキャリブレーション用の瞬目データを瞬目種類識別のた

めのしきい値決定に用い、これらとは別にその後の計測期間に取得した瞬目を識別対象として用いる。

#### 4.4.2 瞬目種類識別の結果

本項では、4.4.1項の本実験の瞬目データから求めた瞬目種類の識別率を示し、結果を比較する。表4.1に、瞬目パラメータの組合せ9通りにより得たそれぞれの全体の識別率  $C_t$  を示す。表4.1の各行は判定1に用いた瞬目パラメータを、各列は判定2に用いた瞬目パラメータを表す。数値はそれぞれ、瞬目パラメータの組合せ条件における全体の識別率  $C_t$  を表す。なお、以降の議論のために表中に C1～C5の番号を付した。

表 4.1: 全体の瞬目種類識別率  $C_t$  [%] の比較 [41]

判定1に用いる パラメータ	判定2に用いるパラメータ		
	持続時間	最大振幅値	振幅の積分値
持続時間	85.2	90.0 (C1)	90.8 (C2)
最大振幅値	63.2	67.5	68.7
振幅の積分値	90.4 (C3)	95.3 (C4)	96.2 (C5)

表4.1から、5つの条件において90%以上の識別率を示していることがわかる。具体的には、判定1と判定2に用いる瞬目パラメータとして順に、持続時間パラメータと最大振幅値パラメータを用いる条件(C1)、持続時間パラメータと振幅の積分値パラメータを用いる条件(C2)、振幅の積分値パラメータと持続時間パラメータを用いる条件(C3)、振幅の積分値パラメータと最大振幅値パラメータを用いる条件(C4)、そしていずれも振幅の積分値パラメータを用いる条件(C5)である。これらのうち、C5の条件において識別率が最高になった。

このC5の識別率は、その次に高いC4を除いた他の条件との差が大きいように見える。このことを確かめるため、C1～C5の各識別率データを用いて、対応のあ

る（反復測定による）一元配置の分散分析を行なった。各条件について識別率の平均値がすべて等しいことを帰無仮説  $H_0$  とし、有意水準 5 % で処理したところ、算出された分散比  $F_0$  と棄却境界値  $F$  との間に  $F_0 = 3.706 > F(4, 36; 0.05) = 2.634$  の関係が得られ、 $H_0$  を棄却した。このことから、C1~C5 の間のいずれかに有意な差が含まれることが明らかになった。さらに、この C1~C5 の間の有意差を詳細に確かめるため、これらの条件間で可能なすべての組合せを対象として多重比較を行なった。ここで、対応ありのデータに適用可能な多重比較法 [100] として、Bonferroni の方法 [101] を採用した。第 1 種の過誤の確率を 5 % とし、各条件の組について平均値に差がないことを帰無仮説として多重比較を適用した結果、いずれの組の間にも有意差は認められず、帰無仮説は保留された。以上の結果から、積極的には有意差が認められなかったものの、C1~C3 と C4 および C5 との間では、平均値の差が大きい傾向があると考えられる [41]。

なお、判定 1 と判定 2 の適用順序を入れ替えることで、より高い識別率を得られる可能性もある。そこで、判定 2 を先に行なった場合の識別率をすべての組合せについて求めて比較した。その結果、識別率が高くなる組合せ条件がみられたが、その場合でも差は 1 % 未満であった。とくに、C4 および C5 の条件においては逆順にすることで識別率が高くなることはなかった。そのため、判定の適用順序を入れ替えた場合の結果については比較に含めない。

次に、C4 および C5 の条件について、4.4.1 項の本実験の瞬目データから求めた瞬目種類ごとの識別率を比較し、考察する。各瞬目種類に対応する組合せ条件ごとの識別率を表 4.2 に示す。

表 4.2 において左端の列は被験者を表し、それ以降は「しっかり」と行なう瞬目、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目、自発性瞬目、および全体の順に、2 つの組合せ条件 C4 および C5 の識別率をそれぞれ示している。これら 2 種類の条件では、いずれも判定 1 に振幅の積分値パラメータを用いており、「しっかり」と行なう瞬目の識別結果は同じである。全体の識別率を比較すると、5 名の被験者が C5 の条件で高い識別率を示したが、被験者 A および I の 2 名は C4 のほうが識別率

表 4.2: 各種類の瞬目に対する詳細な識別率 [%] の比較 [41]

被験者	しっかり ( $C_{v1}$ )		しっかりと なるべく短く ( $C_{v2}$ )		自発性瞬目 ( $C_{iv}$ )		全体の識別率 ( $C_t$ )	
	条件 C4	条件 C5	条件 C4	条件 C5	条件 C4	条件 C5	条件 C4	条件 C5
A	100	100	92.9	78.6	100	100	97.6	92.9
B	100	100	100	100	100	100	100	100
G	100	100	100	100	88.9	100	96.3	100
H	85.7	85.7	84.6	100	100	100	90.1	95.2
I	86.7	86.7	100	92.3	96.6	97.7	94.4	92.2
J	92.9	92.9	85.7	100	100	87.1	92.9	93.3
K	100	100	100	100	100	100	100	100
L	100	100	91.7	91.7	94.6	98.2	95.4	96.6
M	86.7	86.7	100	100	100	100	95.6	95.6
O	100	100	83.3	91.7	89.7	96.6	91.0	96.1
平均	95.2	95.2	93.8	95.4	97.0	98.0	95.3	96.2

は高い。この他の被験者 B, K および M の 3 名はどちらの条件でも同じであった。このように、最高の識別率を得られるパラメータの条件には個人差があるものの、平均は C4 の 95.3 % に対し C5 では 96.2 % となり、判定 2 に振幅の積分値パラメータを用いる C5 のほうが、やや高くなる傾向がみられた。

以上の結果から、著者の対象とした瞬目パラメータを用いて 2 種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別の実現方法として、2 段階のしきい値判定による方法が有効であることが確かめられた。とくに、2 段階のしきい値判定に振幅の積分値パラメータと最大振幅値パラメータを用いる条件 (C4)、またはいずれも振幅の積分値パラメータを用いる条件 (C5) において、被験者 10 名について平均で約 95 % の識別率を示し、高精度に識別が可能であることが明らかとなった [41]。

### 4.4.3 関連手法との比較

本項では、著者の提案する C4 および C5 の条件における瞬目種類識別法の有効性を示すため、他の関連する瞬目種類識別法との比較を行なう [41].

先行研究において、長い随意性瞬目と短い随意性瞬目を識別する方法がある [32, 97]. いずれも、画像処理によりテンプレートマッチングの相関係数を瞬目の波形として求めている. この波形の定義は、著者の計測方法とはことなる. しかし、著者の方法に含まれる、瞬目の持続時間をパラメータとして識別を行なっている. これらの先行研究のうち、Grauman らの実験結果 [97] によれば、統計的に求めた固定値を持続時間のしきい値として、15 名の被験者により長い随意性瞬目と短い随意性瞬目の 2 種類を識別する実験を行ない、93.0 % の精度で識別に成功している. この文献では、被験者ごとの詳細な識別率は示されておらず、ばらつきを含めて比較することは難しいが、4.4.2 項で述べた条件 C4 または C5 により識別を行なった場合は、10 名の被験者で約 95 % の識別率を得ており、これよりも識別率の平均値は高い.

また、Królak らの実験結果 [32] では、持続時間のしきい値として固定値を用いて識別を行なった結果、それら 2 種類の瞬目に対し 98.31 % の識別率を示しており、著者の識別結果よりも高い. しかし、この文献では瞬目種類識別の被験者数が明示されておらず、単純な比較は難しい. これらの研究 [32, 97] はいずれも、短い随意性瞬目と自発性瞬目を同じ種類とみなし、それらの瞬目を区別していない. すなわち、インタフェース構築の際に入力意図として用いることができる随意性瞬目は 1 種類である. 著者の実験結果は、これらの結果に近い精度で、自発性瞬目とは別に 2 種類の随意性瞬目を識別できることを示している.

このほか、EOG 法により得た瞬目波形にテンプレートマッチングを適用し、左右それぞれのウィンク（片眼の瞬目）とダブルブリンク（2 連続の瞬目）という複数種類の瞬目に対して、相関係数を特徴量として識別する手法も提案されている [25]. この研究では、7 名の学習データにもとづいてテンプレートを生成したのち、

分類器の境界決定アルゴリズムであるSVM(Support Vector Machine)を用いて構成した分類モデルによる識別を検証している。この識別法により、被験者1名の識別結果が99.00%であったと報告されている。著者らの方法はこれよりも識別率は低いが、Missimerらの報告[26]に示されているようなウイंकができないユーザに対してでも2種類の随意性瞬目を識別でき、かつ、EOGなどの専用の計測装置が不要であるという利点がある。

著者が採用したような単純なしきい値を設ける以外にも、瞬目種類識別の方法が考えられる。さらなる検討事項として、テンプレートマッチングによる識別を試みる。具体的には、各瞬目種類についての瞬目時波形をテンプレートとして保存しておき、識別対象との形状がもっとも類似するテンプレートを求めることで瞬目種類が識別できる。テンプレートは、キャリブレーションの期間において第1番目に取得した各種類の瞬目波形とし、類似尺度にはSAD(Sum of Absolute Difference)[102, 103]を用いた。4.4.1項の本実験で得た瞬目データを用いて、テンプレートマッチング法により3種類の瞬目種類識別率を算出したところ、被験者10名に対する全体の識別率は平均で約90.9%となり、著者の提案するC4およびC5の瞬目種類識別法よりもやや低かった。このテンプレートマッチング法においては、波形の類似指標としてサンプル値の振幅の差を時間方向に加算し、それを評価する。これは、4.2.2節で述べた振幅の積分値パラメータと同じ次元の比較を行っており、4.4.2項で述べたパラメータ条件C5に近い識別率が得られると期待できる。しかし、結果を比較すると、著者らの提案する手法よりも識別率がやや低かった。このときの誤識別に、テンプレートとして採用した瞬目における特徴の偏りが影響していた。著者らの提案する単純なしきい値設定による識別法では、複数個の瞬目によって得たパラメータ値から最良と期待できる代表値を求めるため、代表となる特徴の偏りによる影響が抑えられたと考えられる。

以上のように、著者の提案する拡張した瞬目種類識別法は、専用の計測装置が不要な画像解析法によって、2種類の随意性瞬目と自発性瞬目についての比較的高精度な識別が可能であることが確かめられた。

# 5 瞬目情報を用いた 視線入力システム

本章では、著者らが開発した視線によって対象を選択し、随意性瞬目を識別することにより入力決定する入力システムについて詳述する。まず、瞬目による入力インタフェースの検討のため、5.2節で述べる検討のためのマウス操作システム [105] を開発した。この知見をもとに、3章で述べた瞬目計測および瞬目種類識別法を、著者らの従来システムである注視により入力決定する日本語文字入力システム [22] に適用し、提案システムとして、随意性瞬目により入力決定する日本語文字入力システム [43] を新たに開発した。この提案システムの詳細を 5.3 節で述べ、実験にもとづく評価を行なう。

## 5.1 視線入力システムの概要

### 5.1.1 視線入力システムの要件

日本語文字に対応した視線と瞬目による文字入力システムは、先行研究においてもいくつか提案されている [2, 8, 12, 17, 20] が、自然光のもとで利用可能な画像解析による入力システムは少ない [17, 20]。これら自然光下の画像解析による文字入力システムにおいて、文献 [17] の被験者数は 2 名、文献 [20] の被験者数は 6 名であるが瞬目によって入力に成功した被験者は 3 名と少ない。赤外線光源 [2, 8] や EOG [12] などの専用の計測装置を用いる文字入力システムもあるが、一般のユーザにとってはそれらのハードウェア条件が導入時の負担となる。このような背景のもと、自然光下の視線と瞬目によるインタフェースのアプリケーションとして、日本語文字入力を行なうシステム（提案システム）を提案し、多くの被験者を対象にその性能を評価する。

著者らは、画面上の注視位置にマウスカーソルを追従し、視線の停留時間によって入力決定する、マウス操作システムを開発した [104]。まずは、この視線によるマウス操作システムに瞬目による入力決定機能を追加し、視線と瞬目による入力について検討する [105]。この検討のためのマウス操作システムは、著者らの採用している自然光下の計測環境において、画面上の任意の位置に視線（注視点）を移動させて、瞬目との組み合わせによる入力が可能かどうか確認を行なったもので、具体的な文字入力を行っていない。

これとは別に、著者らは、2.3.1.3 目で述べた注視した指標を選択する方式の視線入力システムのひとつとして、画面上に表示した多指標を視線によって選択し、一定時間の注視により入力決定する方法を開発している [22]。この停留時間により多指標選択を行なう視線文字入力システムを、従来システムと呼ぶ。従来システム [22] の設計において、日本語文字入力に適した指標数を検討し、必要な 12 個の指標を実用上十分な精度で判別できることをすでに確かめている [22]。これらの知見をもとに、本章では、日本語文字入力に適した 12 個の指標群を視線と瞬目の組み合わせによって選択決定する、性能の高い実用的な日本語文字入力システムの実現を目指す。

### 5.1.2 視線入力システムの構成

提案システムは、3.2 節の計測環境と同様のハードウェアによって構成される。すなわち、眼球近傍の動画像を撮影するためのビデオカメラ（ソニー HDR-HC9）と、撮影された動画像から視線計測および瞬目波形を求めるなどの処理をするパソコン（OS:Windows 7, CPU:Core i7 物理 4 コア, クロック周波数:2.93GHz）から成る。ただし、3.2 節の計測環境とはことなり、ビデオカメラとパソコンとの接続に IEEE1394 インタフェースを採用している。

撮影された動画像は DV フォーマットで入力され、フレームレートは約 30(29.97) フレーム/秒（インタレース方式）である。また、提案システムでは、ディスク

装置への記録は行なわず，動画像をオンライン処理することによって各種の計測を行なう．IEEE1394 インタフェースを介した DV フォーマットの動画像入力は，著者らが先行研究で開発した視線入力システム [22] に採用した方式と同様であり，提案システムでもこの方式を採用する．本章で述べる検討に用いたマウス操作システムと提案システムには，著者らが先行研究で開発した別々の視線計測方式を採用する．しかしながら，いずれの視線計測法においても入力動画像の形式は共通であり，本章の各システムにおいてもこれらと同様の水平 360 × 垂直 240 画素の解像度を用いる．

## 5.2 瞬目による入力インタフェースの検討

著者らはまず，瞬目によって決定する視線入力インタフェースの実現が可能であることを確かめるため，先行研究で開発した視線入力システムのひとつである，停留時間により入力決定するマウス操作システム [104] に瞬目計測の機能を追加し，検討を行なった [105]．

### 5.2.1 視線入力の方式

著者らが検討に用いたマウス操作システムは，注視点を計測するため，強膜反射法を応用した画像解析による視線計測法 [104, 105, 106] を採用している．この方法では，眼球近傍の画像から眼球開口部の形状を抽出し，図 5.1 のように領域を設定する．その領域内における輝度の積分値を求める．2.2.3.3 目に述べた強膜反射法の図 2.6 の要領で，左右の領域の輝度の積分値の差を求めると，水平方向の視線移動に対応する量（水平視線値）が得られ，垂直方向については左右の領域の輝度の積分値の和を求めると，視線移動に対応する量（垂直視線値）が得られる．

この視線計測法によって，水平方向の注視点計測誤差が視角にして約 0.6 度，垂直方向は約 1.1 度 [105, 106] の精度を得られることを確認しており，視線入力を目

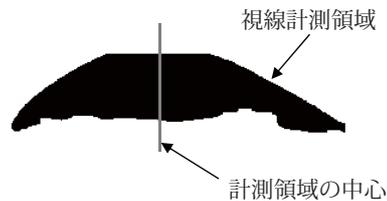


図 5.1: 水平方向視線計測領域の設定例 [104, 105, 106]

的に対して十分実用的である。このアルゴリズムによって求めたパソコンのモニタ上の注視点にマウスカーソルを追従させることで、マウス操作を実現できる。

### 5.2.2 瞬目計測の適用

5.2.1 項で述べたマウス操作システムは、10 フレーム/秒のサンプリングレートで動作する。このような低サンプリングレートの条件下では、著者らが 3.3.2 項で述べた、瞬目波形の差分値による瞬目時波形の抽出は適用できない。そこで、簡易的に計測することができる瞬目パラメータとして、瞬目の開眼時と閉眼時の眼球開口部面積の中間値（半値）を求めて瞬目を検出し、瞬目波形がその値以下である時間（半値幅）を瞬目種類識別に用いる瞬目パラメータとした [107, 108]。

瞬目種類の識別法には、3.4.2 項に示した式 3.6 を採用する。なお、本システムにおいては、視線計測特性のキャリブレーションの前に 1 回の意図的な瞬目を行ない、随意性瞬目の代表値を取得する。また、自発性瞬目の代表値は、200 ミリ秒（2 サンプルに相当）を用いた。以上で述べた瞬目計測の機能を、5.2.1 項で述べた視線によるマウス操作システムに追加し、視線移動によってマウスカーソルを操作し、随意性瞬目によって選択決定する入力インタフェースを構築した。なお、入力決定のための随意性瞬目の動作時に、まぶたが閉じることによる視線計測誤差の影響でマウスカーソルの位置が移動してしまう。そのため、構築したシステムでは、入力決定の際に 5 サンプル前のマウスカーソルの座標情報を用いた。

この視線と瞬目によるマウス操作インタフェースを用いて、被験者 16 名の評価実験を行なった。この実験では、パソコンの画面上のランダムな位置に 10 回表示される、円形指標（大きさ：直径 4 度）を視線により選択し、瞬目により決定する課題を設定した。その結果、マウスカーソルを移動させ、随意性瞬目により選択決定するまでに要する時間が、平均で約 5.68 秒 [105] となり、16 名の被験者全員が視線による選択と随意性瞬目による入力決定を完了することができた [105]。

## 5.3 日本語文字入力システムへの応用

本節では、著者が開発した瞬目により入力決定する視線文字入力システム（提案システム）[43] について、詳細を述べる。なお、本論文における「リアルタイム」とは、フレーム分割を適用した場合のサンプリング周期である  $1/60$  秒、すなわち約 16.67 ミリ秒以内に 1 サンプルあたりの処理が完了することを指す。

### 5.3.1 視線入力的方式

著者らが従来開発した注視による視線文字入力システム（従来システム）[22] における視線計測には、水平方向には強膜反射法を応用し、垂直方向には視線移動による眼球近傍の光強度分布の変化を検出する画像解析法 [79] を採用している。著者が新たに開発した提案システム [43] においても、同様の視線計測法を用いる。

水平方向の視線検出法の概念図を図 5.2(a) に示す。水平方向の視線計測においては、眼裂の中央を境界とした左右の領域について輝度をそれぞれ積分し、それらの積分値の差によって視線方向に応じた視線値を得る。視線値と視線方向の移動量（視角）はほぼ直線的な関係にあるため、ユーザごとにキャリブレーションでこの直線を求めると、視線計測時に得られる視線値から水平方向の注視位置を求めることができる。図 5.2(a) における領域 A および領域 B は、それぞれ水平  $90 \times$  垂直 30 画素に設定した固定サイズの矩形領域とし、各領域が眼球開口部に適

切に配置されるようビデオカメラの撮影範囲を計測開始前に調整する。

なお、5.2節で対象としたマウスカーソル操作の目的には、2次元的に高分解能な視線計測を行なうため、使用のたびに眼球露出部を抽出する処理が必要である。これに対し、固定サイズの矩形領域の方法を用いるとやや計測精度は低下するものの、提案システムで採用する多指標選択の目的には実用上十分な精度が得られる [22]。その上、あらかじめ領域のサイズが決まっていることから、上述の眼球露出部の抽出処理が不要になり、視線特性のキャリブレーションを簡略化できる利点があるため、この方法を採用した。

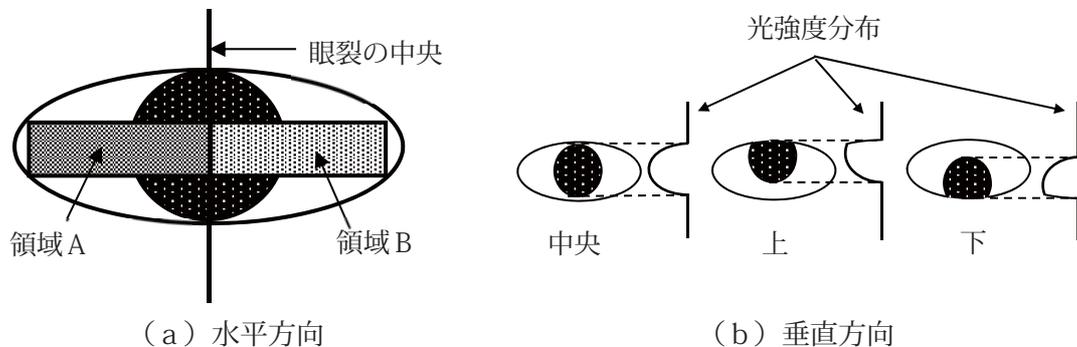


図 5.2: 視線計測領域の模式図 [22, 43]

垂直方向の視線計測法の概念図を図5.2(b)に示す。垂直方向の計測では、視線移動による画像中の光強度分布（水平方向の1ラインごとの光強度を縦軸方向に1次元射影した分布）の変化により視線方向を求める方法を採用する。視線が上下に移動すると虹彩位置が上下するため、システム使用の初期にキャリブレーションによって、たとえば上中下の3段階の光強度分布を基準値として記録しておけば、その基準値と視線計測時に得た光強度分布とを比較し、差がもっとも小さいものを求めることで3段階のいずれを注視しているかを識別することができる。光強度分布を取得する範囲は、水平180×垂直60画素の矩形領域であり、上述の領域Aおよび領域Bの範囲設定とともに、計測開始前に決定される。この光強度分布を取得する領域の大きさを用いて、上中下の3段階を識別する方法を実装した従来システムを著者らはすでに開発しており、十分な計測精度を得られることを確

認している [22]. この提案システムにおいても, 従来システム [22] と同様に, 目頭位置による頭部移動補正を行なっている.

以上の視線計測のため, システム利用の初期に視線計測特性のキャリブレーションを行なう. 視線計測特性のキャリブレーションでは, 画面上に図 5.3 に示すような 5 つの指標を表示され, そのうち 1 つが赤色で表示される. この赤色の位置が切り替わり, それを注視しているときの視線値および光強度分布を取得する. この視線計測特性のキャリブレーション処理が完了すると, 上下各 6 個ずつ, 計 12 個の指標を注視によって選択できるようになる.

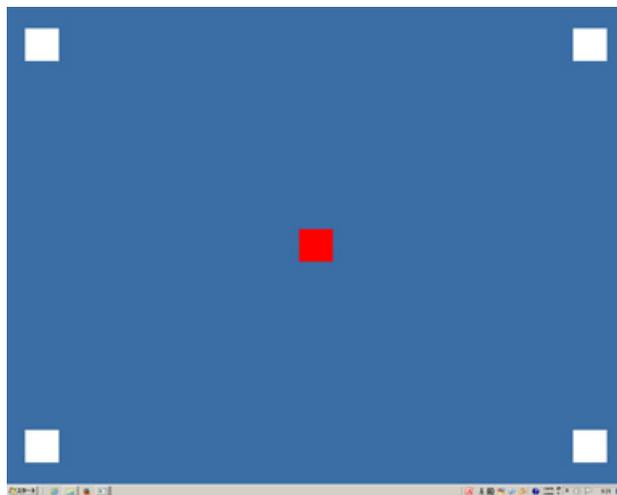


図 5.3: 視線計測特性のキャリブレーションに用いる指標群 [43]

### 5.3.2 日本語文字入力の機能

本項では, 提案システムの文字入力機能について詳説する. この文字入力機能の実現に, 日本語文字入りに適した指標数による多指標選択方式を採用することで, 性能の高いシステムを目指す. この多指標選択方式では, コマンドの機能を割り当てた指標を画面上に表示しておく. ユーザがそれらの指標を選択したのちに入力決定すると, 該当するコマンドが実行される. ここで, コマンドの 1 つとして, 1 画面分の指標に割り当てた機能群を別の機能群に切り換える動作を採用す

ることによって、1画面分の指標数（本節の提案システムでは12個）をこえる数の入力機能をシステム上から実行可能にしている。

文字入力機能は、かな文字を入力するかな入力モード、漢字変換などを行なう制御モード、そして英数字の入力が可能な英字入力モードおよび数字入力モードの4つの画面モードから成る。これらのうち日本語文字入力に最も重要な、かな入力モードの指標群に設定した機能を図5.4に示す。

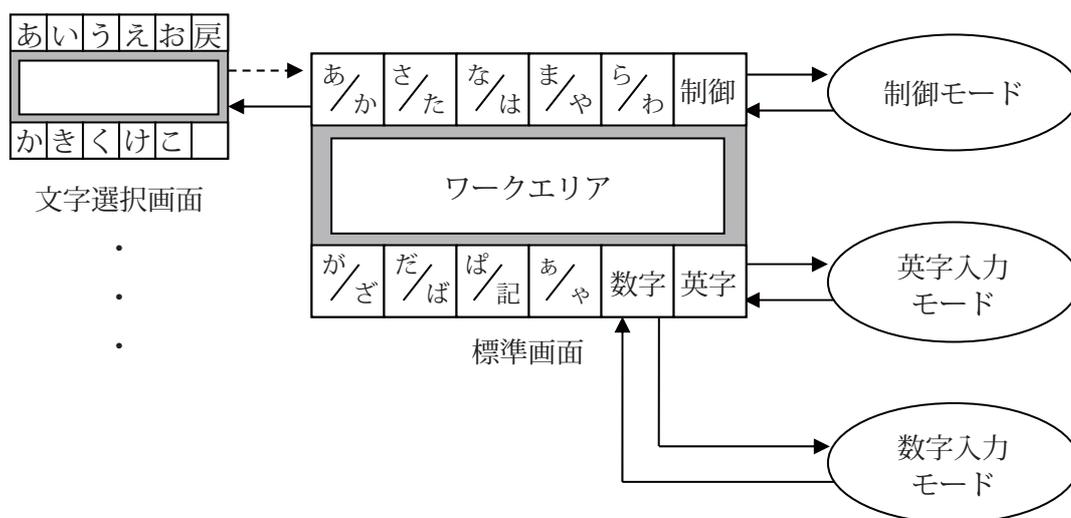


図 5.4: かな入力モードの機能 [22, 43]

かな入力モードは、図5.4の中央に示した初期に表示される画面（標準画面）と、左側に示したような文字を選択する画面（文字選択画面）から成る。文字を入力するときには、まず、標準画面から指標群の切り換えを行ない、文字を選択する。標準画面において、所望の文字を含む行を選択すると指標群が切り換わり、文字選択画面が表示される。その中から所望の文字を選択することで入力が行われる。図5.4中の実線の矢線は指標選択による遷移を表し、破線の矢線は指標選択による文字入力後の自動的な遷移を表す。図5.4のように、上段には「あ行」から「わ行」までの清音、下段には「が行」から「ば行」までの濁音、半濁音「ぱ行」、拗音を含む小文字書きのかな文字がそれぞれ配置されている。また、句読点や長音記号などは記号文字として入力できる。

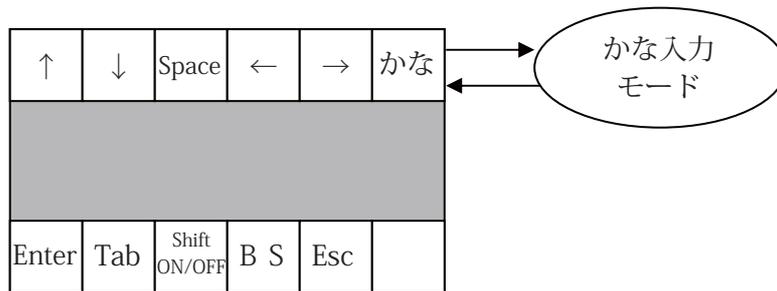


図 5.5: 制御モードの機能 [22, 43]

制御モードは、図 5.5 に示した通り、“Space”、“Enter”、“BackSpace”など、変換や訂正に用いる各制御キーの機能が割り当てられており、随意性瞬目によりキーボードにおける各キーの打鍵と同様の操作が可能である。漢字変換および変換候補の選択は Space キーの機能により可能であり、かな文字の誤入力が生じた場合には BackSpace で削除することができる。

それぞれの文字の入力や各キーの機能は、指標選択時に各キーを操作する命令をプログラム上で実行しており、内部的なキーボード操作で実現している。漢字変換の際には、Windows 7 標準の日本語入力システムである、MS-IME Standard 2010 を使用した。

### 5.3.3 瞬目計測と視線計測の並行処理

著者らの従来システムでは、画像解析法による視線計測に関して約 5 フレーム/秒の速度で処理を行っていた [22]。その後、コンピュータの性能向上にともない、約 10 フレーム/秒の速度で同様の計測が可能であることを予備実験で確かめた。

瞬目計測については、3 章で述べた通り、水平 1920 × 垂直 1080 画素のハイビジョン動画像を用いて解析を行ってきた。これは瞬目過程の詳細な変化を捉えるために選択した解像度であり、瞬目の性質を明らかにする目的には合致していた。

画像処理を行なう場合には、一般に画素数に比例して処理時間が大きくなる傾向がある。このハイビジョン解像度の条件で瞬目種類識別を行なった場合には、リアルタイム処理で要求されるサンプリング時間の約16.67ミリ秒と比べて1フィールドあたりの処理時間が大きい。したがって、画像処理に要する時間を短縮することがリアルタイム処理を実現するための課題となる。そのため、3.5.2項の予備実験において撮影したハイビジョン解像度の瞬目動画像データを用いて、低解像度であっても識別率を著しく低下させずに処理時間を満足する条件を調査した[42]。

その結果、ハイビジョン動画像の場合、眼球開口部面積の算出に要する時間は8名の平均で1サンプルあたり約98.67ミリ秒であったのに対し、フィールド画像の各辺を4分の1まで間引いた場合（水平480×垂直270画素、インタレース方式）では1サンプルあたり約7.64ミリ秒となり、リアルタイム計測が可能であると予想できる結果を得た。このときの瞬目種類識別率の平均は、ハイビジョン動画像で99.1%、間引いた場合には99.0%と、大きな差はみられなかった[42]。この結果から、さらに低解像度でも識別が可能であると予想し、DVコーデックのうちQVGA解像度に近い、水平360×垂直240画素（インタレース方式）の解像度を採用することにした。この解像度は、著者が開発した視線による文字入力システムの入力動画像と同じであり、本章の目的とする提案システムの瞬目計測方式に適している。

この調査[42]において、この水平360×垂直240画素の解像度についても、約60フィールド/秒の計測が可能であることを確かめた。この条件において、瞬目種類の識別率は実用的な精度を示しているものの、処理時間が最大となったサンプルに着目すると、被験者5名についていずれも11ミリ秒以上を要しており、リアルタイムとして要求される処理時間（約16.67ミリ秒）の約7割以上を瞬目計測の処理のみで占めることになる。つまり、著者らの提案した視線計測[22]とこの瞬目計測処理を続けて行なうことを考えると、要求時間内に処理を完了することは難しい。

そこで、提案システムでは、視線計測と瞬目計測の個々の処理をそのまま行な

うスレッドをそれぞれ生成し、それらをマルチスレッドの構成とする方法を採用した [43]. これによって、見かけ上の処理時間に影響なく並行に処理することが期待できる. すなわち、視線計測は毎秒 10 サンプル、瞬目計測は毎秒 60 サンプルの処理速度を達成できる. 互いのスレッド間の通信には共有メモリを用い、瞬目計測のスレッドにおいて随意性瞬目が検出されたことが知らされると、視線計測のスレッドにおいて次に視線計測処理が行われた際に、注視指標に応じた選択が行なわれる. なお、5.2.2 項で述べた検討に用いたマウス操作システムの評価実験 [105] において、視線が注視点に停留している状態で瞬目を行なうと、注視点にずれが生じることがわかっている. そのため、このマウス操作システム [105] と同様に、随意性瞬目により選択を決定するときには、瞬目の開始点の 0.5 秒前の注視位置を参照する.

#### 5.3.4 瞬目計測の適用

著者らの先行研究 [38, 87] において、3.3.2 項の方法で瞬目時波形を抽出し、瞬目の特徴パラメータを検討した. このとき、検討の対象とした瞬目サンプルは、目視の結果と比べて自動抽出に成功したもののみとした. これは、瞬目の特徴の本質を捉えることを目指して加えた条件であり、該当の先行研究 [38, 87] においては適切であった. しかし、オンライン処理においては、目視と大きくことなる瞬目時波形（抽出不良）を手動でとり除くことはできない. そこで、著者は瞬目抽出において 3.3.2 項の方法をもとに開始点や終了点の決定条件を追加し、抽出不良の発生を抑えることを目指す [43]. なお、本論文における「オンライン処理」とは、リアルタイムに処理される瞬目計測のうち、記録済みの動画像ではなく、ビデオカメラから逐次入力される動画像を対象としたものを指す.

予備実験により確かめたところ、抽出不良を生じる原因は主に 2 つであることがわかった. 一つは、表情の変化や視線移動によって生じる開眼中のまぶたの動きを、誤って開始点として検出する場合である. もう一つは、開始点は正しく検

出されたものの、閉眼中のまぶたの動きにより誤って終了点を検出してしまう場合である。これらはいずれも、瞬目波形の振幅方向の情報を用いることで対処できる。一般に、瞬目発生時には瞬目波形のサンプル値が大きく変化する。とくに、閉眼時波形では開眼状態を時系列の先頭としてサンプル値が大きく減少し、開眼時波形では閉眼状態を先頭として大きく増加する。著者らの先行研究において、瞬目の最大振幅値の半値をしきい値とすれば瞬目発生時のサンプル値の大きな変化を検出できることがわかっている [105]。この知見を用い、サンプル値において閉眼時波形または開眼時波形の候補から瞬目の最大振幅値の半値をこえる変化があるものをしきい値判定により選択すると、上述した抽出不良の原因となるようなまぶたの動きによる小さなサンプル値の変化の誤検出を抑えることが期待できる。

このとき、オンラインでの計測においては瞬目の終了点が確定する前には対象の瞬目の最大振幅値が不明であり、最大振幅値の推定が必要である。著者らの瞬目種類識別においては、キャリブレーション時に得られる瞬目から正規化された最大振幅値のパラメータの代表値（平均値）を得ることができる（パラメータ値は 0.2~0.7 程度となる）ため、これに瞬目抽出処理において得られた開始点の候補（閉眼時波形の先頭のサンプル値）を乗じると、対象とした瞬目の最大振幅値の推定値を得ることができる。この最大振幅値の推定値を含めた具体的なしきい値の算出法を、以下にそれぞれ述べる。

設定するしきい値の模式図を図 5.6 に示す。図 5.6 において、縦軸は眼球開口部面積、横軸は時間軸をそれぞれ表している。開始点の検出については、差分値が 3.3.2 項の式 3.5 以下の期間を閉眼時波形の候補とし、時系列に走査した末尾の点  $P_{e1}$  におけるサンプル値  $A_{e1}$  が次に示すしきい値  $A_{th1}$  以下であればその期間を閉眼時波形として確定して、その時系列の先頭のサンプル点  $P_{s1}$  を開始点と決定する。

$$A_{th1} = A_{s1} - \frac{A_{s1} \times MA_{iv}}{2} \quad (5.1)$$

式 5.1 において、 $A_{s1}$  は閉眼時波形の候補において時系列に走査した先頭のサンプル値を示している。また、 $MA_{iv}$  は瞬目特性のキャリブレーションにより得た自

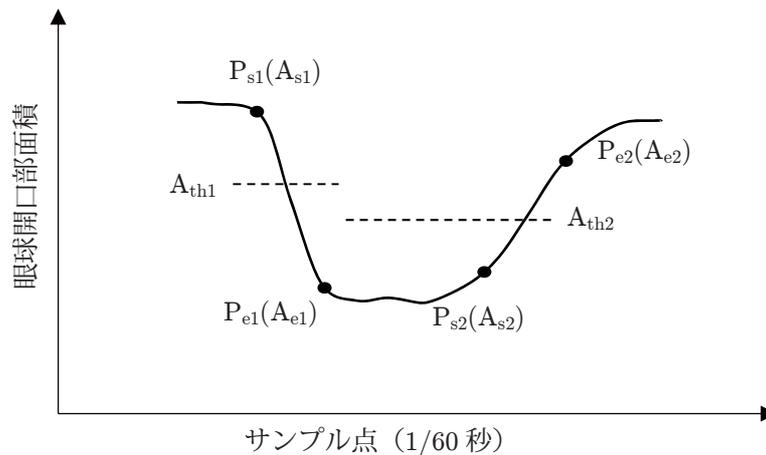


図 5.6: オンライン瞬目抽出のためのしきい値 [43]

発性瞬目の正規化された最大振幅値パラメータの平均値を示す．この第2項の分子 ( $A_{s1} \times MA_{iv}$ ) が，上述した最大振幅値の推定値に相当する．また，終了点の検出については，差分値が 3.3.2 項の式 3.4 以上の期間を開眼時波形の候補とし，時系列に走査した末尾の点  $P_{e2}$  におけるサンプル値  $A_{e2}$  が次に示すしきい値  $A_{th2}$  以上であればその期間を開眼時波形として確定し，末尾のサンプル点  $P_{e2}$  を終了点と決定する．

$$A_{th2} = A_{e1} + \frac{A_{s1} \times MA_{iv}}{2} \quad (5.2)$$

式 5.2 において， $A_{e1}$  は上述の式 5.1 によって確定した閉眼時波形の末尾のサンプル値を示している．そのほかの変数は，式 5.1 と同様である．以上の式 5.1 および式 5.2 の最大振幅値パラメータには，自発性瞬目の値のみを用いている．一般に，随意性瞬目よりも自発性瞬目のほうが最大振幅値は小さい傾向にあり [87]，正しく抽出するための条件が厳しい．そのため，これらの設定によれば随意性瞬目についても正しく抽出可能であると推測できる．

なお，式 5.2 の条件により，ごく少数ではあるが瞬目の終了点が検出できない場合が確認された．そのため，瞬目の持続時間が次に述べる設定値（しきい値）をこえた場合は瞬目開始点の誤検出とみなし，識別対象から除外する．誤検出判定のしきい値を適切に設定するため，著者らの先行研究 [87] において，対象とした

被験者 10 名の中で随意性瞬目の持続時間の平均値が最大であった例を参考に、持続時間の平均値 (約 1.36 秒) とその標準偏差 (約 0.38 秒) の 2 倍の和を求めて 2.12 秒という値を得た。一般に、随意性瞬目の持続時間はこれよりも短くなると考えられるが、さらに少しの余裕をもたせ 2.5 秒を誤検出判定のしきい値に採用した。

## 5.4 提案システムの評価

本節では、5.3 節に示した提案システムを評価するために行なった、日本語文字入力の実験について述べる。

### 5.4.1 評価実験

評価実験として、提案システムを使用し、視線と随意性瞬目によって漢字変換を含む日本語文字入力を行なった。対象の被験者数は 9 名であり、その内訳は 30 代男性 2 名 (被験者 A, B), 20 代男性 7 名 (被験者 C~I) である。

瞬目特性のキャリブレーションにおいては、被験者にあらかじめ画面に「しっかり」の文字を提示しておき、ビーブ音を 5 秒おきに 3 回発生させる。被験者には、ビーブ音を聞いたときに随意性瞬目を「しっかり」と行なうよう、事前に指示した。また、実験中に自然に生じる瞬目 (自発性瞬目) を、我慢する必要がないことを伝えている。瞬目検出のための開眼情報を取得する瞬目波形の計測時間は、3 回目の随意性瞬目の終了前に開眼情報の取得が完了するよう、瞬目特性のキャリブレーションの初期 15 秒間とした。この期間のサンプル値を記録しておき、さかのぼって開眼情報を処理する。この手順によって、瞬目特性のキャリブレーションの完了までに瞬目の自動抽出が可能になり、随意性瞬目と自発性瞬目の取得個数に適応した手順でキャリブレーションをオンライン処理できる。その後、視線特性のキャリブレーションとして、5.3.1 項の図 5.3 に示した 5 点の注視を行なう。

瞬目および視線特性のキャリブレーションの後、画面には図 5.7 のような指標群

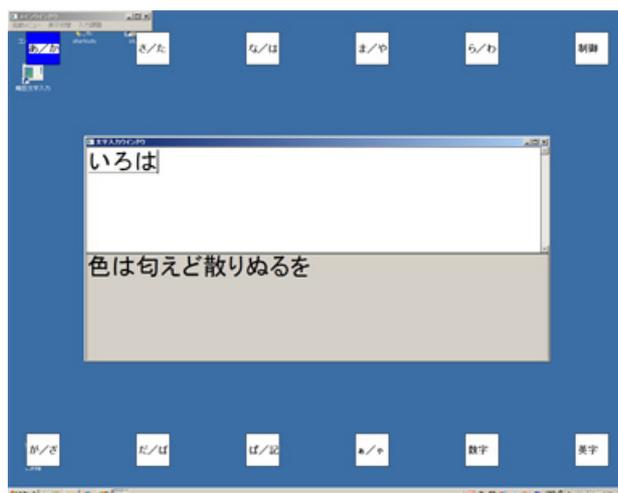


図 5.7: 提案システムの画面例 [43]

と、入力用のウィンドウが表示される。この入力用のウィンドウの大きさは水平約 21 × 垂直約 10 度であり、画面の中央に配置されている。ウィンドウ内の領域は上下に 2 等分されており、上側は文字を入力する領域、下側は入力すべき課題文を表示する領域とした。被験者は初めに下段の左端に“開始”として表示される指標を選択する。この選択により、かな入力モードに遷移して文字入力を開始する。本実験の文字入力中には、上述の入力用ウィンドウに課題の内容を提示しておき、被験者は入力中にそれを参照することができる。このときの、入力およびかな漢字変換操作の完了までに要した指標選択回数と所要時間を計測した。

実験課題には、「いろは歌」（かな表記 48 字，かな漢字表記 39 字）を採用した。他の先行研究では、「こんにちは」など数文字程度の実用的な単語を入力課題として用いることが多い [2, 12, 20]。これに比べて、「いろは歌」は、一定以上の長さを持ち、出現文字の重複が少ないという特徴がある。漢字変換機能を評価するため、旧かな遣いは現代かな遣いに直して入力し、各句の区切りごとに IME の機能を用いて漢字変換を行なう。この実験課題は、著者らの従来システムの評価に用いたもの [22] と同様である。

本実験で入力した内容を図 5.8 に示す。図 5.8 において、(a) はかな漢字表記であり、(b) はかな表記である。被験者は、かな表記に示した読みを入力し、かな漢

字表記のように変換操作をする。このときに必要な最少の指標選択数は128回である。漢字変換においては、5.3.2項の図5.5に示した制御モードの各機能を用いて任意の候補が選択可能であるが、本実験の主目的はかな文字入力にあり、漢字変換は実行できることが確認できれば十分である。それに加えて、被験者間の実験条件を同一にする意図もあるため、あらかじめ漢字変換の辞書を学習させておき、変換の第一候補に課題の結果が得られるように準備した。なお、本実験においては、被験者の拘束時間に配慮し、図5.8の課題を1行ずつ4つのセットに分割して実施する。

色は匂えど 散りぬるを 我が世誰ぞ 常ならむ 有為の奥山 今日越えて 浅き夢見し 酔いもせず	いろはにおえど ちりぬるを わがよだれぞ つねならむ ういのおくやま きょうこえて あさきゆめみし よいもせず
(a) かな漢字表記	(b) かな表記

図 5.8: 本実験に用いた入力課題 [43]

入力を誤った場合には、次の二つの方法で訂正する。文字を入力する際に図5.4の標準画面でグループ（行）の選択を誤った場合には、文字選択画面の右上にある指標の“戻る”を選択してグループ選択の標準画面へ戻る。また、文字を入力した後に誤りを認めた場合は、標準画面の右上にある指標の“制御”を選択し図5.5の制御モードに推移した後に、下段の“BS”(BackSpace)を選択して誤って入力した文字を消去する。その訂正の後に右上にある指標の“戻る”を選択して制御モードから標準画面に戻り、入力を続ける。この実験の詳細な結果を、5.4.2項で述べる。

なお、本研究においては、実用的な日本語文字入力のシステムが利用可能であることを確かめるため、漢字変換を含めた比較的複雑な入力課題を設定したが、より詳細な指標の判別率や瞬目による入力決定の成功率を確かめるためには、かな文字のみを入力する単純な実験課題を設定するとよい。

## 5.4.2 実験結果

本項では、5.4.1 項の評価実験から得た、瞬目計測のリアルタイム性に関する結果と、日本語文字入力の結果を述べる。

提案システムにおいて、5.3.4 項で述べた瞬目計測がリアルタイムに処理されていることを確かめるため、処理時間を計測した。5.4.1 項の実験において文字入力を行なった際に、瞬目計測の1サンプルあたりに要した処理時間を、表 5.1 に示す。

表 5.1: 瞬目計測に要した処理時間の計測結果 [43]

被験者	フレーム分割および 第1フィールド [msec.]			第2フィールド [msec.]		
	平均値	標準偏差	最大値	平均値	標準偏差	最大値
A	9.85	0.49	13.23	6.51	0.35	9.65
B	9.79	0.47	15.18	6.48	0.36	11.29
C	9.88	0.50	14.61	6.50	0.37	10.57
D	9.81	0.45	14.62	6.42	0.33	11.11
E	9.84	0.47	14.88	6.53	0.35	11.49
F	9.84	0.48	15.08	6.49	0.36	11.25
G	9.83	0.46	13.30	6.50	0.34	11.26
H	9.86	0.45	14.79	6.50	0.33	10.92
I	9.86	0.43	14.93	6.54	0.33	9.66
平均値	9.84			6.50		

提案システムではフレーム分割法を採用しており、動画像の1フレームを取得するごとに、2つのフィールド画像に分割し処理を行なう。このとき、処理対象のフレームを取得してから第1フィールドのサンプル値を算出完了するまでに、フレーム分割の処理と第1フィールドの眼球開口部面積の算出処理が順に行なわれる。この処理手順上の特徴を考慮し、表 5.1 ではフレーム分割の処理を第1フィールドの処理に含めて、2つのフィールドの処理時間データを個別に集計した。表 5.1 において、左から1列目は被験者を表しており、続いて処理時間の平均値、標準偏差

および最大値について、フレーム分割と第1フィールドの合計値、第2フィールドの値の順でそれぞれ示している。表5.1におけるフレーム分割と第1フィールドを合計した処理時間における平均値を、第2フィールドの平均値と比較すると、上述の処理手順上の特徴から、フレーム分割処理を含む第1フィールドの処理時間のほうが長くなっている。また、表5.1の結果から、同じフィールドに対しての処理であっても、処理時間に多少のばらつきがみられることがわかる。これは、提案システムの画像処理をマルチタスク型のOSであるWindowsのパソコン上で行っており、そのタスク（プロセス）の切り替えなどが生じていることが原因であると考えられる。

本研究で求めるリアルタイム処理を満足するためには、5.3節で述べたように1サンプルにつき16.67ミリ秒より短い時間で処理を完了する必要がある。表5.1の結果から、フレーム分割と第1フィールドを合計した処理時間の平均値が最大の9.88ミリ秒である被験者Cについて、ばらつきを考慮して標準偏差(0.50ミリ秒)の2倍を平均値に加えた値を求めると10.88ミリ秒となり、リアルタイム処理に要求される処理時間と比べて35%程度の余裕があった。また、表5.1には、処理時間がもっとも大きくなった場合として被験者ごとの最大値を示した。各最大値のうちもっとも大きいのは被験者Bのフレーム分割と第1フィールドを合計した処理時間の15.18ミリ秒であるが、16.67ミリ秒という要求条件よりも短い時間で処理が完了している。以上のように、視線計測と瞬目計測を並行処理した場合でも、瞬目計測および瞬目種類識別をリアルタイムに処理できることが確かめられた。

5.4.2項の実験の計測データから、課題の入力完了までに要した全指標選択数と、最少の指標選択数を超えた回数である超過選択数を求めた。この超過選択数には、誤選択とそれを訂正するための指標選択の回数が含まれる。なお、誤選択とは、訂正の場合を除いて最少選択数の手順とことなる指標を選択することを指す。

評価実験の結果、誤選択が2回以内である被験者が9名中5名に達した。とくに、このうち2名の被験者は、課題の128回の選択を誤りなく実行することができた。生じた誤りの中には、上段にある“制御”の指標を選択を要する入力段階で下

段の“英字”の指標を選択する誤選択が認められた。また、漢字変換の手順を要する入力段階で、次に求められる文字の行を選択する誤選択が生じていた。すなわち、漢字変換を行わずに次の文字を入力しそうになる動作がみられた。そのほか、濁音の行を選択すべき入力段階において、清音の行を選択する誤選択や、実験課題のかな文字を入力する際に、現代かな遣いの行を選択すべき入力段階で、旧かな遣いの行を誤って選択する誤選択も確認された。これらの誤選択は、手順や指標配置の誤認によるものであると考えられる。システムを実用化する場合を考えると、入力手順を指定した課題を設けた場合とことなり、ユーザが任意の手順で操作できるため、入力手順の誤りによる心理的な負担は小さいものと予想される。指標配置の誤りについては、ユーザが長期にシステムを使用して慣れることによる程度解決するものと思われるが、濁音の入力方法や文字の割り当て方法などについてさらに検討する余地がある。

このほか、次に選択を要する指標に隣接した箇所を選択してしまう誤選択がみられ、この種の誤りが最も多かった。5.3節で述べた通り、提案システムでは選択決定するときには識別された随意性瞬目の0.5秒前の指標番号を参照している。このことから、この種の誤りは目的の指標を注視した直後に瞬目入力を行なったことにより、以前に注視していた指標が誤って選択されたことによって生じたと考えられる。以上のように、誤りは生じているものの、それらを被験者自身が正しく訂正でき、9名の被験者全員が課題の漢字変換を含む日本語文字入力を完了することができた。

表 5.2 に、5.4.1 項の実験における日本語文字入力の入力速度について示す。表 5.2 において、各列は左から被験者、文字入力速度、指標選択速度、入力に要した時間をそれぞれ示す。文字入力速度は1分あたりの漢字変換後の入力文字数を表し、指標選択速度は1分あたりの指標選択数を表す。

課題に要した入力時間は、被験者9名の平均で467.4ミリ秒となった。個々の入力速度に着目すると、被験者AおよびDは、誤選択なく入力が完了した被験者であるが、両者の文字入力速度および指標選択速度には大きな差があり、個人差が

表 5.2: 評価実験における入力速度 [43]

被験者	文字入力速度 [字/分]	指標選択速度 [回/分]	入力時間 [秒]
A	6.4	20.9	368.2
B	4.4	17.0	537.8
C	7.3	24.2	322.3
D	4.3	14.1	543.2
E	4.6	16.3	512.5
F	4.8	19.3	487.9
G	5.4	20.4	430.0
H	4.0	14.0	579.2
I	5.5	19.0	425.6
平均	5.2	18.4	467.4

認められる。最も誤選択が多かったのは被験者 F であったが、かならずしも文字入力速度が小さいわけではなく、誤りが生じても速やかに訂正できていることがわかる。この入力速度に関する評価指標を中心に、5.4.5 項で他の関連研究と比較することによって提案システムを評価する。

提案システムは視線移動による指標の選択と、随意性瞬目による入力決定の組み合わせによって動作している。このとき、視線計測の精度（指標判別の精度）と瞬目種類識別の精度について、個々の性能を知りたいという要求もある。個々の実験結果は、視線計測の精度については従来システムの指標判別の成功率（指標判別率）がわかっており、瞬目については 3 章に瞬目種類の識別識別率を示した。組み合わせた入力システムにおける個別の評価は、被験者が視線の到達を認識したかどうか、行なった瞬目は意図的（随意性）かどうかという点を客観的に調べることが難しいため、本実験のデータのみから行なうことは難しい。

視線と瞬目を組み合わせた個別の評価を行なうためには、たとえば、指標の位置をランダムに指定し、被験者にはそれを注視したのち、随意性瞬目を実行させるような実験が必要と考えられる。そのとき、随意性瞬目であることを客観的に

示すため、押しボタンなどにより意図を計測する必要がある。

### 5.4.3 誤選択が入力時間へ及ぼす影響

入力インタフェースの評価として入力速度は一つの評価指標となるが、入力が正しく行なわれなければ、良い効率は得られない。そこで、提案システムにおける指標選択に成功した割合を定量化するため、全指標選択数から誤選択数を引き、全指標選択数で割った値として正選択率を求めた。その結果、被験者9名の平均で97.5%となった。さて、ここで求めた正選択率の違いは、入力時間にどの程度の影響を及ぼすのであろうか。ここでは、一例として、シミュレーションによって求めた、2つの正選択率の条件における仮想的な入力時間を比較し、その影響の程度を示す。なお、入力時間の算出時には前提条件として以下の内容を想定する。

- (前提1) 提案システムの指標配置により、100字のかな文字入力（200回の指標選択）を行なう
- (前提2) 訂正の手順においては誤入力が生じないものとする
- (前提3) 誤入力の内訳として、文字の誤りと行の選択の誤りが同じ頻度で生じるものとする

シミュレーションに用いるパラメータ値を、表5.3に示す。

表 5.3: シミュレーションに用いたパラメータ値

変数名	変数の意味	変数の値
$T_s$	1回の指標選択に要する時間	3.26 [秒/回]
$C_1$	文字の誤りの訂正に要する指標選択数	5 [回]
$C_2$	行の選択の誤りの訂正に要する指標選択数	2 [回]
$T_r$	誤選択が生じなかった場合の規定選択時間	652[秒] (3.26[秒/回] × 200[回])

まず、正選択率が95%の場合についての仮想的な入力時間  $T_{95}$  を求める。この条件では、200回の指標選択に対し10回の誤選択が生じる。上述の（前提3）に

より文字の誤りの回数  $E_1$  と行の選択の誤りの回数  $E_2$  がそれぞれ 5 回ずつとなる。したがって、この条件における仮想的な入力時間  $T_{95}$  は次の通りである。

$$\begin{aligned} T_{95} &= T_r + (C_1 \times E_1 \times T_s) + (C_2 \times E_2 \times T_s) \\ &= 652 + (5 \times 5 \times 3.26) + (2 \times 5 \times 3.26) \\ &= 766 \text{ [秒]} \end{aligned} \quad (5.3)$$

次に、正選択率が 90 % の場合の仮想的な入力時間  $T_{90}$  を求める。この条件では、200 回の指標選択に対し 20 回の誤選択が生じ、文字の誤りの回数  $E_1$  と行の選択の誤りの回数  $E_2$  がそれぞれ 10 回ずつとなる。したがって、この条件における仮想的な入力時間  $T_{90}$  は次の通りである。

$$\begin{aligned} T_{90} &= T_r + (C_1 \times E_1 \times T_s) + (C_2 \times E_2 \times T_s) \\ &= 652 + (5 \times 10 \times 3.26) + (2 \times 10 \times 3.26) \\ &= 880 \text{ [秒]} \end{aligned} \quad (5.4)$$

以上で求めた  $T_{95}$  および  $T_{90}$  の値を用いて、正選択率が 95 % の場合（入力時間  $T_{95} = 766$  [秒]）を基準として、正選択率が 90 % の場合（入力時間  $T_{90} = 880$  [秒]）との入力時間の差の割合  $R$  を求める。

$$\begin{aligned} R &= \frac{T_{90} - T_{95}}{T_{95}} \times 100[\%] \\ &= \frac{880 - 766}{766} \times 100[\%] \\ &= \frac{114}{766} \times 100[\%] \\ &\approx 14.9[\%] \end{aligned} \quad (5.5)$$

式 5.5 の結果から、100 文字を入力する場合、正選択率が 90 % の場合は 95 % の場合と比べて約 114 秒（1 分 54 秒）の入力時間の増加が生じ、割合にして約 14.9 % の入力時間が増加する。

4 章では、2 種類の随意性瞬目が識別方法について議論した。提案システムは、1 種類の随意性瞬目による入力決定が利用可能であった。この瞬目種類識別の機能

を拡張し、2種類の随意性瞬目を適用した視線入力システムを構築することができる。たとえば、1種類の随意性瞬目に通常の入力決定の機能を割り当て、もう1種類の随意性瞬目には BackSpace の機能を割り当てれば、文字入力の課題において文字の誤入力が生じた場合に、容易に誤った文字を削除でき、すぐに元の入力作業に復帰できる。このような容易な訂正機能を利用できれば、入力操作時の効率を向上させ、誤ってもすぐに訂正できるという安心感からユーザの心理的な負担も軽減できるものと期待できる。

#### 5.4.4 視線入力速度の理論値との比較

2.8節において、提案システムと同様の12個（水平6×垂直2個）の指標配置を用いた場合の、理論的な入力速度（1指標あたりの選択時間）を求めた。この条件において、視線入力の1指標あたりの選択時間  $OT$  は、入力決定に要する時間  $ST$  を用いて次のように求められることを述べた。

$$OT = 1.4[\text{秒}] + ST \quad (5.6)$$

2.8節では、著者らの先行研究の文献値 [87] によって  $ST$  の値を仮定した。本実験における瞬目種類識別のキャリブレーションによって得た、「しっかり」と行なう随意性瞬目の持続時間の代表値から被験者間の平均値を求めたところ、被験者9名で約0.9秒という値が得られた。この随意性瞬目を入力決定に用いる場合、 $ST = 0.9$  [秒] を適用し、 $OT = 2.3$  [秒] の理論値を得られる。この値と、本実験の結果を比較する。

本実験では、被験者9名の平均で1指標あたりの選択時間は約3.3秒であった。この実験値と理論値を比較すると、実験値は理論値よりも約1.0秒大きい。本実験においてより大きな操作時間を要している理由の1つとして、被験者に「速く入力しようとする必要はない」という指示を行なっている点が挙げられる。本実験では、高い速度を示すことよりも、多くの被験者が使用できることを確かめる

ことを主な目的としているため、このような指示を与えた。このことから、多くの被験者が、目的の指標の注視判定が行われたことを十分に確認してから入力決定を行っていたのではないかと考えられる。さらに、視線計測のキャリブレーションに対し、頭部の微小な移動などにより注視点のずれが大きくなる場合があり、そのときには注視判定された指標のフィードバックにしたがって、被験者自身が注視位置を微修正する必要がある。この修正操作を行なうと、指標に視線が到達したのちにある程度の時間を要するため、入力時間が大きくなる。

また、設定した実験課題の複雑さも、入力時間が大きくなる要因の1つと考えられる。課題とした操作は、かな文字の入力後に漢字変換の手順がある。目標とする操作完了後の文字列を実験中の画面上に提示しているが、この提示内容は漢字変換後の文字列であり、入力する漢字変換前のかな文字を随時判断し、次の入力手順を決定する必要がある。この認知過程に時間を要し、入力時間に影響しているのではないかと考えられる。

本実験の入力速度の結果を被験者ごとに比較すると、もっとも入力速度が大きい（入力時間が小さい）のは被験者Cで、1指標あたりの選択時間は約2.5秒である。この被験者は、瞬目種類識別のキャリブレーション時に取得した随意性瞬目の持続時間の代表値が、約1.0秒であった。この持続時間を考慮すると、入力時間の理論値は約2.4秒となり、被験者Cの実験値との差は約0.1秒となる。この被験者は指標の誤選択がなく、実験中の注視点のずれは小さかったものと推測できる。実験値と理論値に差が生じた理由としては、上述した入力課題の複雑さが大きく影響していると考えられるが、その差は理論値の4%程度であり小さい。したがって、提案システムは、視線計測および瞬目種類識別のキャリブレーションが適切に行なわれ、対象となる課題が容易であれば、理論値に近い入力速度を得ることができると考えられる。

ただし、以上の比較は、前提として眼球運動や瞬目の動作に困難がない場合を想定しているため、臨床での使用などこれらの運動機能の低下が生じるユーザを対象とした条件では、入力速度を理論値に近づけることが難しい場合もある。

### 5.4.5 考察および関連研究との比較

本項では、5.4.2 項の結果をもとに、著者の提案システム [43] と、これまで提案されてきた瞬目と視線により操作する文字入力システムとの比較を行なう。これまでに提案されたシステムについて、表 5.4 に示す。表 5.4 の各列は、それぞれの手法の提案者に対して、選択の決定方法、評価対象の被験者数、実験課題の文字数および計測の方式を順に表している。これらの各手法について、著者の提案システムとの入力性能比較のため、文字入力に関わる主な評価指標を表 5.5 にまとめて示す。表 5.5 の各列は、それぞれの手法の提案者に対して、入力したかな漢字文字数にもとづく文字入力速度、かな文字のみの文字数にもとづく文字入力速度、指標選択速度を順に表している。提案システムについて求めた文字入力速度として、かな漢字変換後の字数 39 字をもとに求めた 1 分あたりの入力字数と、かな表記の字数である 48 字をもとに求めた 1 分あたりの入力字数を示した。また、指標選択速度は、入力完了までに行なった全指標選択回数をもとに求めた 1 分あたりの指標選択回数である。

表 5.4: 関連研究における入力決定方式と評価の条件 [43]

	入力決定方式	被験者数	実験課題の文字数	計測方式
提案システム [43]	瞬目	9	48 (かな文字のみ)	画像処理 (自然光下)
従来システム [22]	停留時間	5	39 (漢字変換あり)	
新井らの方法 1[17]	瞬目	2	—	
新井らの方法 2[20]	瞬目または停留時間	6	5 字と読上げ	
Chen らの方法 [29]	瞬目	4	—	画像処理 (赤外線照明)
Esaki らの方法 [8]	瞬目	1	85	
伊藤らの方法 [2]	停留時間	6	25~35	
梶原らの方法 [12]	瞬目	10	100	

著者らの従来システム [22] では、5.3 節の提案システムと同様の課題を用いて文字入力機能を評価した。従来システム [22] には、指標選択の決定に視線の一定時間

表 5.5: 関連研究との性能比較 [43]

	文字入力速度 [字/分]		指標選択速度 [回/分]
	漢字変換あり	かな文字のみ	
提案システム [43]	5.2	6.4	18.4
従来システム [22]	4.0	—	13.7
新井らの方法 1[17]	入力速度の記述なし		
新井らの方法 2[20]	—	34.9 <sup>(1)</sup>	—
Chen らの方法 [29]	入力インタフェース未構築		
Esaki らの方法 [8]	—	11.34	—
伊藤らの方法 [2]	—	11.36	11.36
梶原らの方法 [12]	—	6.2	—

(1) 6 名中 3 名の被験者は、瞬目による入力決定ができなかった。

の停留（3 秒）を用いており、5.4.1 項に示したものと同一内容を入力した結果、文字入力速度は被験者 5 名の平均で 4.0 字／分であった。これと比べると、提案システムは 5.2 字／分と高速に入力可能である。また、指標選択速度についても、従来システムは 13.7 回／分であったのに対し、提案システムでは 18.4 回／分と大幅に向上している。一方で、超過指標選択数については、従来システムが 4.0 回であったのに対し、提案システムでは 10.9 回となり、大幅に増加した。この超過指標選択数の多くは、誤入力を訂正するための指標選択である。本実験において、誤選択の回数を求めると 9 名の平均で 3.7 回であった。従来システムにおいて、誤った指標の注視に気づいた場合には、停留時間の 3 秒に達する前であれば視線を他の指標に移すことで誤選択を回避できる。それに比べて、提案システムでは随意性瞬目の実行時点を基準とした 1 時点により決定しているため、誤りが増加したと考えられる。しかしながら、提案システムの指標選択速度は従来システムよりも速く、対象とした同一の課題に対する入力時間については、従来システム [22] では被験者 5 名の平均で 579 秒であったのに対し、提案システムでは被験者 9 名の平均で 467.4 秒と短縮された。

提案システムは視線移動と瞬目の組合せによる入力方法を採用していることから、入力動作に対してマウスの移動とマウスボタンのクリックによる操作を想起させ、従来システム [22] のような視線の停留による決定方法よりも直感的に操作できる。インタフェース設計において、「外界にある知識と自身の知識の両方を十分に活用する」という原則が重要なもののひとつとして挙げられており [109, 110]、提案システムは一般的なマウス操作を身につけているユーザにとって、既存の知識を活用して操作できる点でこの原則を満たす。また、「ユーザがシステムを主体的に制御できること」も重要とされており [110, 111]、従来システムでは入力決定のたびに停留の判定を待つ必要があり主体性が低いのに対し、提案システムは随意性瞬目を行なうことで即時に動作させられる点で主体性が高い。これらのことから、提案システムでは視線の停留による決定方法と比較して自然なインタフェースを構築できたと考えられる。

他の先行研究でも、自然光下で視線計測を行ない、瞬目を用いて文字入力を行なうシステム [17, 20] が提案されている。新井らが提案したシステム [17] は、指標選択方式の視線計測と随意性瞬目による入力決定を採用し、15 個の指標群を切り換えて文字入力を行なう。この文献 [17] では、被験者 2 名について文字入力におけるキーのヒット率（入力成功率）が、最良の撮影条件下で 90.0 % であったと報告されている。この文献中にヒット率の定義が明確に示されていないため比較は難しいが、5.4.2 項で述べた通り、全指標選択数から誤選択数を引き、全指標選択数で割った値として求めた正選択率は、被験者 9 名の平均で 97.5 % であった。この結果から、文献 [17] のシステムよりも高い確度で入力が可能であると考えられる。

新井らは別のシステムとして、小形のディスプレイと Web カメラを片眼ずつの眼前にそれぞれ配置した専用の眼鏡を装着し、9 個の指標群を選択する文字入力システムを提案している [20]。評価に用いた入力課題は、5 文字のかな文字と読み上げ機能の計 12 回である。文献中に示された入力所要時間から換算すると、被験者 6 名の入力速度は平均で 34.9 字／分に相当する。しかし、キー選択について 12 回の所要選択数に対して最大で 26 回の失敗が示されているものの、訂正を行なって

おらず、比較が難しい。また、この手法では被験者6名に対し、3名が瞬目によるキー決定が成功しなかった [20] が、提案システムでは対象とした9名全員が瞬目によって入力決定することができた。

このほか、Chen らは [29]、眼鏡に取り付けた Web カメラの入力画像を処理し、注視点計測と随意性瞬目の検出が可能なシステムを提案した。この文献 [29] では、注視点計測の誤差と随意性瞬目の検出成功率を示しており、インタフェース構築を今後の課題としている。この評価実験において、持続時間が5秒以上の瞬目を随意性として瞬目種類を識別している。これはすなわち、瞬目種類識別に5秒以上を要することになるが、提案システムでは1回あたりの指標選択時間は決定のための瞬目を含めて3.3秒程度であり、高速である。

赤外光光源を用いる画像処理法では、Esaki らが2つの赤外光光源を用いた画像処理法による、視線と随意性瞬目を組み合わせた日本語文字入力システムを提案している [8]。このシステムでは、画面上にかな文字選択の指標群を表示し選択する。指標数を18個（水平6×垂直3個）とした場合に、文字入力速度が11.34字/分（入力時間5.29秒/字）であったことが示されている [8]。比較のため、5.4.2項で示した実験結果から、かな文字の字数（48字）にもとづく文字入力速度を求めると、9名の平均で6.4字/分となる。これと比較すると、Esaki らのシステム [8] のほうが高速であるが、この文献では被験者1名のみの実験にとどまっており、単純に評価することは難しい。

また、瞬目ではなく視線の停留時間による決定を採用した例として、赤外光光源を用いる画像処理によって文字入力の支援システムが提案されている [2]。このシステムでは、画面上にかな文字の一覧（66字）が表示され、視線の停留時間（3秒）によって文字の選択決定を行なう。この文献 [2] において、正しく入力できた文字の平均入力時間は、被験者6名で5.28秒/字である。これを文字入力速度に換算すると11.36字/分となり、提案システムの5.2字/分よりも速い。しかし、指標選択速度を比較すると、この文献 [2] では1選択につき1文字の入力であるため11.36回/分となるが、提案システムでは18.4回/分であり高速である。

梶原らは、EOG法によるシステム [12] を開発している。このシステムでは、画面上に文字の一覧が表示され、ひとつの文字を行と列の2回の決定により確定する。このとき、画面表示を工夫し水平方向のみの視線移動で選択できる。この文献 [12] の評価実験では、10名の被験者を対象にかな文字のみ100字の入力をそれぞれ行ない、平均で6.2字/分の入力速度を得たと報告されている。これと比べて、上述の通り5.4.2項の実験結果におけるかな文字の文字入力速度は6.4字/分である。提案システムでは、非接触でなおかつ専用の計測装置を用いることなく、同程度の文字入力速度を実現することができた。

このように、著者の提案システム [43] は従来システム [22] よりも自然なインタフェースを構築でき、これまでに提案されてきた視線と瞬目による文字入力システムよりも高い確度の入力を実現した。また、専用の光源や計測装置を用いることなく、EOG法を用いたシステムと同程度の入力速度を実現することができた。

## 6 総合考察

本論文では、2章で視線入力および瞬目入力に関する研究の背景について述べ、3章では瞬目種類識別のキャリブレーション法を提案した。また、4章では2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別法について議論し、5章において、随意性瞬目(1種類)により入力決定する視線文字入力システムの開発について詳細を述べた。本章では、本研究の全体を通して総合的な考察を行ない、成果として得た貢献の内容と今後の課題を示す。

### 6.1 本研究に関するユーザビリティ評価

3章において提案した瞬目種類識別のキャリブレーション法に関し、その実行手順についての聞き取り調査を行なった。なお、聞き取りの対象は、5章の評価実験に参加した4名の回答者である。瞬目種類識別のキャリブレーションの実行時には、3回のビーブ音を発生させ、それを聞いたら「しっかり」と意識的なまばたきを行なうよう指示をした。この指示を、容易に理解することができたか、という問いに対して、すべての回答者が「理解できた」と回答した。そして、この手順を容易に実行できたか、との問いに対しては、多くの回答者が「容易に実行できた」と答えた。この問いには、他の1名は『「しっかり」の程度をすぐには判断できなかった』と回答した。しかし、その回答者も「(1~2回の)練習ののちに実行の仕方がわかった」と回答しており、また、文字入力の実験も入力が完了していることから、「しっかり」と行なう主観的な随意性瞬目の動作は多くの回答者がすぐに判断でき、すぐには判断できない場合でも、少しの練習によって実行の方法が判断できるようになると考えられる。提案した瞬目種類識別のキャリブレーション法を適用した、随意性瞬目による入力決定については、すべての回答者が「意図した通りに行なわれた」と回答した。以上の結果より、瞬目種類識別のキャリブレーション法の目的である、瞬目種類識別率を著しく低下させることのない、

比較的少数の瞬目により実行可能な方法が実現できたといえる。

4章で議論した2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別法について、聞き取り調査を行なった。聞き取りの対象は、4章の2種類の随意性瞬目の予備実験および本実験に参加した回答者2名と、それらの実験に参加していない回答者2名である。なお、実験に参加していない回答者には、本実験と類似の2種類の随意性瞬目を行なう実験に参加してもらい、そのときの内容について回答を求めた。2種類の随意性瞬目の実行方法の指示について、わかりやすかったどうかを尋ねたところ、4章の各実験に参加した回答者は、いずれも「指示がわかりやすかった」と答えており、1名からは『「なるべく」という指示が含まれていたため、自分の裁量でよいと判断しやすかった』との回答を得た。一方、4章の各実験に参加しなかった回答者は、いずれも「(2種類の随意性瞬目の実行方法を)どのように区別すればよいか、すぐには判断できなかった」と回答した。しかし、その両方の回答者が「(1～2回の)練習を行なえば判断ができる」と回答しており、実用的であると考えられる。

5章で述べた、随意性瞬目(1種類)により入力決定する視線入力システム(提案システム)についても、聞き取り調査を行なった。聞き取りの対象は、5章の評価実験に参加した4名の回答者である。上述の通り、この提案システムの瞬目による入力決定は、回答者の全員が意図した通りに入力決定が行なわれたと回答している。また、5章の評価実験において、文字を誤入力した場合にはBackSpaceの機能により文字の削除を行なうよう指示をした。この操作について、容易に行なえたか質問したところ、誤入力が生じなかった1名を除いたすべての回答者が、「容易に行なうことができた」と回答した。ただし、1名の回答者は「訂正の操作が短縮できるとよりよい」とも答えており、この点の改善は今後の課題である。また、回答者のうち2名は、注視によって入力決定を行なう視線入力システムを利用した経験があった。そこで、注視による入力決定と瞬目による入力決定を比べた感想を尋ねたところ、「瞬目による入力決定は、探索中に誤って入力される恐れがなく安心して使用できた」、「視線を止めておくことに比べて、瞬目のほうが負担が

小さい」という回答を得た。このことから、注視による入力決定に比べ、瞬目による入力決定によりユーザの負担を軽減することができたことがわかった。この提案システムの全体的な使いやすさについて、5を最良とした5段階評価で尋ねたところ、4名の平均は4.0となり、おおむね使いやすいシステムであったと評価できる。

## 6.2 本研究の貢献と今後の課題

本研究では、自然光下の画像解析による視線入力システムを前提とした場合の、入力決定法に関するいくつかの課題を解決した。そのほか、本研究で取り扱わなかった課題が残されている。表 6.1 に、これらの課題を示す。なお、表 6.1 には、文献 [28] を除き、自然光下の画像処理によって計測する手法の文献番号を示した。

先行研究における現状として、入力意図を示す随意性瞬目を自発性瞬目と識別するため、被験者に一定以上の持続時間を指示している例が多かった [20, 30, 31]。これらの研究において、瞬目種類の識別のために設定する瞬目の持続時間のしきい値として、統計的または経験的に求めた固定値を用いており、個人差を考慮しているものが見当たらなかった。そこで、本研究では、個人ごとに瞬目計測のキャリブレーションを行なうことで実現した、個人差を考慮した瞬目種類識別法を採用し、瞬目種類識別率の向上を図った。また、この瞬目計測のキャリブレーションの実用的な手順と要件が不明であるという課題があり、本論文では、比較的少数の瞬目の取得によって完了する瞬目種類識別のためのキャリブレーション法の具体的な方法を確立した。

そして、より効率的な瞬目による入力決定を実現するため、複数種類の随意性瞬目の識別法の実現が課題であった。先行研究の現状では、通常の随意性瞬目に加えて、長時間の瞬目 [28]、複数回の瞬目 [23] およびウィンク（片目の瞬目） [26, 88] を用いる方法が提案されていた。本論文では、ユーザが主観的に実行できる随意性瞬目として、「しっかり」と行なう瞬目と「しっかりとなるべく短く」行なう瞬

表 6.1: 視線入力 of 課題

本研究で解決した課題		
課題	現状	本論文での解決策
瞬目による 入力決定法	持続時間を一定以上に指定し, 個人差を考慮していない [20, 30, 31]	個人差を考慮した 随意性瞬目の識別による 精度の向上 [38, 87]
瞬目計測の キャリブレーション法	入力システムに適した 手順と要件が不明であった [87]	瞬目種類識別のための キャリブレーション法の確立 [38]
複数種類の 随意性瞬目 の識別	長時間の瞬目 [28]*, 複数回の瞬目 [23], ウィンク [26, 88] を識別	「しっかり」および「しっかりと なるべく短く」行なう瞬目の 2 種を識別 [41]
システム化	多くの被験者で検証した, 視線 と瞬目による入力システムは 見当たらない (2 名 [17], 3 名 [20] の例にとどまっている)	視線と瞬目を利用した入力 システムを構築し, 9 名の 被験者での入力成功を確認 [43]
* 文献 [28] は, 赤外光を用いた計測装置を採用している.		
本研究で取り扱わなかった課題		
課題	本論文の状況	
大きな頭部移動の 対処	頭部移動が限定的であることを前提としており, 上下左右に 1 cm 程度を許容している.	
入力効率および 入力速度の向上	単純なかな文字入力および標準的な漢字変換機能を利用し, 予測入力などの高効率化の工夫は含めていない.	
効率的な訂正方法の 確立	訂正のための機能 (BackSpace) の機能を, 制御用の機能の 1 つとして数回の選択入力によって呼び出す必要がある	

目の2種類を採用し、自発性瞬目との識別法を開発した。

瞬目による入力決定のシステム化として、従来の自然光下の画像解析による視線入力システムにおいては、多くの被験者によって動作を検証した例はみられなかった。そこで、本研究では、著者らの先行研究で開発した多指標選択型の視線入力システムに瞬目計測および随意性瞬目（1種類）の識別処理を追加し、随意性瞬目によって入力決定可能な日本語文字入力システム（提案システム）を開発した。この提案システムの評価実験において、9名の被験者により漢字変換を含む文字入力の実験を行なったところ、対象とした被験者全員が課題の入力を完了でき、従来よりも多くの被験者が操作可能であることを確かめた。この提案システムの利用者を対象にユーザビリティ評価を行ない、6.1節で述べた通り、著者らの先行研究で開発した注視によって入力決定する視線入力システムよりも、随意性瞬目による入力決定は操作時の負担が小さく、また、システムの全体的な使いやすさはおおむね良いという結果を得た。これらの評価実験およびユーザビリティ評価より、本研究によって、ユーザに比較的負担の少ない入力決定方式の視線文字入力システムが開発できたといえる。

このほか、本論文で取り扱わなかったいくつかの課題がある。本研究で開発した提案システムは、ALS患者などの重度肢体不自由者を対象とし、頭部移動が小さいことを前提としている。著者らの従来法に含まれる目頭位置の追跡によって、眼球の領域がビデオカメラの撮影範囲から外れない程度（上下左右1cm程度）の頭部移動を許容している。提案システムを健常者が利用することを考えると、大きな頭部移動に対処する必要がある。先行研究では、ヘッドマウント型のビデオカメラを動画入力に用いて、これを解決しているものもあるが、今後の研究では、著者らが採用した視線入力環境の利点を考慮し、この環境に従った非接触の条件を満足する頭部移動の対処方法を検討したい。

また、文字入力の方式や入力後の漢字変換の方式など、文字入力の高効率化および高速化についても課題が残されている。他の研究グループによる調査報告[78]において、視線入力装置 Tobii[53]の利用者を対象としたアンケートの結果、改善

点として「漢字変換をうまくできるようにしてほしい」という回答が挙げられており、単にかな文字が入力可能というだけではなく、漢字変換を行なう機能にも要望があることがわかる。本研究では、1文字ずつ指定する通常のかな文字入力と、Windows 標準のIMEによる漢字変換機能による漢字変換の方法を採用している。この入力操作において、システムがユーザの所望の単語や文節などを予測し、入力候補を選択できるような予測入力の機能を利用できるようになれば、漢字変換を含めてより高速かつ高効率な文字入力の実現が期待できる。今後はこのような、予測入力可能な入力方式の適用について検討したい。

そして、効率的な訂正方法についても課題が残されている。5章で行なった評価実験において、文字を誤って入力した場合に訂正を行なうよう指示し、実際にそのように操作を行なってもらった。6.1節に述べたユーザビリティ評価において、この訂正の操作に関して「訂正の操作が短縮できるとよりよい」という意見を得ている。したがって、訂正の操作を容易にできるような方法が確立できれば、こうしたユーザの要望を満たすことができると考えられる。この具体的な実現方法として、本論文の4章で述べた2種類の随意性瞬目の識別処理を提案システムに適用し、2種類の随意性瞬目による入力意図のそれぞれに、通常の入力決定と訂正の機能を割り当てるという方法が挙げられる。今後は、この2種類の随意性瞬目を利用可能な視線入力システムを構築し、評価を行ないたい。

## 7 結論

本研究の目的は、ユーザの負担が少なく利用でき、主体的に操作できる視線入力システムの開発である。視線入力にはさまざまな方式があり、高精度に視線計測が可能なものも提案されている。その中で、著者らは市販のホームビデオカメラとパソコン上で動作するソフトウェアによって構成される、自然光下の画像解析による視線入力システムをすでに開発していた。視線入力には、他に赤外光照明を眼球に照射必要がある角膜反射法や強膜反射法、顔面に電極を装着する必要がある EOG 法などがあるが、これらの方法はユーザの身体的または心理的な負担が懸念される。また、専用のセンサや計測のための専用のハードウェアが必要となるため、導入する際に負担となる。著者らの開発していた、画像解析による視線入力システムは、眼球近傍をビデオカメラによって撮影するだけで計測が可能であり、視線計測のソフトウェア上においても画像処理のしきい値など複雑な設定が不要であった。

この視線入力システムには、画面上に表示した指標を一定時間にわたって注視する入力決定方式を採用していた。この注視判定に用いる停留時間のしきい値として、経験的に決定したものを用いていた。この停留時間のしきい値は、大きくなると1選択あたりに要する時間の増大にともなって全体の入力時間が大きくなり、小さくすると1選択あたりに要する時間は短くなるが、入力意図のない視線の到達によって誤選択を生じやすくなるというトレードオフの関係にある。この注視による選択のために設定する持続時間のしきい値は、適切な唯一の値を設定することが難しい。これに代わる入力決定の方式として、意識的に行なう瞬目、つまり随意性瞬目によって入力決定を行なう方式がある。随意性瞬目による入力の実現すれば、入力決定の意図を動作によって示すため、入力決定の操作が主体的に実行できる。

随意性瞬目による入力のためには、自然に生じる瞬目、すなわち自発性瞬目との瞬目種類識別が必要となる。先行研究における画像解析を用いた瞬目種類の識

別法には、瞬目の持続時間による方式と、瞬目の回数による方式およびウイंकによる方式がある。先行研究で多く採用されている瞬目の持続時間による方式では、随意性瞬目と自発性瞬目との間に瞬目の持続時間のしきい値を設定して識別を行なう。このときに設定する値はシステムごとに経験的または統計的に決定した固定値を用いており、瞬目の持続時間のパラメータに現れる個人差は議論されていなかった。

瞬目の動作は高速であるため、ビデオカメラでこれを計測するためには、工夫が必要であった。著者らはこの課題を、1枚のインタレース画像を分割して得た2枚のフィールド画像を用いて計測を行なう、フレーム分割法によって解決した。この瞬目計測法を採用し、瞬目特性の個人差を考慮した瞬目種類の識別を行なうために、ユーザが主観的に「しっかり」と行なう随意性瞬目と自発性瞬目との識別における持続時間のしきい値をキャリブレーション処理によって決定する方法を提案した。とくに、ユーザの負担に配慮し、キャリブレーション処理に用いる瞬目の個数なるべく少数で完了する方法を実験によって調査し、キャリブレーションの方法を設計した。著者のキャリブレーション処理を適用した瞬目種類識別を行なった結果、随意性瞬目と自発性瞬目を含む全体の識別率は被験者8名の平均で約99.3%となり、他の先行研究の方法により設定したしきい値（固定値）の場合よりも高い識別率を得られた。

また、著者はユーザが主観的に行なうことができる、2種類の随意性瞬目を識別可能にした。1種類の随意性瞬目による文字入力において正しい文章を作成するためには、入力の誤りが生じた場合に、訂正のための手順を実行する必要がある。指標の切り替えによって訂正の機能を呼び出す構成にした場合は、訂正のたびに数回の指標選択を要し、訂正のための指標を常時利用可能にする構成では、その他の機能を実行するためにより多くの指標選択を要する。つまり、訂正を利用するために指標選択の回数が増加することになり、ユーザの負担となる。これに対し、2種類の随意性瞬目が識別可能になれば、通常の入力のほかに訂正の機能を容易に追加することができ、ユーザが誤操作を行なった場合に即時に訂正し入力操作を

継続できるため、操作に要する負担を軽減することができる。また、訂正に大きな負担がないということは、心理的にも負担が軽減されると考えられる。この目的のため、「しっかり」と行なう瞬目と、「しっかりとなるべく短く」行なう瞬目および自発性瞬目を、瞬目パラメータに2段階のしきい値を設定して識別処理することによって識別した。これにより、被験者10名の平均で約95%の識別率を得ることができるようになった。

瞬目種類識別法を開発する際にオフラインで処理していた、瞬目計測および瞬目種類識別の処理を、オンライン処理することを目指した。著者らの瞬目計測法にはフレーム分割法を採用しており、高速な処理が求められる。オフライン処理では、瞬目の詳細な変化を捉えるため、ハイビジョン解像度の動画像を用いていた。一般に、画像処理の処理時間は対象画像の解像度に依存する。そこで、動画像の各フィールドを間引くことにより、低解像度であっても識別率を著しく低下させることなく処理時間を満足する条件を調査し、著者らが先行研究で開発した視線入力システムと同程度の解像度で処理できることを明らかにした。瞬目計測および瞬目種類識別の処理のみであれば、リアルタイム処理に求められる処理時間の条件を満足していたが、この瞬目に関わる処理を視線計測の処理と続けると条件を満たすことは難しい。

この課題に対処するため、これらの処理をマルチスレッド構成とし並列に処理させることで、見かけ上、互いの処理に影響なく動作させることができるようになった。このリアルタイムの瞬目計測および瞬目種類識別の機能を追加した視線文字入力システムを用いて、漢字変換を含む日本語文字入力の実験を行ない、著者らの先行研究で開発した注視により決定する視線入力システムよりも高速な入力を実現した。この瞬目による視線文字入力システムによって、赤外線光源や専用の計測機器を用いることなく、視線と「しっかり」と行なう瞬目によるユーザの主体的な入力を実現した。本論文では、1種類の随意性瞬目の識別を視線入力システムに適用し、2種類の随意性瞬目の識別は行なっていないが、瞬目の計測はリアルタイムに処理可能であり、その識別処理には多くの処理時間を要しないため、

2種類の随意性瞬目による識別も同様に適用可能であると期待できる。

このように、著者はユーザに負担の少ない方式の視線入力システムに、主体的に実行できる随意性瞬目による入力決定を追加した入力インタフェースを構築した。近年では、小形で設定が容易な視線入力システムが発売されており、一般の家庭などで導入できる可能性が大きくなってきた。こうした専用の計測システムは、導入できれば大変便利であるが、将来的に長期の供給が続くかどうかは不明である。これに対し、著者らのシステムは市販のビデオカメラとパソコンという、一般的なハードウェアによる構成を採用しており、ユーザが導入を望んだ時点で入手可能なものによって、著者と同様のシステムの構築が可能であると期待できる。ただし、著者の視線入力システムにおいて、ビデオカメラとの接続にはIEEE1394インタフェースを用いているが、最近のホームビデオカメラにはこれが搭載されていないものが多い。ホームビデオカメラの動画出力のインタフェースとしては、HDMI形式が一般的であるので、これに対応できるようにすればさらに利用の機会が多くなると考えている。パソコンへの動画取り込みを行なうハードウェアに関しても、動画の通信をHDMIによって行なうことを考えれば、USBインタフェースを介して接続可能なものが販売されており、入手できる機会は多い。

この種のコミュニケーション支援システムは、臨床において実際に使用され、ユーザからのフィードバックによって評価および改良することが強く望まれるが、残念ながら著者はその機会に恵まれず、健常者による評価にとどまった。今後、臨床において利用したいという要望があれば、ぜひとも提案したシステムをコミュニケーションに生かしたい。本論文では、文字入力を行なう応用システムについて詳細に述べたが、著者は共同研究者とともに、視線計測の基盤ソフトウェアをすでに開発している。このソフトウェアは、視線計測および指標の表示処理を行なうサーバ部分と、文字の入力など実際の応用動作を行なうクライアント部分に分かれており、比較的容易に新しい目的の応用システムが開発できる。この基盤ソフトウェアに本論文で提案した瞬目による入力決定の機能を追加することで、さまざまな目的に対して随意性瞬目による入力決定を利用できる。したがって、文

字入力のみでなく、メーラの操作やブラウザの操作など、広く利用が可能になる。とくに、近年では SNS やブログなど、インターネットを介したコミュニケーションの手段も、スマートフォンの普及にあわせて急速に広がったため、これらインターネットサービスなどを効率的に操作できる応用システムを構築することで、肢体不自由者の QoL（生活の質）の向上に貢献できるのではないかと考えている。

著者の開発した瞬目情報を用いた視線入力システムは、さまざまな点においてユーザの負担を軽減することに配慮して設計し、これを達成できたと考えている。近年では、ウェアラブルデバイスの開発もさかんであり、そのなかにはすでに視線や瞬目を捉えられるものもある。これからも、視線入力および瞬目入力のインタフェースはいくつも提案されるものと想像できるが、それらの開発の中で、本研究において著者が実証した各種の知見が応用され、ユーザにとってより優しく、十分な制御感をもって使うことのできる入力インタフェースが開発されることを望んでいる。

## 謝辞

本論文は、著者が行なった研究を纏めたものである。

末筆ながら本論文を提出するにあたり、本研究を通じて数々のご指導、ご鞭撻を賜りました東京電機大学の故大井尚一名誉教授、同大学情報環境学部情報環境学科の大山実教授、同大学システムデザイン工学部情報システム工学科の阿部清彦准教授、本論文を査読・審査していただき適切な助言を賜った同大学大学院先端科学技術研究科情報通信メディア工学専攻の武川直樹教授、小山裕徳教授、鉄谷信二教授、関東学院大学理工学部理工学科情報学系の岡本教佳教授、本論文の執筆の機会を与えて頂いた関東学院大学理工学部学部長の武田俊哉教授、同学部理工学科情報学系学系長の水井潔教授に深く感謝の意を表す。

また、貴重な議論の機会をいただいた電気通信大学大学院生の松野省吾君、本研究を進めるにあたり、ご協力とご討論をいただいた関東学院大学理工学部理工学科情報学系の歴代学生諸君に末筆ながら感謝の意を表す。

平成 29 年 9 月



## 参考文献

- [1] T. E. Hutchison, K. P. White, W. N. Martin, K. C. Reichert, L. A. Frey :  
“ Human-Computer Interaction Using Eye-Gaze Input ”, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 19, No. 7, pp. 1527–1534, (Dec. 1989)
- [2] 伊藤和幸, 数藤康雄, 伊福部達 : “ 重度肢体不自由者向けの視線入力式コミュニケーション装置 ”, 信学論, Vol. J83–D1, No. 5, pp. 495–503, (May 2000)
- [3] J. O. Wobbrock, J. Rubinstein, M. W. Sawyer, A. T. Duchowski: “ Longitudinal evaluation of discrete consecutive gaze gestures for text entry ”, Proc. of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications, ACM, pp. 11–18, (2008)
- [4] A. Huckauf, M. Urbina: “ Gazing with pEYE: new concepts in eye typing ”, Proc. of the 4th symposium on Applied perception in graphics and visualization, ACM, pp. 141–141, (2007)
- [5] A. Huckauf, M. H. Urbina: “ Gazing with pEYEs: towards a universal input for various applications ”, Proc. of the 2008 symposium on Eye tracking research & applications. ACM, pp. 51–54, (2008)
- [6] 村田厚生, 越智啓太, 森若 誠 : “ 視線位置表示方法とカーソル表示の有無がメニュー選択用視線入力システムの操作性に及ぼす影響 ”, 人間工学, Vol. 47, No. 5, pp. 190–197, (Oct. 2011)
- [7] J. P. Hansen, K. Tarning, A. S. Itoh: “ Gaze typing compared with input by head and hand ”, Proc. of the 2004 symposium on Eye tracking research & applications. ACM, pp. 131–138, (2004)
- [8] S. Esaki, Y. Ebisawa, A. Sugioka, M. Konishi: “ Quick menu selection using eye blink for eye-slaved nonverbal communicator with video-based eye-gaze

- detection ”, Engineering in Medicine and Biology Society, Proc. of the 19th Annual International Conf. of the IEEE, Vol. 5, pp. 2322–2325, (Oct. 1997)
- [9] P. Majaranta, U. K. Ahola, O. Spakov: “Fast gaze typing with an adjustable dwell time”, Proc. of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, ACM, pp. 357–360, (2009)
- [10] 久野悦章, 八木 透, 藤井一幸, 古賀一男, 内川嘉樹: “ EOG を用いた視線入力インタフェースの開発 ”, 情処学論, Vol. 39, No. 5, pp. 1455–1462, (May 1998)
- [11] J. Hori, K. Sakano, Y. Saitoh : “ Development of a communication support device controlled by eye movements and voluntary eye blink ” IEICE transactions on information and systems, Vol. 89, No. 6, pp. 1790–1797, (Jun. 2006)
- [12] 梶原祐輔, 村田裕章, 木村春彦, 阿部孝司: “ 交流眼電図による水平方向の眼球運動と随意性瞬目を用いた意思伝達支援装置の開発 ”, 電学論 C, Vol. 132, No. 4, pp. 555–560, (Apr. 2012)
- [13] 坂本和崇, 板倉直明: “ 交流眼電図式眼球斜め方向移動を用いた多選択型視線入力インタフェース ”, 信学論, Vol. J92–D, No. 2, pp. 189–198, (Feb. 2009)
- [14] 板倉直明, 太田拓臣, 坂本和崇: “ 視線入力インタフェースのための交流増幅眼電図による視線移動量算出方法の検討 ”, 信学論, Vol. J90–D, No. 10, pp. 2903–2913, (Oct. 2007)
- [15] 山田光穂, 福田忠彦: “ 眼球運動による文章作成・周辺機器制御装置 ”, 信学論, Vol. J69–D, No. 7, pp. 1103–1107, (Jul. 1986)
- [16] 伊藤和幸, 奈良篤志: “ ビデオキャプチャーカード経由の画像取込み及び処理による眼球運動計測 ”, 信学技報, Vol. 102, No. 128, pp. 31–36, (Jun. 2002)

- [17] 新井康平, 上滝寛美: “利用者の動きを許容する黒目中心検出による視線推定に基づくコンピュータ入力システム”, 電学論 C, Vol. 127, No. 7, pp. 1107–1114, (Jul. 2007)
- [18] 松永龍治, 作本大朗, 武藤 寛: “視線入力によるコンピュータ操作支援システムの研究・開発” ヒューマンインタフェース学会研究報告集, Vol. 14, pp.13–18, (2012)
- [19] F. Corno, L. Farinetti, I. Signorile: “ A Cost-Effective Solution for Eye-Gaze Assistive Technology ”, Proc. IEEE International Conf. on Multimedia and Expo, Vol. 2, pp. 433–436, (Aug. 2002)
- [20] 新井康平, 矢島健郎: “視線入力による会話支援システム”, 電学論 C, Vol. 128, No. 11, pp. 1679–1686, (Nov. 2008)
- [21] 岸本研志, 米村貴裕, 広瀬健一, 長江貞彦: “カーソル移動方式による視線入力システムの開発”, 映情学誌, Vol. 55, No. 6, pp. 917–919, (May 2001)
- [22] 阿部清彦, 佐藤寛修, 大山 実, 大井尚一: “視線による重度肢体不自由者向けコンピュータ操作支援システム”, 映情学誌, Vol. 60, No. 12, pp. 1971–1979, (Dec. 2006)
- [23] L. Krapic, K. Lenac, S. Ljubic: “ Integrating Blink Click interaction into a head tracking system: implementation and usability issues ”, Universal Access in the Information Society, Vol. 14, Issue 2, pp. 247–264, (2015)
- [24] D. O. Gorodnichy : “ Second order change detection, and its application to blink-controlled perceptual interfaces ” Proc. IASTED Conf. on Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP 2003), pp. 140–145, (2003)
- [25] 中西正樹, 奥川恭平, 高橋正樹, 満倉靖恵: “環境情報を考慮した電動車椅子制御のための眼電位を用いた随意性瞬目検出手法”, 電学論 C, Vol. 133, No.

10, pp. 1969–1975, (Oct. 2013)

- [26] E. Missimer and M. Betke: “Blink and Wink Detection for Mouse Pointer Control”, 3rd International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments (PETRA '10), Article 23, pp. 1–8, (Jun. 2010)
- [27] 海老澤嘉伸: “瞳孔検出技術に基づく頭部運動によるポインティングシステム—瞳孔マウス”, 画像ラボ, Vol. 17, No. 7, pp. 69–73, (Jul. 2006)
- [28] I. S. MacKenzie and A. Behrooz: “BlinkWrite: Efficient Text Entry using Eye Blinks”, Universal Access in the Information Society, vol.10, No.1, pp.69–80, (Mar. 2011)
- [29] B. C. Chen, P. C. Wu, S. Y. Chien: “Real-time Eye Localization, Blink Detection, and Gaze Estimation System without Infrared Illumination”, IEEE International Conf. on Image Processing (ICIP), pp. 715–719, (Sep. 2015)
- [30] K. Grauman, M. Betke, J. Gips, G. R. Bradski: “Communication via Eye Blinks - Detection and Duration Analysis in Real Time”, Proc. of IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2001, Vol. 1, pp. 1010–1017, (Dec. 2001)
- [31] A. Królak and P. Strumiłło: “Vision-Based Eye Blink Monitoring System for Human-Computer Interfacing”, Conf. on Human System Interactions (HSI) 2008, pp. 994–998, (May 2008)
- [32] A. Królak and P. Strumiłło: “Eye-Blink Detection System for Human-Computer Interaction”, Universal Access in the Information Society, Vol. 11, No. 4, pp. 409–419, (Nov. 2012)
- [33] J. Marnik: “BlinkMouse-On-Screen Mouse Controlled by Eye Blinks”, Information Technologies in Biomedicine, Vol. 4, Springer International Pub-

lishing, pp. 237–248, (2014)

- [34] 落合 積, 石松隆和, 高見 修, 松井稜治: “目の動きを利用した身障者用文字入力装置の試作”, 機学論 C 編, Vol. 63, No. 609, pp. 1546–1550, (May 1997)
- [35] 柘植夕起子, 高野博史, 黒川正博, 中村清実: “リアルタイム目追跡の非接触型入力装置への応用”, 信学技報, NC, Vol. 104, No. 758, pp. 149–154, (Mar. 2005)
- [36] 宮川智文, 坂井孝光, 中村清実: “リアルタイム目追跡システムを用いた居眠り警報のための瞬き検出装置の開発”, 信学技報, MBE, Vol. 103, No. 81, pp. 41–45, (May 2003)
- [37] 中村拓朗, 林 豊彦, 中村康雄, 若林佑子, 渡辺 諭: “反射型フォトセンサを用いた ALS 患者向け汎用シングルスイッチのまばたき検出特性”, 信学技報, Vol. 106, No. 612, pp. 115–120, (Mar. 2007)
- [38] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “瞬目種類識別のためのキャリブレーション法”, 電学論 C, Vol. 134, No. 7, pp. 897–903, (Jul. 2014)
- [39] H. Sato, K. Abe, S. Ohi, and M. Ohyama: “Automatic Classification between Involuntary and Two Types of Voluntary Blinks based on an Image Analysis”, HCI International 2015, Proc. on 17th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol. 2, pp. 140–149, (Aug. 2015)
- [40] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の自動識別法の検討”, 平成 27 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 623–628, (Aug. 2015)
- [41] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の自動識別法”, 電学論 C, Vol. 136, No. 9, pp. 1350–1358, (Sep. 2016)

- [42] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “画像解析による自然光下でのリアルタイム瞬目種類識別”, 平成 26 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 916–920, (Sep. 2014)
- [43] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “画像解析による随意性瞬目と視線を用いた文字入力システム”, 電学論 C, Vol. 137, No. 4, pp. 584–594, (Apr. 2017)
- [44] K. N. Kim, R. S. Ramakrishna: “Vision-Based Eye-Gaze Tracking for Human Computer Interface”, Proc. IEEE International Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 2, pp. 324–329, (Oct. 1999)
- [45] Y. Matsumoto, A. Zelinsky: “An Algorithm for Real-time Stereo Vision Implementation of Head Pose and Gaze Direction Measurement”, Proc. IEEE Forth International Conf. on Face and Gesture Recognition, pp. 499–505, (Mar. 2000)
- [46] J. G. Wang and E. Sung: “Study on Eye Gaze Estimation”, IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 32, No. 3, pp. 332–350, (2002)
- [47] 日本視覚学会 (編): “視覚情報処理ハンドブック”, 朝倉書店, pp. 379–386, (2000)
- [48] 山田光穂, 福田忠彦: “画像における注視点の定義と画像分析への応用”, 信学論, Vol. J69–D, No. 9, pp. 1335–1342, (Sep. 1986)
- [49] 内富寛隆, 堀 潤一: “直流結合増幅眼電図を用いたポインティングデバイスの開発”, 電学論 C, Vol. 129, No. 10, pp. 1792–1800, (Oct. 2009)
- [50] 加納慎一郎, 二見亮弘, 吉信達夫, 星宮 望: “交流眼電図を用いた視点移動によるメニュー選択法”, 電学論 C, Vol. 129, No. 10, pp. 1822–1827, (Oct. 2009)

- [51] J!NS: “ J!NS MEME ES ”, <https://jins-meme.com/ja/products/es/> (2017年1月18日 閲覧)
- [52] L. R. Young: “ Recording Eye Position ”, Biomedical Engineering Systems, McGraw-Hill, (1970)
- [53] トビー・テクノロジー株式会社 : “ Tobii Pro T60 XL User Manual ”, <http://www.tobii.com/siteassets/tobii-pro/user-manuals/tobii-pro-t60xl-user-manual.pdf> (2017年1月25日 閲覧)
- [54] L.Stark, G.Vossius, L.R.Young : “ Predictive Control of Eye Tracking Movements ”, IRE Trans. Human Factors in Electorronics, Vol. 3, pp. 52–57, (Sep. 1962)
- [55] 及川 啓, 室 貴之, 三木則尚 : “ 透過型光センサアレイを用いたウェアラブル視線検出システム ”, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, No. 4, pp. 369–375, (May 2011)
- [56] R. J. K. Jacob: “ The use of eye movements in human-computer interaction techniques: what you look at is what you get ”, ACM Trans. on Information Systems (TOIS), Vol. 9, Issue 2, pp. 152–169, (Apr. 1991)
- [57] 大野健彦 : “ 視線を用いた高速なメニュー選択作業 ”, 情処学論, Vol. 40, No. 2, pp. 602–612, (Feb. 1999)
- [58] 田多英興, 山田富美雄, 福田恭介 : “ まばたきの心理学 ”, 北大路書房, (1991)
- [59] J. A. Stern, L. C. Walrath, R. Goldstein: “ The endogenous eyeblink ”, Psychophysiology, Vol. 21, No. 1, pp. 22–33, (1984)
- [60] E. Ponder, W. P. Kennedy: “ On the act of blinking ”, Quarterly Journal of Experimental Physiology, Vol. 18, pp. 89–110, (1927)

- [61] 内藤徹：“乳幼児の眼瞼条件反射”，心理モノグラフ No. 10，東京大学出版会，(1969)
- [62] G. Gordon: “Observations upon the movements of the eyelids”，The British journal of ophthalmology, Vol. 35, No. 6, pp.339–351, (1951)
- [63] B. Osborne, T. Roach, L. Gendreau, P. Gendreau: “An electrode hookup for eyelid conditioning”，Behavior Research Methods & Instrumentation, Vol. 6, No. 4 pp. 416–418, (1974)
- [64] 山本 新, 杉山和彦, 中野倫明：“自動車運転環境におけるドライバのまばたき計測”，電学論 C, Vol. 115, No. 12, pp. 1411–1416, (1995-11)
- [65] 松尾太加志, 福田恭介：“ビデオ画像記録による瞬目自動解析システムの開発”，生理心理学と精神生理学, Vol. 14, No. 1, pp. 17–21, (1996)
- [66] 矢野一博, 石原 謙, 牧川方昭, 山田憲嗣, 山下 馨, 大江洋介：“ビデオカメラを用いた瞬目パターン検出によるコミュニケーションツールの開発”，医療情報学, Vol. 18, pp. 55–56, (Aug. 1998)
- [67] 加納尚之, 井上倫夫, 小林康浩, 中島健二：“コミュニケーションエイドのための「まばたき」の検出方法”，信学論, Vol. J81-A, No. 10, pp. 1453–1462, (Oct. 1998)
- [68] R. R. Marsh, H. S. Hoffman, C. L. Stitt：“Eye blink elicitation and measurement in the human infant”，Behavior Research Methods & Instrumentation, Vol. 11, No. 5, pp. 498–502, (1979)
- [69] 田辺喜一, 杉山 誠：“心理実験のための瞬目の自動抽出法”，信学論, Vol. J76-D-2, No. 5, pp. 959–966, (May 1993)
- [70] M. Su, C. Yeh, S. Lin, P. Wang, S. Hou: “An implementation of an eye-blink-based communication aid for people with severe disabilities”，International

Conference on Audio, Language and Image Processing (ICALIP) 2008, pp. 351–356, (Jul. 2008)

- [71] 加納尚之, 井上倫夫, 小林康浩, 川上孝志, 井上公明 : “ニューラルネットワークによる「まばたき」の検出”, 電学論 C, Vol. 115, No. 3, pp. 367–372, (Feb. 1995)
- [72] 小澤尚久, 青竹雄介, 下田 宏, 福島省吾, 吉川榮和 : “Eye-Sensing HMD を利用したリアルタイム視点位置・瞬目検出”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 37, No. 8, pp. 687–696, (Aug. 2001)
- [73] 大矢哲也, 山下和彦, 小山裕徳, 川澄正史 : “眼電図を用いた随意性瞬目によるスイッチ操作の研究”, 生体医工学, Vol. 46, No. 2, pp. 254–260, (Apr. 2008)
- [74] 柴田邦臣, 井村 保 : “ALS 患者を対象とした IT 機器 / コミュニケーション機器等利用状況調査”, 平成 25 年度厚生省労働科学研究費補助金 障害者対策総合研究事業 (身体・知的等障害分野) 「音声言語機能変化を有する進行性難病等に対するコミュニケーション機器の支援体制の整備に関する研究」班 分担報告書, pp.43–58, (2013)
- [75] 日立ケーイーシステムズ : “伝の心”,  
<http://www.hke.jp/products/dennosin/denindex.htm> (2017年6月1日 閲覧)
- [76] テクノツール株式会社 : “オペレートナビ TT”, <http://opnv.ttools.co.jp/>  
(2017年6月1日 閲覧)
- [77] 伊藤和幸 : “意思伝達用スイッチ”, 国立障害者リハビリテーションセンター 第2福祉機器試験評価室,  
<http://www.rehab.go.jp/ri/kaihatsu/itoh/com-sw.html> (2017年6月1日 閲覧)

- [78] 伊藤史人, 井村 保 : “ 意思伝達装置利用者の社会活動状況等に関するヒアリング調査 ”, 平成 26 年度厚生省労働科学研究費補助金 障害者対策総合研究事業 (障害者対策総合研究開発事業 (身体・知的等障害分野)) 「音声言語機能変化を有する進行性難病等に対するコミュニケーション機器の支援体制の整備に関する研究」班 分担報告書, pp.63-70, (2014)
- [79] 阿部清彦, 大山 実, 大井尚一 : “ 自然光下における画像解析を用いた多指標視線入力システム ”, 映情学誌, Vol. 58, No. 11, pp. 1656-1664, (Nov. 2004)
- [80] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大山 実, 大井尚一 : “ 視線入力による重度肢体不自由者向けコンピュータ操作支援システム ”, 信学技報, WIT, Vol. 105, No. 507, pp. 15-20, (Jan. 2006)
- [81] 阿部清彦, 大山 実, 大井尚一 : “ 画像解析による自然光下視線入力システムの垂直方向解像度 ”, 映情学誌, Vol. 59, No. 11, pp. 1705-1708, (Nov. 2005)
- [82] 新美亮輔, 横澤一彦 : “ 反応時間 ”, 脳科学辞典, DOI:10.14931/bsd.806, (2013)
- [83] W. Lidwell, K. Holden, J. Butler : “ Design Rule Index[第 2 版]— デザイン、新・25+100 の法則 ”, ビー・エヌ・エヌ新社, p. 98, 120, (2010)
- [84] A. T. Welford : “ The Measurement of Sensory-Motor Performance: Survey and Reappraisal of Twelve Years' Progress ”, Ergonomics, Volume 3, Issue 3, pp. 189-230, (1960)
- [85] D. Miniotos : “ Application of Fitts' Law to Eye Gaze Interaction ”, CHI'00 extended abstracts on human factors in computing systems, pp.339-340, (2000)
- [86] I. S. MacKenzie : “ A Note on the Information-theoretic Basis for Fitts' Law ”, Journal of motor behavior, Vol. 21, Issue 3, pp.323-330, (1989)

- [87] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “ハイビジョン画像を用いたフレーム分割法による瞬目種類の識別”, 電学論 C, Vol. 133, No. 7, pp. 1293–1300, (Jul. 2013)
- [88] 松本吉央, 怡土順一, 竹村憲太郎, 小笠原司: “リアルタイム顔・視線計測システムの開発と知的インタフェースへの応用”, 情処学論, SIG-15(CVIM-16), pp. 10–21, (Oct. 2006)
- [89] 湯瀬裕昭, 田多英興: “瞬目の自動検出と瞬目波形解析”, 人間工学, Vol. 30, No. 5, pp.331–337, (Oct. 1994)
- [90] 田邊喜一, 安井淳美: “加算作業による瞬目波形の変化について - 高速度ビデオカメラを用いた波形データの取得とその予備的分析 -”, 人間工学, Vol. 46, No. 2, pp. 180–183, (Apr. 2010)
- [91] 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “フレーム分割法による瞬目の自動抽出”, 電学論 C, Vol. 132, No. 9, pp. 1437–1445, (Sep. 2012)
- [92] S. Matsuno, M. Ohyama, S. Ohi, K. Abe, H. Sato: “Automatic Discrimination of Voluntary and Spontaneous Eyeblinks –The use of the blink as a switch interface–”, Conf. on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI) 2013, pp. 433–439, (Feb. 2013)
- [93] 松野省吾, 大山 実, 阿部清彦, 佐藤寛修, 大井尚一: “フレーム分割法を用いた瞬目計測の有効性に関する一検討”, FIT2013 (第12回情報技術フォーラム) 講演論文集, 第3分冊, pp. 39–42, (Sep. 2013)
- [94] 荒木祐一, 島田伸敬, 白井良明: “背景と顔の方向に依存しない顔の検出と顔方向の推定”, 信学技報, Vol. 101, No. 569, pp. 87–94, (Jan. 2002)
- [95] 佐藤美恵, 渡辺光司, 羽島一夫, 大須賀美恵子, 春日正男: “自動似顔絵生成のためのマハラノビス距離を利用した形状抽出”, 映情学誌, Vol. 57, No. 11,

1534–1542, (Nov. 2003)

- [96] 阿部清彦, 大内幹夫, 大井尚一, 大山 実: “画像解析による強膜反射法を用いた視線入力システム”, 映情学誌, Vol. 57, No. 10, pp. 1354–1360, (Oct. 2003)
- [97] K. Grauman, M. Betke, J. Lombardi, J. Gips, and G. R. Bradski: “Communication via Eye Blinks and Eyebrow Raises: Video-based Human-Computer Interfaces”, Universal Access in the Information Society, Vol. 2, No. 4, pp. 359–373, (Nov. 2003)
- [98] 松野省吾, 大山 実, 阿部清彦, 大井尚一, 板倉直明: “瞬目種類識別のための形状特徴量に関する一検討”, FIT(情報科学技術フォーラム)2014 講演論文集, 第3分冊, pp. 29–32, (2014)
- [99] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “瞬目種類識別におけるパラメータの定義の違いによる性能比較”, 平成28年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 840–843, (Aug. 2016)
- [100] 栗原伸一: “入門統計学 –検定から多変量解析・実験計画法まで–”, p.160, オーム社, (Jul. 2011)
- [101] 永田 靖, 吉田道弘: “統計的多重比較法の基礎”, pp. 87–95, サイエンス社, (1997)
- [102] 末松良一, 山田宏尚: “画像処理工学(改訂版)”, pp.172–174, コロナ社, (2014)
- [103] 山本修司: “ImageJで学ぶ実践医用・バイオ画像処理 第31回 テンプレートマッチングによる医用画像処理”, INNERVISION, Vol. 22, No. 9, pp. 114–115, (Aug. 2007)

- [104] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “水平垂直同領域キャリブレーション法を用いた視線によるマウス操作補助システム”, 平成24年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 808–813, (Sep. 2012)
- [105] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “視線と随意性瞬目を用いる入力インタフェース”, 電学論C, Vol. 136, No. 8, pp. 1185–1193, (Aug. 2016)
- [106] K. Abe, S. Ohi, and M. Ohyama: “Eye-gaze Detection by Image Analysis Under Natural Light”, Proc. on 14th Int.l Conf. on Human-Computer Interaction, No. 2, pp. 19–26, (2011)
- [107] 阿部清彦, 佐藤寛修, 大井尚一, 大山 実: “サンプリングレートの変化に頑健な随意性瞬目識別法についての検討”, 平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 921–924, (Sep. 2014)
- [108] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “視線と随意性瞬目の情報を用いる入力インタフェース”, 平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 617–622, (Aug. 2015)
- [109] D. A. Norman: “The Psychology of Everyday Things”, Basic Books, (1988)
- [110] 村田厚生: “ヒューマン・インタフェースの基礎と応用”, p. 6, 日本出版サービス, (1998)
- [111] B. Schneiderman, C. Plaisant: “Design the User Interface: Strategies for Effective Human-computer Interaction”, 4th ed., Addison-Wesley Publishing, pp. 74–76, (2005)



## 研究業績一覧

### 学会誌論文

- [i] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実：“画像解析による随意性瞬目と視線を用いた文字入力システム”, 電気学会論文誌 C, Vol. 137, No. 4, pp. 584–594, (Apr. 2017)
- [ii] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実：“2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の自動識別法”, 電気学会論文誌 C, Vol. 136, No. 9, pp. 1350–1358, (Sep. 2016)
- [iii] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実：“視線と随意性瞬目を用いる入力インタフェース”, 電気学会論文誌 C, Vol. 136, No. 8, pp. 1185–1193, (Aug. 2016)
- [iv] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実：“瞬目種類識別のためのキャリブレーション法”, 電気学会論文誌 C, Vol. 134, No. 7, pp. 897–903, (Jul. 2014)
- [v] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実：“ハイビジョン画像を用いたフレーム分割法による瞬目種類の識別”, 電気学会論文誌 C, Vol. 133 No. 7, pp.1293–1300, (Jul. 2013)
- [vi] 阿部清彦, 佐藤寛修, 大山 実, 大井尚一：“視線による重度肢体不自由者向けコンピュータ操作支援システム”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 12, pp.1971–1979, (Dec. 2006)

### 査読付きレター

- [vii] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実：“高速度カメラによる瞬目種類識別のための特徴パラメータの計測”, 電気学会論文誌 C, Vol. 134 No.

10, pp. 1584–1585, (Oct. 2014)

## 国際会議論文

- [viii] Hironobu Sato, Kiyohiko Abe, Shoichi Ohi, and Minoru Ohyama : “ Automatic Classification Between Involuntary and Two Types of Voluntary Blinks Based on an Image Analysis ”, HCI International 2015, Proc. on 17th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol. 2, pp. 140–149, Los Angeles, USA, (Aug. 2015)
- [ix] Kiyohiko Abe, Hironobu Sato, Shogo Matsuno, Shoichi Ohi, and Minoru Ohyama : “ Input Interface Using Eye-Gaze and Blink Information ”, HCI International 2015, Proc. on 17th International Conference on Human-Computer Interaction, CCIS528, pp. 463–467, Los Angeles, USA, (Aug. 2015)
- [x] Kiyohiko Abe, Hironobu Sato, Shoichi Ohi, and Minoru Ohyama : “ Feature Parameters of Eye Blinks when the Sampling Rate is Changed ”, Proc. on IEEE Tencon 2014, pp. 1–6, Bangkok, Thailand, (Oct. 2014)
- [xi] Kiyohiko Abe, Hironobu Sato, Shogo Matsuno, Shoichi Ohi, and Minoru Ohyama : “ Automatic Classification of Eye Blink Types Using a Frame-Splitting Method ”, HCI International 2013, Proc. on 15th International Conference on Human-Computer Interaction, Vol. 16, pp. 117–124, Las Vegas, USA, (Jul. 2013)
- [xii] Shogo Matsuno, Minoru Ohyama, Kiyohiko Abe, Hironobu Sato, and Shoichi Ohi: “ Automatic Discrimination of Voluntary and Spontaneous Eyeblinks. Use of the blink as a switch interface ” The Sixth International Conference

on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI), pp. 433–439, Nice, France, (Feb. 2013)

## 研究報告

- [xiii] 阿部清彦, 佐藤寛修, 大山 実, 大井尚一: “視線による自然光下の文字入力に適した注視指標配置の検討”, 電子情報通信学会技術研究報告 (ヒューマンコミュニケーション基礎), HCS2006-42, pp. 7–12, (Sep. 2006)
- [xiv] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大山 実, 大井尚一: “視線入力による重度肢体不自由者向けコンピュータ操作支援システム”, 電子情報通信学会技術研究報告 (福祉情報工学), WIT2005-55, pp. 15–20, (Jan. 2006)

## 学術講演

- [xv] 鎌田暢介, 佐藤寛修, 阿部清彦: “Web カメラを取り付けた眼鏡による瞬目入力システムとその応用”, 2016年映像情報メディア学会冬季大会, 24A-2, (Dec. 2016)
- [xvi] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “瞬目種類識別におけるパラメータの定義の違いによる性能比較”, 平成 28 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 840–843, (Aug. 2016)
- [xvii] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “視線入力インタフェースのユーザビリティ計測”, 平成 28 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 846–847, (Aug. 2016)
- [xviii] 鎌田暢介, 佐藤寛修, 阿部清彦: “Web カメラを取り付けた眼鏡による瞬目入力システム”, 平成 28 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 844–845, (Aug. 2016)

- [xix] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “視線入力インタフェースのユーザビリティ計測に関する検討”, 2016年電子情報通信学会総合大会講演論文集, H-2-8, pp. 270, (Mar. 2016)
- [xx] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の自動識別法の検討”, 平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 623–628, (Sep. 2015)
- [xxi] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “視線と随意性瞬目の情報を用いる入力インタフェース”, 平成27年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 617–622, (Sep. 2015)
- [xxii] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “画像解析による自然光下でのリアルタイム瞬目種類識別”, 平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 916–920, (Sep. 2014)
- [xxiii] 阿部清彦, 佐藤寛修, 大井尚一, 大山 実: “サンプリングレートの変化に頑健な随意性瞬目識別法についての検討”, 平成26年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 921–924, (Sep. 2014)
- [xxiv] 松野省吾, 大山 実, 阿部清彦, 佐藤寛修, 大井尚一: 意図的な瞬目に現れる個人的特徴に関する一検討, 情報処理学会第76回全国大会講演論文集(第4分冊), pp. 4-37~4-38, (Mar 2014)
- [xxv] 佐藤寛修, 阿部清彦, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “瞬目計測のためのキャリブレーションについての検討”, 平成25年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 878–882, (Sep. 2013)
- [xxvi] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “閉眼および開眼の速さを用いた瞬目種類の識別についての検討”, 平成25年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 876–877 (Sep. 2013)

- [xxvii] 松野省吾, 大山 実, 阿部清彦, 佐藤寛修, 大井尚一: “フレーム分割法を用いた瞬目計測の有効性に関する一検討”, FIT2013 (第12回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, RJ-005, pp. 39–42, (Aug. 2013)
- [xxviii] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “ハイスピードカメラによる瞬目特徴パラメータの計測”, 2013年電子情報通信学会総合大会講演論文集, A-15-11, pp. 199, (Mar 2013)
- [xxix] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “水平垂直同領域キャリブレーション法を用いた視線によるマウス操作補助システム”, 平成24年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 808–813, (Sep. 2012)
- [xxx] 阿部清彦, 佐藤寛修, 松野省吾, 大井尚一, 大山 実: “ハイビジョン画像を用いたフレーム分割法による瞬目種類の識別”, 平成24年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, pp. 841–846, (Sep. 2012)
- [xxxix] 松野省吾, 阿部清彦, 佐藤寛修, 大井尚一, 大山実: “随意性瞬目と自発性瞬目の識別に関する検討”, FIT2012 (第11回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, RJ-003, pp. 23–26, (Sep. 2012)
- [xxxixii] 佐藤寛修, 森田英樹, 阿部清彦, 大井尚一, 大山 実: “視線および口唇開閉情報を用いたマウス操作支援システム”, 平成21年電気学会電子・情報・システム部門大講演論文集会, pp. 303–304, (Sep. 2009)
- [xxxixiii] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大山 実, 大井尚一: “視線による重度肢体不自由者向け文字入力支援システム”, FIT2005 (第4回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, K-094, pp. 573–574, (Sep. 2005)
- [xxxixiv] 佐藤寛修, 阿部清彦, 大山 実, 大井尚一: “視線入力により定形文を選択するメール操作支援システム”, FIT2004 (第3回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, K-050, pp. 507–508, (Sep. 2004)

## 解説記事

[xxxv] 阿部清彦, 佐藤寛修, 大山 実, 大井尚一: “視線入力によるコンピュータ操作支援システムー重度肢体不自由者への支援を目指して”, 画像ラボ 2007年7月号, (Jul. 2007)

# 付録 A 視線入力システムの ハードウェア仕様

表 A.1: HDMI ビデオキャプチャボード (Blackmagic Design 製: Intensity Pro) の仕様

接続方式	
HDMI ビデオ入力/出力	HDMI (A タイプ端子) 各 1 系統
HDMI オーディオ入力/出力	各 2 チャンネル
アナログビデオ入力/出力	コンポーネント, NTSC, PAL, S ビデオ
アナログオーディオ入力/出力	各 2 チャンネル RCA HiFi オーディオ (24bit)
SPIF オーディオ出力	2 チャンネル (24bit)
コンピュータインタフェース	PCI Express 1 レーン (1, 4, 8, 16 レーン PCIe スロットに対応)
フォーマット	
対応 SD フォーマット	625i/50 PAL, 525i/59.94 NTSC
対応 HD フォーマット	1080i/50, 1080i/59.94, 1080p/23.98, 1080p/24, 720p/50, 720p/59.94
HDMI ビデオサンプリング	YUV 4:2:2
カラースペース	REC 601, REC 709
HDMI 色精度	10bit
HDMI オーディオサンプリング	テレビ標準サンプルレート (48kHz/24bit)
処理機能	
色空間コンバージョン	リアルタイム (ハードウェアベース)
HD ダウンコンバージョン	ビデオキャプチャ時に変換 (ソフトウェアベース)
HD アップコンバージョン	リアルタイム (ビデオキャプチャ時に SD から 1080HD/720HD に変換)
その他	
対応 OS	Microsoft Windows 7 or 8, Apple Mac OS X, Linux
付属ソフトウェア	Media Express (キャプチャ・再生), Blackmagic ドライバ, その他ユーティリティ

表 A.2: 家庭用ビデオカメラ（ソニー製：HDR-HC9）の仕様

システム	
録画方式 (HDV/DV)	回転2ヘッドヘリカルスキャン
映像信号	NTSC カラー, EIA 標準方式, 1080/60i 方式
録画/再生時間 (HDV)	60 分 (DVM60 使用時)
録画/再生時間 (DV)	SP:60 分 (DVM60 使用時), LP:90 分 (DVM60 使用時)
使用可能カセット	miniDV 規格に準拠したカセット
ファインダー	電子ファインダー：カラー
撮像素子	6.3mm (1/2.9 型) CMOS センサー 総画素数：約 320 万画素 動画有効画素数 (16:9 モード)：約 228 万画素 動画有効画素数 (4:3 モード)：約 171 万画素 静止画有効画素数 (16:9 モード)：約 228 万画素 静止画有効画素数 (4:3 モード)：約 304 万画素
ズームレンズ	10 倍 (光学), 20 倍 (デジタル) f=5.4~54mm, F1.8~2.9
色温度切換え	オート, ワンプッシュ, 屋内 (3200K), 屋外 (5800K)
最低被写体照度	5 lx(シャッタースピード 1/30 秒 設定時)
入出力端子	
映像/音声	10 ピン特殊コネクタ
出力端子	映像：1V <sub>p-p</sub> 75 Ω Y 出力 1V <sub>p-p</sub> 75 Ω C 出力 0.286V <sub>p-p</sub> 75 Ω 音声：327mV 47k Ω負荷時
コンポーネント	D1/D3 映像コンポーネントビデオ端子
ビデオ端子	Y 出力 1V <sub>p-p</sub> 75 Ω P <sub>B</sub> /P <sub>R</sub> , C <sub>B</sub> /C <sub>R</sub> ：±350mV 75 Ω
HDMI 出力端子	HDMI コネクタ
USB 端子	mini-B
HDV/DV 端子	i.LINK (IEEE1394, 4 ピンコネクタ S100)
液晶画面	
画面サイズ	2.7 型, 横 960 × 横 220 画素
電源部, その他	
電源電圧	バッテリー端子入力：6.8V/7.2V, DC 端子入力：8.4V
消費電力	HDV 記録時：4.2W (ファインダー使用時), 4.5W (液晶使用時) DV 記録時：4.0W (ファインダー使用時), 4.3W (液晶使用時)
外形寸法	82 × 82 × 138mm (幅×高さ×奥行き)
本体重量	約 550g (本体のみ)

# 付録B 瞬目種類識別キャリブレーション法の検討結果

## B.1 予備実験における瞬目抽出結果

表 B.1: 予備実験において抽出した瞬目の個数

被験者	目視 ( $I_c$ )	自動抽出 ( $A_c$ )	誤検出 ( $D_e$ )	見落とし ( $P_d$ )	抽出不良 ( $F_d$ )
A	103	103	0	0	0
B	126	125	4	2	1
C	137	136	2	1	0
D	71	76	11	0	5
E	103	103	2	0	0
F	54	60	7	0	6
G	90	90	0	0	0
H	58	58	4	0	0

表 B.2: 予備実験における瞬目抽出率

被験者	瞬目抽出率 ( $D_r$ )[%]	抽出成功率 ( $C_r$ )[%]
A	100	100
B	97.6	96.8
C	99.3	98.5
D	93.0	84.5
E	100	98.1
F	88.9	87.0
G	100	100
H	100	93.1
平均	97.3	94.8

## B.2 予備実験における瞬目種類識別結果の詳細

### B.2.1 各種類1個ずつの瞬目から代表値を求めた場合

対象となる随意性瞬目および自発性瞬目が1個ずつの場合には、中央値と平均値が同値となるため、各瞬目種類の代表値をいずれの方法で決定した場合でも同じ結果である。

表 B.3: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	9
E	24	58	0	1
F	24	18	0	3
G	24	48	0	0
H	22	21	0	14

表 B.4: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_i$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	70.0	81.1
E	100	98.3	98.8
F	100	83.3	92.9
G	100	100	100
H	100	33.3	67.4
平均	99.5	85.6	92.5

## B.2.2 各種類2個ずつの瞬目から代表値を求めた場合

対象となる随意性瞬目および自発性瞬目が2個ずつの場合には、中央値と平均値が同値となるため、各瞬目種類の代表値をいずれの方法で決定した場合でも同じ結果である。

表 B.5: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	3
E	24	58	0	1
F	24	18	0	1
G	24	48	0	0
H	22	21	0	5

表 B.6: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	90.0	92.5
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	76.2	88.4
平均	99.5	94.9	97.2

### B.2.3 各種類3個ずつの瞬目から代表値を求めた場合

#### 1. 平均値を代表値として用いた場合

表 B.7: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	3
E	24	58	0	1
F	24	18	0	1
G	24	48	0	0
H	22	21	0	2

表 B.8: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	90.0	92.5
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	90.5	95.3
平均	99.5	96.6	98.0

2. 中央値を代表値として用いた場合

表 B.9: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	1
E	24	58	0	1
F	24	18	0	1
G	24	48	0	0
H	22	21	0	0

表 B.10: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率 (表 3.1 に相当)

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	96.7	96.2
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	100	100
平均	99.5	98.7	99.1

## B.2.4 各種類4個ずつの瞬目から代表値を求めた場合

### 1. 平均値を代表値として用いた場合

表 B.11: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	3
E	24	58	0	1
F	24	18	0	1
G	24	48	0	0
H	22	21	0	0

表 B.12: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	90.0	92.5
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	100	100
平均	99.5	97.8	98.6

2. 中央値を代表値として用いた場合

表 B.13: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	3
E	24	58	0	1
F	24	18	0	1
G	24	48	0	0
H	22	21	0	0

表 B.14: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	90.0	92.5
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	100	100
平均	99.5	97.8	98.6

## B.2.5 各種類5個ずつの瞬目から代表値を求めた場合

### 1. 平均値を代表値として用いた場合

表 B.15: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	3
E	24	58	0	1
F	24	18	0	1
G	24	48	0	0
H	22	21	0	0

表 B.16: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	90.0	92.5
E	100	98.3	98.8
F	100	94.4	97.6
G	100	100	100
H	100	100	100
平均	99.5	97.8	98.6

2. 中央値を代表値として用いた場合

表 B.17: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	23	58	0	0
B	23	80	0	0
C	20	80	0	0
D	23	30	1	1
E	24	58	0	1
F	24	18	0	0
G	24	48	0	0
H	22	21	0	0

表 B.18: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	96.7	96.2
E	100	98.3	98.8
F	100	100	100
G	100	100	100
H	100	100	100
平均	99.5	99.4	99.4

### B.3 評価実験における瞬目抽出結果

表 B.19: 評価実験において抽出した瞬目の個数

被験者	目視 ( $I_c$ )	自動抽出 ( $A_c$ )	誤検出 ( $D_e$ )	見落とし ( $P_d$ )	抽出不良 ( $F_d$ )
A	114	114	0	0	0
B	60	59	1	1	0
C	124	124	1	0	0
D	91	91	6	1	1
I	90	90	4	0	0
J	51	51	3	0	0
K	57	57	1	0	0
L	49	49	2	0	0

表 B.20: 評価実験における瞬目抽出率

被験者	瞬目抽出率 ( $D_r$ )[%]	抽出成功率 ( $C_r$ )[%]
A	100	100
B	98.3	98.3
C	100	99.2
D	97.8	93.4
I	100	95.6
J	100	94.1
K	100	98.2
L	100	95.9
平均	99.5	96.8

## B.4 評価実験における瞬目種類識別結果の詳細

表 B.21: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	25	89	0	0
B	22	31	0	0
C	19	93	0	0
D	23	61	1	4
I	23	61	0	0
J	24	24	0	0
K	25	31	0	0
L	25	22	0	0

表 B.22: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率 (表 3.2 に相当)

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	95.7	93.4	94.0
I	100	100	100
J	100	100	100
K	100	100	100
L	100	100	100
平均	99.5	99.2	99.3

## B.5 関連する先行研究の方法による瞬目種類識別結果

### B.5.1 200 ミリ秒の固定値を持続時間のしきい値とした場合

Królak ら [31] の研究および Su ら [70] の研究では、200 ミリ秒の固定値を瞬目種類識別のため瞬目の持続時間のしきい値として用いた。この条件を著者の計測した瞬目データに適用し、自動識別を行なった結果を表 B.23 および表 B.24 に示す。

表 B.23: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	25	89	0	89
B	22	31	0	31
C	19	93	0	93
D	23	61	0	61
I	23	61	0	61
J	24	24	0	24
K	25	31	0	31
L	25	22	0	22

表 B.24: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_i$ )[%]
A	100	0.0	21.9
B	100	0.0	41.5
C	100	0.0	17.0
D	100	0.0	27.4
I	100	0.0	27.4
J	100	0.0	50.0
K	100	0.0	44.6
L	100	0.0	53.2
平均	100	0.0	35.4

## B.5.2 250.5 ミリ秒の固定値を持続時間のしきい値とした場合

小澤らの研究 [72] では、250.5 ミリ秒の固定値を瞬目種類識別のため瞬目の持続時間のしきい値として用いた。この条件を著者の計測した瞬目データに適用し、自動識別を行なった結果を表 B.25 および表 B.26 に示す。

表 B.25: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	25	89	0	88
B	22	31	0	20
C	19	93	0	89
D	23	61	0	57
I	23	61	0	57
J	24	24	0	24
K	25	31	0	31
L	25	22	0	22

表 B.26: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	1.1	22.8
B	100	35.5	62.3
C	100	4.3	20.5
D	100	6.6	32.1
I	100	6.6	32.1
J	100	0.0	50.0
K	100	0.0	44.6
L	100	0.0	53.2
平均	100	6.8	39.7

### B.5.3 300 ミリ秒の固定値を持続時間のしきい値とした場合

中村らの研究 [37] では、300 ミリ秒の固定値を瞬目種類識別のため瞬目の持続時間のしきい値として用いた。この条件を著者の計測した瞬目データに適用し、自動識別を行なった結果を表 B.27 および表 B.28 に示す。

表 B.27: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	25	89	0	80
B	22	31	0	7
C	19	93	0	82
D	23	61	1	35
I	23	61	0	53
J	24	24	0	19
K	25	31	0	29
L	25	22	0	22

表 B.28: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	10.1	29.8
B	100	77.4	86.8
C	100	11.8	26.8
D	95.7	42.6	57.1
I	100	13.1	36.9
J	100	20.8	60.4
K	100	6.5	48.2
L	100	0.0	53.2
平均	99.5	22.8	49.9

#### B.5.4 随意性瞬目の持続時間の最小値をしきい値とした場合

Grauman らの研究 [30] では、識別に用いた持続時間のしきい値は示されていないが、あらかじめ計測した長短の瞬目の持続時間から、随意性とみなされる長い瞬目の最小値を複数の被験者から一つ求めている。比較のため、3.6.2 項の瞬目種類識別のためのキャリブレーション用に得たデータを、あらかじめ計測したものと仮定して随意性瞬目の最小値を求めたところ、約 383.3 ミリ秒となった。この値を固定値として持続時間のしきい値に用い、著者の計測した瞬目データに適用し、自動識別を行なった結果を表 B.29 および表 B.30 に示す。

表 B.29: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $I_{V_c}$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	25	89	0	19
B	22	31	0	0
C	19	93	0	53
D	23	61	1	6
I	23	61	0	8
J	24	24	0	5
K	25	31	0	5
L	25	22	0	11

表 B.30: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_t$ )[%]
A	100	78.7	83.3
B	100	100	100
C	100	43.0	52.7
D	95.7	90.2	91.7
I	100	86.9	90.5
J	100	79.2	89.6
K	100	83.9	91.1
L	100	50.0	76.6
平均	99.5	76.5	84.4

### B.5.5 持続時間のしきい値を複数の被験者から求めて得た平均値を用いた場合

統計的な手法として、3.6.2項の実験より得た瞬目種類識別のしきい値について、8名から求めた平均値を採用する方法が考えられる。まず、3章の提案手法である、随意性瞬目と自発性瞬目を各3個ずつの中央値を代表値として用い、持続時間のしきい値を8名の被験者について個々に求める。そして、8名の持続時間のしきい値から平均値を求めたところ、約634.4ミリ秒となった。

この値を固定値として持続時間のしきい値に用い、著者の計測した瞬目データに適用し、自動識別を行なった結果を表B.31および表B.32に示す。

表 B.31: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数

被験者	瞬目データ個数		誤識別の個数	
	随意性瞬目 ( $V_c$ )	自発性瞬目 ( $Iv_c$ )	随意性瞬目 ( $E_v$ )	自発性瞬目 ( $E_{iv}$ )
A	25	89	0	0
B	22	31	0	0
C	19	93	0	0
D	23	61	21	0
I	23	61	0	0
J	24	24	0	0
K	25	31	0	0
L	25	22	0	0

表 B.32: 自動識別によって得られた瞬目種類識別率

被験者	自発性瞬目 ( $C_v$ )[%]	随意性瞬目 ( $C_{iv}$ )[%]	全体 ( $C_i$ )[%]
A	100	100	100
B	100	100	100
C	100	100	100
D	8.7	100	75.0
I	100	100	100
J	100	100	100
K	100	100	100
L	100	100	100
平均	88.6	100	96.9

# 付録C 2種類の随意性瞬目と自発性瞬目の識別における実験結果

## C.1 予備実験における瞬目パラメータの計測結果

図 4.4～図 4.6 のグラフに用いた瞬目パラメータの値を，表 C.1～表 C.3 にそれぞれ示す．なお，被験者 K の自発性瞬目は瞬目データが 1 個であったため，標準偏差は得られなかった．

表 C.1: 予備実験における瞬目パラメータ（持続時間）

被験者	しっかり		なるべく短く		自発性瞬目	
	平均 [ミリ秒]	標準偏差 [ミリ秒]	平均 [ミリ秒]	標準偏差 [ミリ秒]	平均 [ミリ秒]	標準偏差 [ミリ秒]
A	776.7	54.8	350.0	11.8	370.4	43.7
B	946.7	61.7	540.0	56.0	395.4	45.2
C	1075.0	139.8	533.3	49.1	408.3	42.1
D	966.7	108.0	663.3	74.0	507.9	74.5
E	987.5	76.2	586.7	38.0	411.1	53.4
F	796.7	109.5	563.3	66.0	296.7	13.9
G	695.8	197.4	445.8	21.0	377.1	80.5
H	1044.4	164.4	420.0	68.1	317.7	39.7
I	716.7	163.9	426.7	83.8	317.4	44.1
J	1073.3	184.3	733.3	85.0	538.2	59.2
K	963.3	72.1	786.7	77.6	466.7	—
L	926.7	152.1	693.3	97.6	433.3	75.8
M	1166.7	246.1	600.0	97.2	397.6	37.8
N	816.7	116.7	376.7	19.0	333.3	70.7
O	916.7	58.9	543.3	68.3	437.5	109.2

表 C.2: 予備実験における瞬目パラメータ（最大振幅値）

被験者	しっかり		なるべく短く		自発性瞬目	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
A	0.485	0.008	0.476	0.039	0.373	0.019
B	0.565	0.037	0.598	0.009	0.398	0.061
C	0.538	0.008	0.487	0.014	0.311	0.074
D	0.534	0.057	0.539	0.014	0.290	0.045
E	0.543	0.017	0.576	0.007	0.508	0.035
F	0.495	0.029	0.470	0.011	0.388	0.009
G	0.433	0.051	0.502	0.028	0.232	0.091
H	0.198	0.011	0.304	0.008	0.223	0.029
I	0.330	0.011	0.362	0.061	0.211	0.026
J	0.720	0.010	0.713	0.009	0.608	0.034
K	0.635	0.011	0.590	0.012	0.104	–
L	0.554	0.018	0.510	0.014	0.306	0.093
M	0.473	0.011	0.532	0.012	0.389	0.044
N	0.425	0.005	0.385	0.016	0.296	0.057
O	0.624	0.044	0.500	0.032	0.410	0.087

この最大振幅値パラメータは、瞬目開始点のサンプル値（眼球開口部面積）によって正規化されているため、無次元である。

表 C.3: 予備実験における瞬目パラメータ（振幅の積分値）

被験者	しっかり		なるべく短く		自発性瞬目	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差	平均	標準偏差
A	15.011	1.798	4.579	0.960	2.965	0.526
B	17.488	0.847	9.320	1.253	2.850	0.648
C	23.448	4.025	7.789	0.885	2.692	1.487
D	19.280	5.339	11.003	2.112	3.062	0.770
E	22.854	3.477	11.595	1.348	4.633	1.134
F	16.403	3.343	9.577	1.363	3.213	0.386
G	10.782	4.014	6.419	0.381	1.870	1.097
H	6.877	1.466	2.838	0.391	1.413	0.317
I	8.809	2.871	4.095	1.505	1.301	0.262
J	30.417	9.934	19.709	3.418	6.519	1.204
K	20.270	1.440	10.969	0.411	1.064	–
L	15.745	2.582	8.415	1.348	2.522	0.981
M	21.929	5.124	10.074	3.488	3.235	0.933
N	11.603	2.845	4.232	0.370	2.046	0.097
O	22.893	3.309	8.093	2.394	4.169	2.105

この振幅の積分値パラメータは、瞬目開始点のサンプル値（眼球開口部面積）によって正規化された振幅値を、瞬目の開始点から終了点まで総和したものであるため、無次元である。

## C.2 評価実験における瞬目種類識別結果の詳細

4.4.2 項にて比較のために瞬目種類識別率を示した，表 4.1 について，結果の詳細を示す．

### C.2.1 条件 C1 の場合

条件 C1 では，瞬目種類識別を実現する 2 段階の判定について，判定 1 に瞬目の持続時間パラメータを用い，判定 2 に瞬目の最大積分値パラメータを用いた．

表 C.4: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数（条件 C1）

被験者	瞬目データ個数			誤識別数		
	しっかり ( $V_{c1}$ )	なるべく短く ( $V_{c2}$ )	自発性 ( $Iv_c$ )	しっかり ( $E_{v1}$ )	なるべく短く ( $E_{v2}$ )	自発性 ( $E_{iv}$ )
A	15	14	72	0	1	0
B	14	14	95	0	2	0
G	13	12	27	0	0	3
H	14	13	3	1	2	0
I	15	13	87	7	0	4
J	14	14	31	0	6	6
K	15	14	22	1	1	0
L	13	12	56	0	1	3
M	15	14	17	3	1	0
O	14	12	29	0	8	3

表 C.5: 自動識別の結果として得られた識別率 (条件 C1)

被験者	しっかり ( $C_{v1}$ ) [%]	なるべく短く ( $C_{v2}$ ) [%]	自発性 ( $C_{iv}$ ) [%]	全体 ( $C_t$ ) [%]
A	100	92.9	100	97.6
B	100	85.7	100	95.2
G	100	100	88.9	96.3
H	92.9	84.6	100	92.5
I	53.3	100	95.4	82.9
J	100	57.1	80.6	79.3
K	93.3	92.9	100	95.4
L	100	91.7	94.6	95.4
M	80.0	92.9	100	91.0
O	100	33.3	89.7	74.3
平均	92.0	83.1	94.9	90.0

## C.2.2 条件 C2 の場合

条件 C2 では、瞬目種類識別を実現する 2 段階の判定について、判定 1 に瞬目の持続時間パラメータを用い、判定 2 に振幅の積分値パラメータを用いた。

表 C.6: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数 (条件 C2)

被験者	瞬目データ個数			誤識別数		
	しっかり ( $V_{c1}$ )	なるべく短く ( $V_{c2}$ )	自発性 ( $Iv_c$ )	しっかり ( $E_{v1}$ )	なるべく短く ( $E_{v2}$ )	自発性 ( $E_{iv}$ )
A	15	14	72	0	3	0
B	14	14	95	0	2	0
G	13	12	27	0	0	0
H	14	13	3	1	0	0
I	15	13	87	7	1	2
J	14	14	31	0	5	6
K	15	14	22	1	1	0
L	13	12	56	0	1	1
M	15	14	17	3	1	0
O	14	12	29	0	8	1

表 C.7: 自動識別の結果として得られた識別率 (条件 C2)

被験者	しっかり ( $C_{v1}$ ) [%]	なるべく短く ( $C_{v2}$ ) [%]	自発性 ( $C_{iv}$ ) [%]	全体 ( $C_t$ ) [%]
A	100	78.6	100	92.9
B	100	85.7	100	95.2
G	100	100	100	100
H	92.9	100	100	97.6
I	53.3	92.3	97.7	81.1
J	100	64.3	80.6	81.6
K	93.3	92.9	100	95.4
L	100	91.7	98.2	96.6
M	80.0	92.9	100	91.0
O	100	33.3	96.6	76.6
平均	92.0	83.2	97.3	90.8

### C.2.3 条件 C3 の場合

条件 C3 では、瞬目種類識別を実現する 2 段階の判定について、判定 1 に振幅の積分値パラメータを用い、判定 2 に瞬目の持続時間パラメータを用いた。

表 C.8: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数 (条件 C3)

被験者	瞬目データ個数			誤識別数		
	しっかり ( $V_{c1}$ )	なるべく短く ( $V_{c2}$ )	自発性 ( $Iv_c$ )	しっかり ( $E_{v1}$ )	なるべく短く ( $E_{v2}$ )	自発性 ( $E_{iv}$ )
A	15	14	72	0	9	4
B	14	14	95	0	0	1
G	13	12	27	0	0	0
H	14	13	3	2	1	0
I	15	13	87	2	1	13
J	14	14	31	1	1	19
K	15	14	22	0	1	4
L	13	12	56	0	1	1
M	15	14	17	2	0	0
O	14	12	29	0	1	8

表 C.9: 自動識別の結果として得られた識別率 (条件 C3)

被験者	しっかり ( $C_{v1}$ ) [%]	なるべく短く ( $C_{v2}$ ) [%]	自発性 ( $C_{iv}$ ) [%]	全体 ( $C_t$ ) [%]
A	100	35.7	94.4	76.7
B	100	100	98.9	99.6
G	100	100	100	100
H	85.7	92.3	100	92.7
I	86.7	92.3	85.1	88.0
J	92.9	92.9	38.7	74.8
K	100	92.9	81.8	91.6
L	100	91.7	98.2	96.6
M	86.7	100	100	95.6
O	100	91.7	72.4	88.0
平均	95.2	88.9	87.0	90.4

## C.2.4 条件 C4 の場合

条件 C4 では、瞬目種類識別を実現する 2 段階の判定について、判定 1 に振幅の積分値パラメータを用い、判定 2 に瞬目の最大振幅値パラメータを用いた。

表 C.10: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数 (条件 C4)

被験者	瞬目データ個数			誤識別数		
	しっかり ( $V_{c1}$ )	なるべく短く ( $V_{c2}$ )	自発性 ( $Iv_c$ )	しっかり ( $E_{v1}$ )	なるべく短く ( $E_{v2}$ )	自発性 ( $E_{iv}$ )
A	15	14	72	0	1	0
B	14	14	95	0	0	0
G	13	12	27	0	0	3
H	14	13	3	2	2	0
I	15	13	87	2	0	3
J	14	14	31	1	2	0
K	15	14	22	0	0	0
L	13	12	56	0	1	3
M	15	14	17	2	0	0
O	14	12	29	0	2	3

表 C.11: 自動識別の結果として得られた識別率 (条件 C4)

被験者	しっかり ( $C_{v1}$ ) [%]	なるべく短く ( $C_{v2}$ ) [%]	自発性 ( $C_{iv}$ ) [%]	全体 ( $C_t$ ) [%]
A	100	92.9	100	97.6
B	100	100	100	100
G	100	100	88.9	96.3
H	85.7	84.6	100	90.1
I	86.7	100	96.6	94.4
J	92.9	85.7	100	92.9
K	100	100	100	100
L	100	91.7	94.6	95.4
M	86.7	100	100	95.6
O	100	83.3	89.7	91.0
平均	95.2	93.8	97.0	95.3

### C.2.5 条件 C5 の場合

条件 C5 では、瞬目種類識別を実現する 2 段階の判定について、判定 1 および判定 2 に振幅の積分値パラメータを用いた。

表 C.12: 自動識別の結果として得られた瞬目データの個数 (条件 C5)

被験者	瞬目データ個数			誤識別数		
	しっかり ( $V_{c1}$ )	なるべく短く ( $V_{c2}$ )	自発性 ( $Iv_c$ )	しっかり ( $E_{v1}$ )	なるべく短く ( $E_{v2}$ )	自発性 ( $E_{iv}$ )
A	15	14	72	0	3	0
B	14	14	95	0	0	0
G	13	12	27	0	0	0
H	14	13	3	2	0	0
I	15	13	87	2	1	2
J	14	14	31	1	0	4
K	15	14	22	0	0	0
L	13	12	56	0	1	1
M	15	14	17	2	0	0
O	14	12	29	0	1	1

表 C.13: 自動識別の結果として得られた識別率 (条件 C5)

被験者	しっかり ( $C_{v1}$ ) [%]	なるべく短く ( $C_{v2}$ ) [%]	自発性 ( $C_{iv}$ ) [%]	全体 ( $C_t$ ) [%]
A	100	78.6	100	92.9
B	100	100	100	100
G	100	100	100	100
H	85.7	100	100	95.2
I	86.7	92.3	97.7	92.2
J	92.9	100	87.1	93.3
K	100	100	100	100
L	100	91.7	98.2	96.6
M	86.7	100	100	95.6
O	100	91.7	96.6	96.1
平均	95.2	95.4	98.0	96.2