

超音波振動を用いた  
皮膚感覚インターフェースに関する研究

Tactile Interface Using Ultrasonic Vibration

2017年3月

埼玉大学大学院理工学研究科（博士後期課程）  
理工学専攻 人間支援・生産科学コース（主指導教員 高崎正也）

多門 良

# 目次

目次	i
図目次	ix
表目次	xv
第 1 章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
1.3 論文構成	3
第 2 章 弾性表面波	5
2.1 弾性表面波	5
2.1.1 弾性表面波の励振	5
2.1.2 弾性表面波の反射	6
2.1.3 弾性表面波励振に用いる圧電材料	7
2.1.4 IDT の形成	8
2.2 弾性表面波デバイス	9
2.2.1 信号処理デバイス	9
2.2.1.1 フィルタ [6]	9
2.2.1.2 共振子	10
2.2.1.3 ディレイライン	10
2.2.1.4 コンボルバ	10
2.2.2 センサ	10
2.2.3 アクチュエータ	11
2.2.3.1 弾性表面波リニアモータ	11
2.2.3.2 弾性表面波霧化器	11



第 3 章	弾性表面波励振システムの簡易化	13
3.1	パルスによる弾性表面波の励振	13
3.1.1	目的	13
3.1.2	原理	13
3.1.3	パルスによる弾性表面波の連続波の励振原理	14
3.2	パルスによる弾性表面波励振のシミュレーション	15
3.2.1	Mason の等価回路モデルを用いたシミュレーション	16
3.2.2	Smith の等価回路モデルを用いたシミュレーション	16
3.2.3	等価回路モデルと伝達関数	17
3.2.4	インパルス応答のシミュレーション	20
3.3	パルスによる弾性表面波励振の実現	21
3.3.1	FET スイッチング回路	21
3.3.2	励振実験に使用した弾性表面波振動子	26
3.3.3	基板表面の振動速度の測定 (ハーフブリッジ回路)	26
3.3.4	スイッチング回路の改良による印加電圧の改善	28
3.3.5	基板表面の振動速度の測定 (フルブリッジ回路)	31
3.3.6	パルス波による弾性表面波の連続波の励振	34
3.4	パルスにより励振した弾性表面波の振動速度波形の評価	35
3.4.1	シミュレーションとの比較	35
3.4.2	振動速度波形におけるゆらぎと安定化	37
3.4.3	パルス波の周波数変化に対する振動振幅の変化	40
3.4.4	ゆらぎの評価	45
3.4.5	励振効率	48
3.5	まとめ	48
第 4 章	弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの改善	51
4.1	皮膚感覚 [33]	51
4.1.1	皮膚感覚	51
4.1.2	皮膚の構造 [34]	51
4.1.3	粗さ感	52
4.2	触覚ディスプレイ	53
4.2.1	ピンアレイを利用した触覚ディスプレイ	54
4.2.2	電気刺激を利用した触覚ディスプレイ	54
4.2.3	超音波振動を用いた触覚ディスプレイ	55
4.2.4	音響放射圧を用いた触覚ディスプレイ	55

4.3	弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ	55
4.3.1	パッシブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ	56
4.3.2	アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ [60][61]	57
4.3.2.1	皮膚感覚提示原理	57
4.3.2.2	ディスプレイの構成	58
4.3.2.3	制御システム	58
4.4	皮膚感覚ディスプレイのコンピュータインターフェースへの適用	59
4.4.1	直感的なインターフェース	59
4.4.1.1	タッチパネル	59
4.4.1.2	ペンタブレット	61
4.4.1.3	触覚・皮膚感覚の適用例	61
4.4.2	ペンを用いる皮膚感覚ディスプレイ	64
4.4.2.1	原理	64
4.4.2.2	振動子の構成	65
4.4.2.3	制御システム	67
4.4.2.4	視覚情報との統合	67
4.4.2.5	デモンストレーション用ソフトウェアの開発	68
4.4.2.6	皮膚感覚提示実験	70
4.4.2.7	ペン先の統合によるユーザビリティ向上	71
4.4.2.8	速度変化の測定実験	74
4.5	周波数スペクトルへの着目による提示感覚の改善	74
4.5.1	不自然さの原因	74
4.5.1.1	粗さの定義	76
4.5.2	時系列に着目した制御システム (テレタッチ)	77
4.5.3	周波数スペクトルに着目した制御システム	79
4.5.3.1	得られる振動の比較	79
4.5.3.2	擬似乱数列によるゆらぎの生成	80
4.5.3.3	制御システム	84
4.5.3.4	提示可能な周波数帯域	84
4.5.3.5	速度変化の測定実験	86
4.5.3.6	弁別実験	87
4.6	弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの面積化	89
4.6.1	移動型振動子	90
4.6.1.1	デモンストレーション用ソフトウェアの改良	91
4.6.2	間接励振の適用	92

4.6.2.1	大面積振動子 . . . . .	94
4.6.2.2	振動伝播特性 . . . . .	95
4.6.3	パルス駆動による弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ . . . . .	96
4.6.3.1	直接励振の皮膚感覚ディスプレイへのパルス駆動の適用 . . . . .	98
4.6.3.2	間接励振へのパルス駆動の適用と弾性表面波の指向性調査 . . . . .	98
4.6.3.3	間接励振の皮膚感覚ディスプレイへのパルス駆動適用時の振 動伝播特性 . . . . .	100
4.6.3.4	間接励振の皮膚感覚ディスプレイのシステム構成 . . . . .	101
4.6.3.5	間接励振の皮膚感覚ディスプレイにおける速度変化の測定 . . . . .	102
第 5 章	皮膚感覚ディスプレイの応用 . . . . .	105
5.1	皮膚感覚提示と力覚提示の融合 . . . . .	105
5.1.1	力覚提示デバイスを用いた可動範囲の制限 . . . . .	105
5.1.1.1	力覚提示デバイス PHANToM Omni . . . . .	106
5.1.1.2	制御システムと装置構成 . . . . .	106
5.1.1.3	力覚提示を行う仮想空間 . . . . .	106
5.1.1.4	デモンストレーションによる有効性確認 . . . . .	107
5.2	障害者向け補助デバイス . . . . .	109
5.2.1	視覚障害者 . . . . .	109
5.2.2	聴覚障害者 . . . . .	112
5.2.3	視覚障害者と触覚・聴覚 . . . . .	112
5.2.4	視覚障害者によるコンピュータ利用 . . . . .	113
5.2.5	視覚障害者向けコンピュータ操作補助 . . . . .	113
5.2.6	視覚障害者に対する皮膚感覚提示実験 . . . . .	115
5.2.7	安価な力覚提示デバイスの利用 . . . . .	117
5.2.8	今後の展望 . . . . .	119
5.2.8.1	皮膚感覚提示デバイスと力覚提示の融合 . . . . .	119
第 6 章	結論 . . . . .	121
6.1	本研究で得られた成果 . . . . .	121
6.2	今後の展望 . . . . .	122
謝辞		125
参考文献		127

---

関連発表	139
本論文で用いている略語一覧	145
付録 A プログラム	147
A.1 SH-2 マイコンのシリアル通信用プログラム	147
A.1.1 通常の皮膚感覚ディスプレイの制御プログラム	147
A.1.2 制御信号に乱数を参照するプログラム	148
A.1.3 今後のプロトコル改良にあたって	149
A.2 皮膚感覚提示デモ用ソフトウェア	150
A.2.1 パネルを 3 つ表示し, 異なる粗さを提示するソフトウェア	150
A.2.1.1 概要	150
A.2.1.2 開発環境	150
A.2.1.3 動作環境	157
A.2.1.4 インストール・アンインストール方法	157
A.2.1.5 使用方法	157
A.2.2 パネルを任意の数だけ表示し, 異なる粗さを提示するソフトウェア	157
A.2.2.1 概要	157
A.2.2.2 開発環境	158
A.2.2.3 XML を用いた設定保存	159
A.2.2.4 GDI を用いたパネル描画	160
A.2.2.5 包含判定アルゴリズム	166
A.2.2.6 ルックアップテーブルの導入による効率的な処理	169
A.2.2.7 動作モード	170
A.2.2.8 動作環境	171
A.2.2.9 インストール・アンインストール方法	171
A.2.2.10 使用方法	172
A.2.3 ペイントソフトに粗さ感覚提示を付加したソフトウェア	172
A.2.3.1 概要	172
A.2.3.2 開発環境	173
A.2.3.3 テクスチャ画像の表示によるリアルな感覚提示	173
A.2.3.4 動作環境	174
A.2.3.5 インストール・アンインストール方法	175
A.2.3.6 使用方法	175
A.2.4 画像の輝度情報に応じて粗さ感覚を提示するソフトウェア	176

A.2.4.1	概要	176
A.2.4.2	開発環境	176
A.2.4.3	二値化とグレースケール化	176
A.2.4.4	動作環境	178
A.2.4.5	インストール・アンインストール方法	178
A.2.4.6	使用方法	179
A.2.5	iPod を用いて粗さ感覚を提示するソフトウェア	179
A.2.5.1	概要	179
A.2.5.2	開発環境	180
A.2.5.3	音声による情報送信	180
A.2.5.4	動作環境	180
A.3	力覚提示デモ用プログラム	180
A.3.1	仮想空間を生成し PHANToM を用いて力覚提示を行うソフトウェア	180
A.3.1.1	概要	180
A.3.1.2	開発環境	181
A.3.1.3	OpenGL による仮想空間の描画	181
A.3.1.4	OpenHaptics Toolkit による力覚提示	181
A.3.1.5	動作環境	181
A.3.2	Falcon を用いて力覚提示を行いカーソルを制御するソフトウェア	182
A.3.2.1	概要	182
A.3.2.2	開発環境	182
A.3.2.3	Falcon API	182
A.3.2.4	Direct3D による仮想空間の描画	183
A.3.2.5	HDAL による力覚提示	183
A.3.2.6	正確なタイマ関数を用いた画面更新	184
A.3.2.7	動作環境	185
A.4	研究を行う上で開発したツール	186
A.4.1	M 系列乱数を生成するソフトウェア	186
A.4.1.1	概要	186
A.4.1.2	開発環境	186
A.4.1.3	M 系列の生成	186
A.4.2	FFT 解析を行うソフトウェア	186
A.4.2.1	概要	186
A.4.2.2	FFTW による FFT 解析	186
A.4.2.3	窓関数	187

A.4.2.4	周波数分解能	188
A.4.2.5	動作モード	188
A.4.2.6	開発環境	188
A.4.2.7	動作環境	188
A.4.2.8	インストール・アンインストール方法	189
A.4.2.9	使用方法	189
付録 B	皮膚感覚提示デモンストレーション	191
B.1	ガラス基板を用いた間接励振弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ	191
B.1.1	機器の準備と接続	191
B.1.2	使用方法	193
B.2	ペンタプレート型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ	193
B.2.1	機器の準備と接続	193
B.2.2	使用方法	194
B.3	保守	195
B.3.1	振動子の清掃	196
B.3.2	マーカーペン用スライダニブの製作	196
付録 C	本研究で製作した電気回路	199
C.1	FET スイッチング回路	199
C.1.1	トランジスタ	199
C.1.2	FET	199
C.1.3	IGBT	200
C.1.4	ハイサイド駆動回路	200
C.1.4.1	概要	200
C.1.4.2	回路図	200
C.1.4.3	ブートストラップ回路 [152][153]	200
C.1.4.4	回路の問題点	203
C.1.5	ハーフブリッジ回路	203
C.1.5.1	概要	203
C.1.5.2	回路図	203
C.1.5.3	ゲート抵抗と立ち上がり時間の関係及び立ち下がり時間の改善 [152]	204
C.1.5.4	回路の問題点	205
C.1.6	フルブリッジ回路	206

---

C.1.6.1	概要 . . . . .	206
C.1.6.2	回路図 . . . . .	206
C.1.6.3	デッドタイムの生成 . . . . .	206
C.1.6.4	チャタリング除去 . . . . .	209
C.1.6.5	回路の問題点 . . . . .	209
C.2	パルスアンプ . . . . .	210
C.2.1	概要 . . . . .	210
C.2.2	構成 . . . . .	210
C.2.2.1	矩形波発振回路 . . . . .	211
C.2.2.2	整流・平滑回路 . . . . .	212
C.2.3	将来の展望 . . . . .	213
付録 D	力覚提示デバイスの視覚障害者補助デバイスへの応用	215
D.1	安価な力覚提示デバイスの利用 . . . . .	215
D.2	仮想空間におけるコンピュータ操作 . . . . .	216
D.3	力覚提示によるウィンドウ弁別実験 . . . . .	217

## 目次

1.1	Presentation devices . . . . .	2
2.1	Interdigital transducer . . . . .	6
2.2	Excitation of Rayleigh wave . . . . .	6
2.3	Short metal strip array . . . . .	7
2.4	Open metal strip array . . . . .	7
2.5	Reflection of Rayleigh wave . . . . .	7
3.1	SAW excitation by pulse wave . . . . .	14
3.2	Principle of SAW excitation by pulse wave . . . . .	15
3.3	Continuous SAW excitation by pulse waves . . . . .	16
3.4	A basic model of a SAW filter . . . . .	17
3.5	Equivalent circuit model for IDT unit cell . . . . .	18
3.6	Equivalent circuit for the SAW filter . . . . .	18
3.7	Equivalent circuit for a single SAW transducer with a transmission line . . . . .	19
3.8	Frequency and time response of Smith's equivalent circuit (1st model) . . . . .	22
3.9	Closeup of frequency response of Smith's equivalent circuit (1st model) . . . . .	22
3.10	Frequency and time response of improved equivalent circuit considering second-order effects . . . . .	23
3.11	Closeup of frequency response of improved equivalent circuit considering second-order effects . . . . .	23
3.12	Continuous SAW approximated by time-domain characteristics . . . . .	24
3.13	Circuit diagram of FET driving circuit (half-bridge configuration) . . . . .	24
3.14	FET driving circuit (half-bridge configuration) . . . . .	24
3.15	SAW transducer . . . . .	26
3.16	Electrical characteristics of SAW transducer . . . . .	27
3.17	Experimental configuration of measuring surface vibration . . . . .	28



3.18	Vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration) . . . . .	29
3.19	Propagation of vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration, 1.0mm away from IDT) . . . . .	29
3.20	Propagation of vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration, 2.0mm away from IDT) . . . . .	30
3.21	Propagation of vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration, 3.0mm away from IDT) . . . . .	30
3.22	FFT analysis result of vibration velocity (half-bridge configuration) . . .	31
3.23	Circuit diagram of FET driving circuit (full-bridge configuration) . . . .	31
3.24	FET driving circuit (full-bridge configuration) . . . . .	32
3.25	Vibration velocity by pulse wave (full-bridge configuration) . . . . .	33
3.26	FFT analysis result of vibration velocity (full-bridge configuration) . . .	34
3.27	Vibration velocity by continuous pulse wave (full-bridge configuration) .	35
3.28	FFT analysis result of vibration velocity (full-bridge configuration) . . .	36
3.29	Superposition and cancelation in SAW excited by pulse waves . . . . .	38
3.30	Superposition and cancelation in SAW excited by pulse waves (with damp- ing by IDT) . . . . .	39
3.31	Vibration velocity by edge of pulse wave with 360 degree phase lead . . .	41
3.32	Vibration velocity by edge of pulse wave with 3600 degree phase lead . .	42
3.33	Vibration velocity by edge of pulse wave with 180 degree phase lead . . .	43
3.34	Vibration velocity by edge of pulse wave with 3420 degree phase lead . .	44
3.35	Method of fluctuation evaluation . . . . .	46
3.36	Fluctuation of vibration velocity by changing frequency of pulse wave . .	46
3.37	Closeup of fluctuation of vibration velocity by changing frequency of pulse wave . . . . .	47
3.38	Closeup of fluctuation of vibration velocity by changing frequency of pulse wave . . . . .	47
3.39	Comparison of power consumption . . . . .	49
4.1	Model of stick-slip-through . . . . .	53
4.2	Friction change by SAW ON/OFF . . . . .	57
4.3	Active type SAW tactile display . . . . .	58
4.4	Control system of active type SAW tactile display . . . . .	59
4.5	Graphics tablet (Wacom bamboo, from Wacom's website [66]) . . . . .	62
4.6	Pen tablet type interface using SAW tactile display[85] . . . . .	64

4.7	Tactile touch screen using sheet-like ultrasonic transducer[88]	65
4.8	Pen tablet type SAW tactile display	65
4.9	Large-size SAW transducer	66
4.10	Dimension of large-size SAW transducer	66
4.11	Control system of pen tablet type SAW tactile display	67
4.12	SAW tactile display with pen display	69
4.13	Demonstration software for tactile display	69
4.14	Slider nib for SAW tactile display	72
4.15	Marker with slider nib	72
4.16	Comparison of tactile display with/without slider	73
4.17	Experimental configuration of measuring pen velocity	74
4.18	Pen velocity ( $k_r=100\mu\text{m}$ , $d=20\%$ )	75
4.19	Pen velocity (rubbing canvas)	81
4.20	FFT analysis result (rubbing canvas)	81
4.21	Pen velocity (rubbing sandpaper #80)	82
4.22	FFT analysis result (rubbing sandpaper #80)	82
4.23	Pen velocity (rubbing tactile display)	83
4.24	FFT analysis result (rubbing tactile display)	83
4.25	Control system of SAW tactile display referring to MLS random number	85
4.26	Bandwidth between maximum and minimum frequency by MLS random number	87
4.27	Pen velocity (referring to MLS random number)	88
4.28	FFT analysis result (referring to MLS random number)	88
4.29	Movable frame on graphics tablet	90
4.30	Rubbing motion through movable frame	91
4.31	Rubbing motion at rotated SAW transducer	92
4.32	Experimental configuration for measuring pen vibration (rubbing across SAW propagation direction)	92
4.33	Pen velocity ( $k_r=500\mu\text{m}$ , $d=20\%$ , across SAW propagation direction)	93
4.34	Tactile demonstration software covering whole LCD	93
4.35	Paint software for generating drawing sensation	94
4.36	Configuration of large-size tactile display using indirect SAW excitation	95
4.37	Large-size tactile display using indirect SAW excitation	96
4.38	Dimension of transducer	96

4.39	Experimental configuration for measuring vibration velocity distribution of large-size transducer . . . . .	97
4.40	Vibration velocity distribution of large-size transducer driven by sine wave	97
4.41	Experimental configuration for measuring slider velocity . . . . .	99
4.42	Slider velocity (control signal: 100Hz, duty ratio: 20%, driven by pulse wave) . . . . .	99
4.43	Experimental configuration for measuring vibration velocity distribution	100
4.44	Vibration velocity distribution of SAW excited by sine wave . . . . .	100
4.45	Vibration velocity distribution of SAW excited by pulse wave . . . . .	101
4.46	Vibration velocity distribution of large-size transducer driven by pulse wave	101
4.47	Control system of SAW tactile display using pulse wave driving . . . . .	102
4.48	Large-size SAW tactile display and pulse amplifier . . . . .	102
4.49	Internal configuration of pulse amplifier . . . . .	103
4.50	Experimental configuration for measuring pen velocity using large-size tactile display . . . . .	103
4.51	Pen velocity ( $k_r=500\mu\text{m}$ , $d=20\%$ , driven by pulse wave) . . . . .	104
5.1	Control system of tactile and haptic device using PHANToM Omni . . .	107
5.2	Integration of SAW tactile display and PHANToM Omni . . . . .	107
5.3	Closeup of stylus and attachment as slider . . . . .	108
5.4	3D virtual space for operating PHANToM . . . . .	108
5.5	Generating different sensations . . . . .	109
5.6	Experimental configuration for measuring stylus velocity . . . . .	110
5.7	Stylus velocity ( $k_r=200\mu\text{m}$ , $d=20\%$ ) . . . . .	110
5.8	Braille display (amedia Braille SENSE OnHand from amedia's website[125])	115
5.9	Braille keyboard (Knowledge Creation Blekki from Knowledge Creation's website[126]) . . . . .	116
5.10	Perkins braille (KGS Perkins Braille from KGS's website[127]) . . . . .	116
5.11	Demonstration of pen tablet type SAW tactile display for blind persons .	118
5.12	Demonstration of tactile display using sheet-type ultrasonic transducer for blind persons . . . . .	118
A.1	Bit stream of TDCTP 1.0 . . . . .	148
A.2	Bit stream of TDCTP 1.1 (add randomization switch) . . . . .	149
A.3	Demonstration software for tactile display . . . . .	151

A.4	Flowchart of demonstration software . . . . .	151
A.5	Tactile demonstration software covering whole LCD . . . . .	158
A.6	Algorithm to determine if a circle contains a point . . . . .	168
A.7	Algorithm to determine if a line intersect with second line . . . . .	168
A.8	Algorithm to determine if a triangle contains a point . . . . .	169
A.9	Modified algorithm to determine if a triangle contains a point . . . . .	169
A.10	Algorithm to determine if a polygon contains a point . . . . .	170
A.11	Tactile demonstration software running on determination mode . . . . .	171
A.12	Paint software for generating drawing sensation . . . . .	173
A.13	Paint software for generating drawing sensation with texture image . . . . .	174
A.14	Measurement of roughness $k_r$ on the texture image . . . . .	175
A.15	Binalization of full-color image . . . . .	177
A.16	Coordinate system for graphics APIs . . . . .	184
B.1	Connection diagram of SAW tactile display using glass substrate . . . . .	192
B.2	Connection diagram of pen tablet type SAW tactile display . . . . .	194
B.3	Structures of felt nib and slider nibs . . . . .	197
C.1	Circuit diagram of high-side switching using IR2110 . . . . .	201
C.2	Circuit layout of high-side switching using IR2110 . . . . .	201
C.3	Circuit diagram of half-bridge switching using IR2110 . . . . .	204
C.4	Circuit layout of half-bridge switching using IR2110 . . . . .	205
C.5	Circuit diagram of full-bridge switching using IR2110 . . . . .	207
C.6	Circuit layout of full-bridge switching using IR2110 . . . . .	208
C.7	Experimental circuit diagram of dead-time generation . . . . .	210
C.8	Pulse-wave and reversed pulse-wave with dead-time . . . . .	210
C.9	Oscillator using 7414 logic IC . . . . .	211
C.10	Oscillator using 7414 logic IC . . . . .	212
C.11	Oscillator using LTC6900 . . . . .	212
C.12	Circuit diagram for rectification and smoothing . . . . .	213
D.1	Computer desktop . . . . .	216
D.2	VR workspace operated by Falcon . . . . .	217
D.3	Discrimination experiment to a subject . . . . .	218

## 表目次

3.1	Parameters for second-order effect[29][30][31] . . . . .	21
3.2	Specification of ARF448 . . . . .	25
3.3	Specification of IR2110 . . . . .	25
3.4	Specification of STD3NM60 . . . . .	32
4.1	Specification of electrodes . . . . .	67
4.2	Specification of Wacom DTI-520 U Model[66] . . . . .	68
4.3	Parameters of panels . . . . .	70
4.4	Distribution of subjects . . . . .	71
4.5	Specification of Wacom Cintiq 12WX[66] . . . . .	73
4.6	Mesh size (#12 – #220) from JIS R 6010[90] . . . . .	77
4.7	Particle size (#240 – #1200) from JIS R 6010[90] . . . . .	78
4.8	Particle size (#1500 – #2500, by precipitation test) from JIS R 6010[90]	78
4.9	Particle size (#1500 – #2500, by electric resistance test) from JIS R 6010[90]	78
4.10	Parameters of panels (discrimination experiment for control method re- ferring to MLS) . . . . .	89
4.11	Distribution of subjects (discrimination experiment for control method referring to MLS) . . . . .	89
5.1	Specification of SensAble PHANToM Omni[104] . . . . .	106
C.1	Electric components in high-side switching circuit . . . . .	200
C.2	Electric components in half-bridge switching circuit . . . . .	203
C.3	Electric components in full-bridge switching circuit . . . . .	209
D.1	Specification of Novint falcon[134] . . . . .	215

# 第 1 章

## 序論

### 1.1 研究背景

人間には五感に代表されるような様々な感覚がある。五感とは古来からの感覚分類であり、聴覚・視覚・触覚・味覚・嗅覚の五つを指す。現代ではそれ以外にも数多くの感覚が広く認められており、情報の内容や伝達様式など様々な分類方法がある。人間の感覚は主に「特殊感覚」と「体性感覚」とに大別することができる。特別な感覚器が存在するものを特殊感覚 (specific sensation) と呼び、眼球を用いる視覚や鼻を用いる嗅覚等がこれにあたる。一方、体性感覚 (somatic sensation) とは感覚器が外部に明確に露出していないものを指す。体性感覚には皮膚に由来する皮膚感覚 (tactile sensation) と体の内部の筋や腱に由来する固有受容感覚 (proprioception) とに分類される。この体性感覚全体が広い意味で触覚と呼ばれている。

現在我々の生活には感覚を提示するデバイスがとても身近なものとなっている。これらのデバイスのほとんどは視覚及び聴覚を提示するデバイスである。視覚を提示する代表的なデバイスとして、Fig. 1.1 に示すようにブラウン管 (cathode ray tube: CRT) や液晶ディスプレイ (liquid crystal display: LCD) がある。また聴覚を提示するデバイスにはスピーカやヘッドフォン等がある。これに対し、バーチャルリアリティ (virtual reality: VR) やロボットの遠隔操作の分野において、体性感覚の提示・再現による臨場感や使用感の向上について研究がなされている。しかしながら、視覚・聴覚以外の感覚を提示するデバイスははまだ研究段階であり、既存の提示デバイスに比べて完成度は追いついていない。触覚を提示するデバイスについても様々な研究が行われ、特に固有受容感覚 (運動感覚・力覚) に関するデバイスは近年製品化されたものもいくつかある。しかしながら、皮膚感覚の提示を目的としたデバイスは提示可能な感覚に得手・不得手を持つ一長一短なデバイスがほとんどであり、既存の視覚・聴覚の提示デバイスと同程度の完成度を持つ皮膚感覚提示デバイスは存在しない。

これまで皮膚感覚を提示するデバイスとして、弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイが開発されている。このデバイスは超音波の一種である弾性表面波を利用する。弾性表面波は振動エネルギーのほとんどが媒質表面に分布するため、弾性表面波振動子は一般に薄く構成する



Fig. 1.1 Presentation devices

ことができ、裏面での支持が容易である。加えて、駆動周波数が数 MHz と高いため応答の高速なデバイスの実現が可能である。これまでの弾性表面波皮膚感覚ディスプレイに関する研究はインターフェースとしての応用が中心であった。また、励振システムが高コストとなる問題があった。本研究では皮膚感覚ディスプレイを改善し、より実用性の高いデバイスとするため主に以下の項目について研究を行った。

- ・ パルス波による弾性表面波の励振の実現と評価、皮膚感覚ディスプレイへの実装
- ・ 周波数スペクトルへの着目による皮膚感覚ディスプレイの提示感覚の改善
- ・ 皮膚感覚ディスプレイの力覚提示との併用と視覚障害者への応用の検討

## 1.2 研究目的

本研究は、触覚の中でも超音波の一種である弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイに着目する。皮膚感覚ディスプレイの実用性向上を目的とし、ディスプレイのシステムの簡易化及び制御方法の改善を行う。

弾性表面波振動子において、励振システムのコスト問題の解決のため新たな弾性表面波の励振・伝播方法を提案する。提案した励振方法を用いてアクチュエータとして適用可能かを検証し、弾性表面波の励振システムの低コスト化を図る。

また、皮膚感覚ディスプレイによって提示される感覚についてこれまでディスプレイの体験者から不自然であるという感想が得られていた。これについて、新たに不自然さを解消するための制御方法を検討・提案する。提案した制御方法を用いて自然な感覚が提示可能かどうか、実際に皮膚感覚ディスプレイに実装し検証を行う。

加えて、皮膚感覚ディスプレイの実用性を高めるため、皮膚感覚と力覚との融合を行う。また、皮膚感覚ディスプレイの応用として、視覚障害者へ応用が可能かどうか検討を行う。

## 1.3 論文構成

本論文は、全6章から構成される。第1章では研究の背景、目的について述べた。

第2章「弾性表面波」では、弾性表面波について説明し、振動子の製作方法と弾性表面波の励振・伝播について述べる。さらに、弾性表面波の応用デバイスとして、信号処理デバイス、センサ、アクチュエータについて述べる。

第3章「弾性表面波励振システムの簡易化」では、パルス波を用いた弾性表面波の励振方法について述べる。はじめ、従来の正弦波を用いた弾性表面波の励振方法の問題点について延べる。次に、問題を解決するためのパルス波を用いた弾性表面波の励振方法の原理について説明する。そして、パルス波を用いた励振方法が実現可能かどうかシミュレーションを行う。高電圧のパルス波を印加するためのアンプシステムについて具体的に説明し、動作の確認を行う。提案した方法で励振・伝播される弾性表面波について検証を行う。提案した方法と従来の方法について比較し、有効性の確認を行う。

第4章「弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの改善」では、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの実用性の向上について述べる。はじめに、皮膚感覚の仕組みについて概説し、近年の触覚ディスプレイの動向について述べる。次に、近年普及の進むタッチパネルについて述べる。ペンタブレット型の皮膚感覚ディスプレイについて製作し、指だけでなくペンを用いて粗さ感・書き味の提示が行えることを示す。また、感覚提示実験を行い、ディスプレイの評価を行う。次に、皮膚感覚ディスプレイの体験者より得られた「不自然な感覚」について原因の検証を行い、解決方法の検討を行う。制御方法の変更により自然な感覚の提示を実現し、ディスプレイの実用性向上を実現する。最後に、第3章にて述べたパルス波を用いた弾性表面波の励振方法を実装し、市販の大面積のタッチパネルに適用可能な大面積の皮膚感覚ディスプレイの実現を目指す。

第5章「皮膚感覚ディスプレイの応用」では、皮膚感覚ディスプレイの応用範囲の拡大を目指し、力覚提示デバイスとの融合を行う。また、皮膚感覚ディスプレイの応用として、視覚障害者向け補助デバイスを提案し、検討を行う。

第6章「結論」では本研究により得られた成果についてまとめ、今後の課題を述べる。



## 第 2 章

### 弾性表面波

第 2 章では，弾性表面波について述べる．弾性表面波の励振方法や弾性表面波デバイスについて説明する．

#### 2.1 弾性表面波

弾性表面波 (surface acoustic wave: SAW) とは，弾性体の表面に沿って伝播する波である．弾性表面波の中でも代表的なものが，1885 年に Lord Rayleigh によって理論的に導出されたレイリー波 (Rayleigh wave) である．弾性表面波の存在は初め地震学の分野において発見され，その後圧電素子による励振が考案された．現在，圧電素子上における弾性表面波を用いた弾性表面波フィルタ (後述) が携帯電話等の移動体通信デバイスに広く用いられている．

##### 2.1.1 弾性表面波の励振

弾性表面波の励振には，圧電体を用いる方法が簡易かつ一般的である．圧電体とは，圧電効果を持つ物体のことである．圧電効果とは，圧力を加えると分極して電圧が発生する現象であり，一方，電界を印加すると変形する現象は逆圧電効果と呼ばれる．弾性表面波の励振には，このうち逆圧電効果が用いられている．

圧電媒質におけるレイリー波の励振には交差指電極 (interdigital transducer: IDT) が用いられる．通常，弾性表面波トランスデューサといえば，特に断りのない限りこの IDT のことを指す．ここでは，圧電材料に IDT を形成してレイリー波を励振・伝播する方法を述べる．IDT の一例を Fig. 2.1 に示す．1 対が 2 本の電極により構成され，周期長および交差指幅が電極全体にわたって均一の電極をシングル電極の正規型 IDT という．正規型 IDT では周期長がレイリー波の波長に等しくなる．Fig. 2.2 に示すように，圧電材料基板表面に IDT を形成し交流電圧を印加することで，容易にレイリー波を励振することができる．また，伝播したレイリー波を IDT により電気信号に変換することもできる．

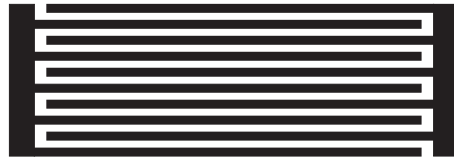


Fig. 2.1 Interdigital transducer

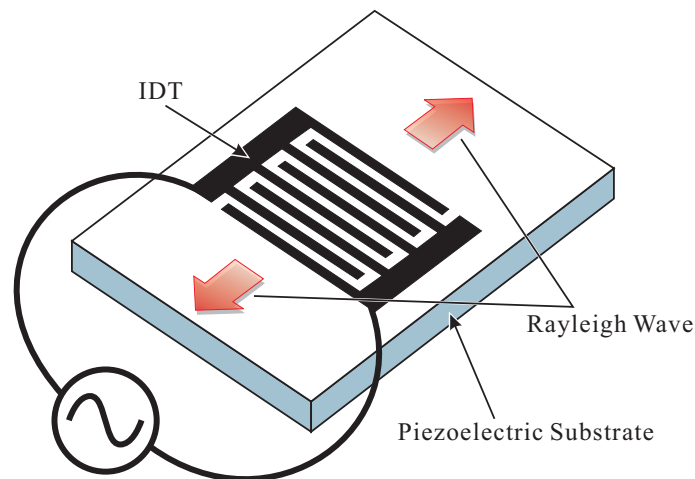


Fig. 2.2 Excitation of Rayleigh wave

### 2.1.2 弾性表面波の反射

弾性表面波を反射する方法として、様々な反射器が検討されている [1]。反射器は弾性表面波デバイスのうち特に共振器に用いられている。代表的な反射器として、短絡型メタルストリップアレイ (short metal strip array: SMSA)[2]、開放型メタルストリップアレイ (open metal strip array: OMSA)[3]、溝型反射器 (grooved array)、誘電体ストリップアレイ (dielectric strip array)、イオン打込みアレイ (ion-implanted array)、メタル拡散ストリップアレイ (metal diffusion array) 等がある。また、励振及び検波に用いる IDT も条件によっては反射器として働く [1]。これらの反射器について、解析や反射特性の検討がこれまでに行われている [1]-[4]。

反射器として、メタルストリップアレイ (SMSA 及び OMSA) が製作も簡単であるため最もよく用いられている。SMSA を Fig. 2.3 に、OMSA を Fig. 2.4 に示す。Fig. 2.5 に示すように反射器を基板表面に形成することで、伝播したレイリー波を反射することが可能である。

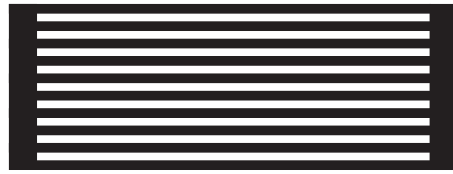


Fig. 2.3 Short metal strip array

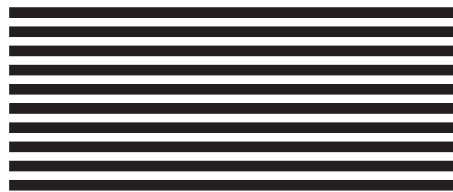


Fig. 2.4 Open metal strip array

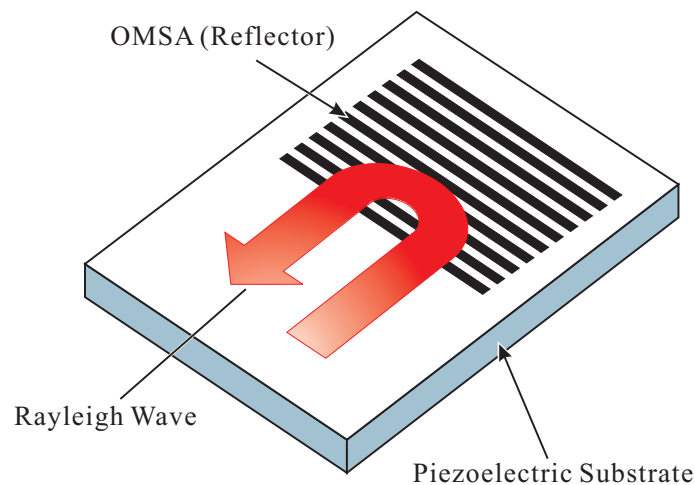


Fig. 2.5 Reflection of Rayleigh wave

### 2.1.3 弾性表面波励振に用いる圧電材料

本研究では、圧電材料基板としてニオブ酸リチウム (lithium niobate/LN:  $\text{LiNbO}_3$ ) を使用する。この材料は圧電単結晶材料であり、電気機械結合係数が高く、温度特性に優れるため、弾性表面波デバイス材料として広く用いられている。ここで、電気機械結合係数とは電気エネルギーと機械エネルギーとの変換効率の目安であり、圧電効果の大きさを表す量の一つである。 $\text{LiNbO}_3$  の結晶はチョクラルスキー法 (Czochralski 法, Cz 法) に代表される回転引き上げ法によって育成される。この方法はルツボ内に原料を溶融し、小さな角棒状の種子結晶を融液に浸し、微速で回転させながら上方に引き上げるにより育成する [5]。ルツボの加熱に

は高周波誘導加熱等が用いられる．育成されたインゴットをワイヤーカッターにより薄くスライスし，これを磨くことでウェハーが得られる．この方法は半導体ゲルマニウムやシリコン単結晶等，半導体製造技術として急速に発展した技術であり，タンタル酸リチウム ( $\text{LiTaO}_3$ ) に代表される他の圧電単結晶材料に関しても同様の製造方法が適用される．複合酸化物単結晶の引き上げにはシリコン単結晶の引き上げと比べて成長速度が極めて遅く，長尺化は技術的に困難といわれている．このため，現実的な価格で入手可能なウェハーは 4 インチサイズが限度であると考えられる．

#### 2.1.4 IDT の形成

弾性表面波デバイスの開発において，目的とする周波数を持つレイリー波を励振するためには，IDT の共振周波数を合わせる必要がある．IDT の形成には集積回路と同様のフォトリソグラフィプロセスを用いる．予め目的とする金属膜パターンをガラスマスク表面に描画し，このパターンを基板表面に形成する．これまでに目的とする弾性表面波デバイスのモデル化及び IDT の設計パラメータを調整する方法が検討されており，本研究ではこれらを参考とした IDT を用いた．

フォトリソグラフィ (photolithography) とは，感光性の物質を塗布した物質の表面をあるパターン状に露光することにより，露光された部分とされていない部分からなるパターンを生成する技術である．半導体の製造やプリント基板の製造に利用されており，本研究においてニオブ酸リチウム基板及びガラス基板上に電極 (IDT) を形成するために用いている．電極形成の手順を以下に示す．

- (1) 基板を超純水，アセトン (acetone)，イソプロピルアルコール (isopropyl alcohol: IPA) で超音波洗浄する．
- (2) 基板表面にクロム (chromium: Cr) を  $0.01\mu\text{m}$  程度蒸着する．
- (3) 基板表面にアルミニウム (aluminum: Al) を  $0.3\mu\text{m}$  程度蒸着する．
- (4) 蒸着された金属膜上にフォトレジストをスピコートする．
- (5) 目的の電極形状のガラスマスクにより露光，現像をする．
- (6) ウェットエッチングにより金属膜をそれぞれ取り除く．
- (7) 必要に応じて基板を切り出す．

ここで，手順 (2) は  $\text{LiNbO}_3$  基板上に直接 Al を蒸着しにくいいため，中間材として予め Cr の蒸着を行う．

## 2.2 弾性表面波デバイス

交差指電極 (interdigital transducer: IDT) の導入及び圧電効果の大きな  $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{LiTaO}_3$  の発見, そしてこれら圧電材料の生成法の確立により, 圧電基板上での弾性表面波の送受信が容易なものとなった. IDT を圧電媒体に形成することで, 電気信号から弾性表面波を励振して送信, あるいは弾性表面波を電気信号として受信することができる. 弾性表面波デバイスには以下のような利点がある.

- ・ 基板表面から深さ方向の一波長以内で 90% 以上のエネルギーが集中しているため, 波の制御 (励振・検出・導波・反射) を基板表面で行うことができ, 薄型のデバイス構成とすることができる.
- ・ 弾性表面波の伝播速度は数千 m/s であり, 電磁波と比べて遅いため計測が容易で数 10MHz ~ 数 GHz の周波数で小型高機能なデバイスを実現しやすい.
- ・ 振動エネルギーが表面に集中するため光波や半導体中のキャリアとの相互作用を生じやすく, またエネルギー密度が大きいため非線形効果を利用しやすい.
- ・ 半導体と同じフォトリソグラフィ技術を適用して製造可能であり, モノリシック化, 量産が容易である.
- ・ 保持が容易であり, 耐震性・耐衝撃性に優れたデバイスを実現できる.

これら様々な利点を活かし, フィルタや共振器等の信号処理デバイスが開発されている. 弾性表面波を利用した信号処理デバイスは携帯電話等の移動体通信の他, CATV (common antenna television) や地上デジタル等の放送, 光通信や無線 LAN (local area network) 等の有線・無線通信といった様々な用途向けに製品化されている. また, 近年はこの他にも光学素子, デイレイライン, コンボルバ, センサ, アクチュエータ等への応用が進められている [6][7].

### 2.2.1 信号処理デバイス

#### 2.2.1.1 フィルタ [6]

圧電体上に IDT を形成し, 特定周波数帯域の信号を取り出す素子である. IDT の構造周期と圧電体や電極の物性により, 中心周波数や帯域を決めることができる. 弾性表面波フィルタは次のような特徴を持つ.

- ・ 小型・軽量である.
- ・ 耐振性・耐衝撃性に優れる.
- ・ 製品のばらつきが少なく, 信頼性に富む.
- ・ 回路の無調整化による実装の簡略化が図れる.

弾性表面波フィルタは近年の携帯電話等の小型電子機器に適用されている。

#### 2.2.1.2 共振子

IDT により励振した弾性表面波の伝播方向に反射器を取り付けることで共振を起こすことができる。この特性を利用したものが弾性表面波共振子であり、IDT を 1 つだけ用いる 1-port 共振子や、IDT を 2 つ用いて入力・出力端子を持つ 2-port 共振子等がある [6]。

#### 2.2.1.3 デイレイライン

弾性表面波の伝播速度は電磁波と比較して遅いため、信号処理等において遅延時間を得るために用いられる [6]。また、弾性表面波は基板表面を伝播するため、弾性表面波デイレイラインは伝播途上による励振、受信、タッピングといった自由なアクセスが可能であり、バルク波を用いたデイレイラインと比べて機能の付加が可能である。

#### 2.2.1.4 コンボルバ

弾性表面波はエネルギー密度が高く、非線形効果を得やすいという特徴を持つ。非線形効果とは以下のようなものを指す。

- ・ 高調波発生
- ・ パラメトリックミキシング効果
- ・ コンボリューション効果
- ・ パラメトリック発振
- ・ 直流効果

このうちコンボリューション効果を用いたものがコンボルバである。弾性表面波コンボルバでは形成した IDT から励振・伝播した表面波の周波数の 2 倍の周波数信号を取り出すことができる [6]。コンボルバはスペクトラム拡散通信 (spread spectrum communication: SSC) 等の通信システムや信号処理へ用いることができる。圧電体の弾性的非線形効果を用いたエラストックコンボルバと半導体の非線形性を用いた半導体型コンボルバがあり、半導体型コンボルバは高効率動作が期待できる [8]。

### 2.2.2 センサ

弾性表面波の伝播面及び伝播面と接する媒質に物理的・化学的変化が生じると弾性表面波の歪みや媒質の圧電特性等に影響を及ぼし、伝播速度や振幅等の特性に変化が生じる。この特性変化を利用した様々なセンサが提案されており、ガスセンサやフローセンサ、歪みの測定やタッチセンサ等に利用されている [7]。

### 2.2.3 アクチュエータ

弾性表面波デバイスは小電力で小型・軽量に構成可能なことから信号処理デバイスとしての利用が主であるが、近年、アクチュエータとしての検討・提案もなされている。代表的なものに弾性表面波霧化器や超音波溶着器、弾性表面波モータや後述する弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ等がある。

#### 2.2.3.1 弾性表面波リニアモータ

弾性表面波リニアモータは、摩擦を介して駆動力を得る超音波モータの一種である [9][10]。弾性表面波リニアモータは薄型構成とすることができ、これまでに大推力 (10 N)[11]、大速度 (1.5 m/s 以上)[12]、高精度 (数 nm)[13] が実現されている。弾性表面波の高い周波数を活かし、駆動周波数を 100 MHz に高めることでモータの小型化が試みられている [14]。駆動の高効率化を目指し、エネルギー循環型の弾性表面波モータも提案されている [15][16]。また、回転型の弾性表面波モータも開発されている [17]。

#### 2.2.3.2 弾性表面波霧化器

液体を微粒化し、霧化する装置のことを霧化器というが、超音波振動を用いる霧化方法がこれまでに研究されている。この超音波に弾性表面波を用いるものが弾性表面波霧化器であり、弾性表面波リニアモータと同じく霧化器を薄型かつ高い駆動周波数にできる利点を持つ [18]。これまでにマイクロタンパクチップの製造用に提案され、静電気力との複合応用が検討されている [19] ほか、振動子の高周波化 [20] や定在波の検討 [21] が行われている。

## 第 3 章

# 弾性表面波励振システムの簡易化

第 3 章では，パルス波による弾性表面波の励振について，原理及びシミュレーション，回路構成，励振確認実験，励振効率について述べる．

### 3.1 パルスによる弾性表面波の励振

#### 3.1.1 目的

これまで，弾性表面波の励振には IDT への正弦波交流電圧の印加を必要としていた．弾性表面波を用いたアクチュエータにおいて，振動子を複数用いる構成となることが多い．特に後述する皮膚感覚ディスプレイにおいては多数の振動子を用いることでディスプレイの大面积化を行う．正弦波交流電圧により弾性表面波振動子を駆動するには，高価な高周波発振器および高周波増幅器を用いる．ここで，多数の振動子を使用する構成において，振動子の個数分の高周波発振器および高周波増幅器が必要となる．このため，装置構成が非常に高価かつ複雑なものとなり，非現実的である．これは弾性表面波デバイスを産業応用する上で解決すべき課題の一つであり，より簡易な励振方法が望まれる．本研究では新たな弾性表面波励振方法として，発振器・増幅器を安価かつ簡易な構成とすることが可能なパルス波による励振方法の提案を行った．

#### 3.1.2 原理

パルス波による弾性表面波の励振原理を Fig. 3.1 に示す．Fig. 3.1 は弾性表面波振動子の断面図であり，圧電基板の表面に IDT が形成され，配線されている．ここで，Fig. 3.2 上段に示すような IDT にパルス電圧が印加された瞬間を考える．パルスの急峻な立ち上がりの瞬間，圧電基板には電界が生じる．この電界により，圧電基板内部には応力分布が生じる．図中の電極 1 及び電極 3 は正，電極 2 及び電極 4 は負に印加される．それぞれの電極について着



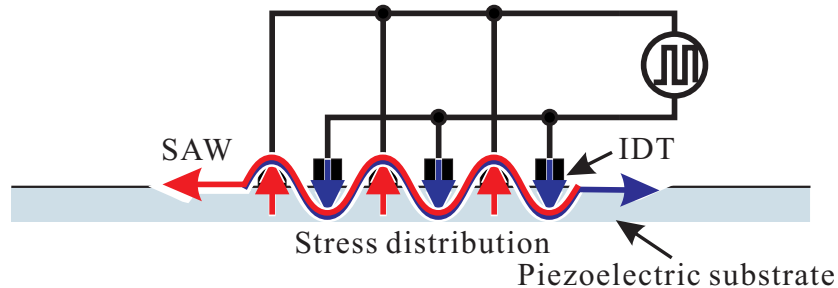


Fig. 3.1 SAW excitation by pulse wave

目すると 2 次遅れ系とみなすことができ、減衰振動を生ずる。このときの振動は弾性表面波のモードに結合し、結果として圧電基板表面には弾性表面波の進行波が励振される。観測点からそれぞれの電極までの距離を  $d_1, d_2, d_3, d_4$  とすると、それぞれの電極から生じた振動は観測点において図中下段の左のように時間差の生じたものとなる。これらの振動が線形結合し、図中下段の右側に示すような振動となる。このとき、励振される弾性表面波の波数は IDT の交差指対数と等しくなる。これはパルスの立ち下がり時についても同様である。パルスの立ち下がり的一瞬间には電極 1 及び電極 3 は負、電極 2 及び電極 4 は正に印加され、位相が反転した弾性表面波が励振される。

### 3.1.3 パルスによる弾性表面波の連続波の励振原理

前述のように、パルスの立ち上がり時および立ち下がり時において、IDT の周期構造を用いて交差指対数と等しい波数の弾性表面波を励振することができる。ここで、立ち上がり時に励振された弾性表面波に立ち下がり時に励振された弾性表面波を繋げることで、弾性表面波の連続波を励振することができる。このためにはパルス波の周波数を適切に決定する必要がある。パルス波により弾性表面波の連続波を励振するとき、パルス波の周波数は以下ようになる。

$$f_p = \frac{f_n}{2N - 1} \quad (3.1)$$

ここで、 $f_p$  はパルス波の周波数、 $f_n$  は設計した振動子の共振周波数、 $N$  は IDT の交差指対数である。仮に IDT の交差指対数が 3 対のときの連続波の励振の様子を Fig. 3.3 に示す。立ち上がり時に励振された弾性表面波に立ち下がり時に励振された弾性表面波を繋げるためには、立ち下がり的一瞬间を  $180^\circ$  だけ位相を進める必要がある。共振周波数が 9.60 MHz、IDT の交差指対数が 20 対の振動子を使用した場合、1 回のパルス立ち上がりと立ち下がりにより 20 波の弾性表面波が励振され、(3.1) 式より連続波を励振する際のパルス波の周波数はおよそ 246 kHz となる。

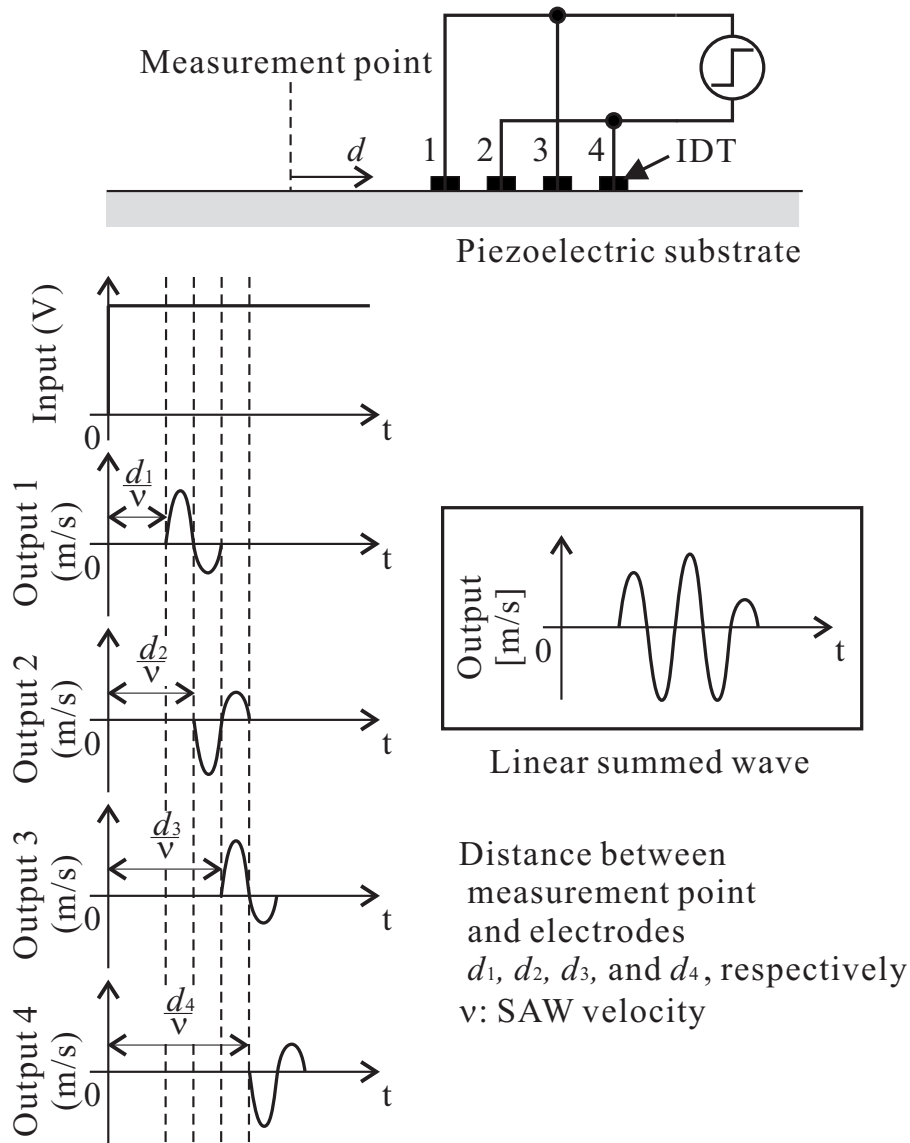


Fig. 3.2 Principle of SAW excitation by pulse wave

### 3.2 パルスによる弾性表面波励振のシミュレーション

IDTの周期構造を用いて、パルス波の立ち上がり・立ち下がりにより弾性表面波が励振可能かどうかを確認するため、IDTの等価回路モデルに対してシミュレーションを行った。これまで、様々な研究者によりIDTの等価回路モデルのシミュレーションが提案されている。まず、本項では弾性表面波の励振のシミュレーションについて挙げる。

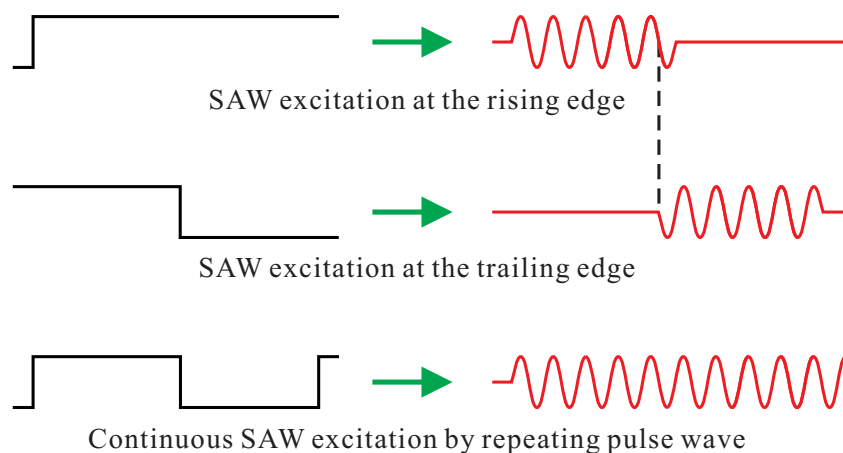


Fig. 3.3 Continuous SAW excitation by pulse waves

### 3.2.1 Mason の等価回路モデルを用いたシミュレーション

Bhattacharyya ら, Munshi らにより, Mason の等価回路モデルを用いたシミュレーションが行われている [22][23]. シミュレーションには, 電子回路のアナログ動作をシミュレーションするソフトウェアである SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) が用いられている. Mason の等価回路を RLC のアナログ回路で表したネットワークとしたものに対し, 交流電圧を印加したときの弾性表面波の出力を SPICE によって得ている. しかしながら, この方法では交流電圧を印加したときの様子しか得ることができず, また等価回路モデルも限定的なものであることから, 本研究では次項に示す方法を参考に用いた.

### 3.2.2 Smith の等価回路モデルを用いたシミュレーション

Mason の等価回路モデルを, 弾性表面波素子に対してより適用しやすく改良したものが, Smith の等価回路モデルである. IDT の実際の動作では, 本質的な変換器としての動作に付随して種々の二次効果が発生するため, 等価回路の精度向上のためには二次効果の導入が必須となる [24]. Smith の等価回路モデル (1st Model) を拡張し, IDT の二次効果のうち電極指における反射について考慮したものが, Smith の 2nd Model である [25]. これらの等価回路モデルは Mason の等価回路モデルを基盤としているが, 高調波の解析に主眼を置いた Smith の 3rd Model については, Krimholtz の等価回路モデルを基盤としている. 児島らは, Smith の 2nd Model を元に, IDT の改良型等価回路モデルを提案している [26][27]. この等価回路モデルでは, IDT の二次効果のうちエネルギー蓄積効果と電界短絡効果による位相効果の考

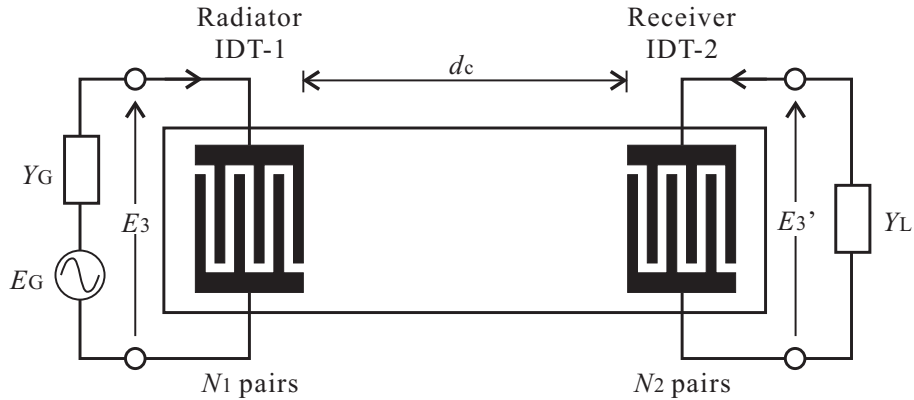


Fig. 3.4 A basic model of a SAW filter

慮がなされている．また，等価回路の有効範囲を基本波領域だけでなく高調波領域に拡張しており，基板の伝播損失とバルク波変換損失を考慮しているため，より高精度なシミュレーションについても可能となっている．これまで，改良型等価回路モデルを用いた IDT 及び SAW フィルタの周波数特性が導出されており，また導出された等価回路モデルの周波数特性に対して逆フーリエ変換 (逆 FFT) を行うことにより，IDT 及び SAW フィルタのインパルス応答を近似的に求めることが可能である [28]．本研究では，児島らによる IDT の改良型等価回路モデルを用いてシミュレーションを行い，IDT にパルス波の立ち上がりを印加した際の近似的応答を求めた．

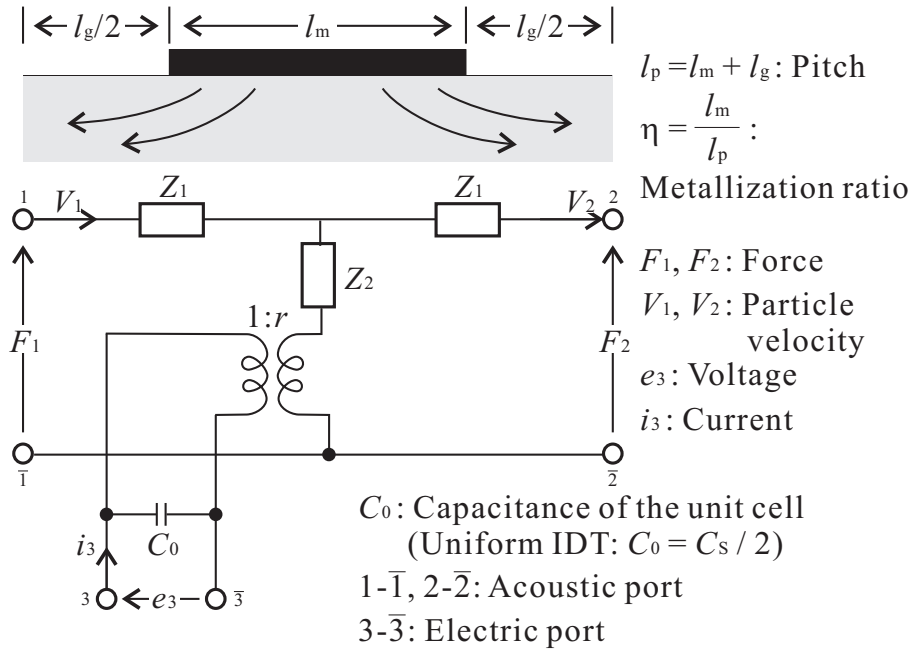
### 3.2.3 等価回路モデルと伝達関数

まず，基本となる SAW フィルタのモデルを Fig. 3.4 に示す．また，IDT の基本となる 1 対の交差指電極の等価回路モデルを Fig. 3.5 に示す．そして，SAW フィルタの等価回路モデルを Fig. 3.6 に示す．SAW フィルタは 2 つの正規型 IDT が圧電基板に対向して形成されており，IDT は  $N$  対 ( $N$  は整数とする) の交差指電極よりなるものとする．このとき，SAW フィルタモデルの伝達関数は，アドミタンスパラメータより求めることができる． $N$  対の IDT のアドミタンスパラメータ  $Y_{ij}$  は，全て電気単位 (Siemens) で表すと以下のように求められる．

$$Y_{11} = Y_{22} = G_0 F_s \coth 2N\gamma_s \quad (3.2)$$

$$Y_{12} = -G_0 F_s \operatorname{cosech} 2N\gamma_s \quad (3.3)$$

$$Y_{13} = -Y_{23} = -G_0 F_s \tanh \frac{\gamma_s}{2} \quad (3.4)$$



$$Z_1 = Z_{1s} \tanh \frac{\gamma_s}{2}, \quad Z_2 = Z_{1s} \operatorname{cosech} \gamma_s$$

$$Z_{1s} = \frac{1}{Y_{1s}}, \quad Y_{1s} = Y_0 F_s \quad (F_s, \gamma_s: \text{Image parameters})$$

Fig. 3.5 Equivalent circuit model for IDT unit cell

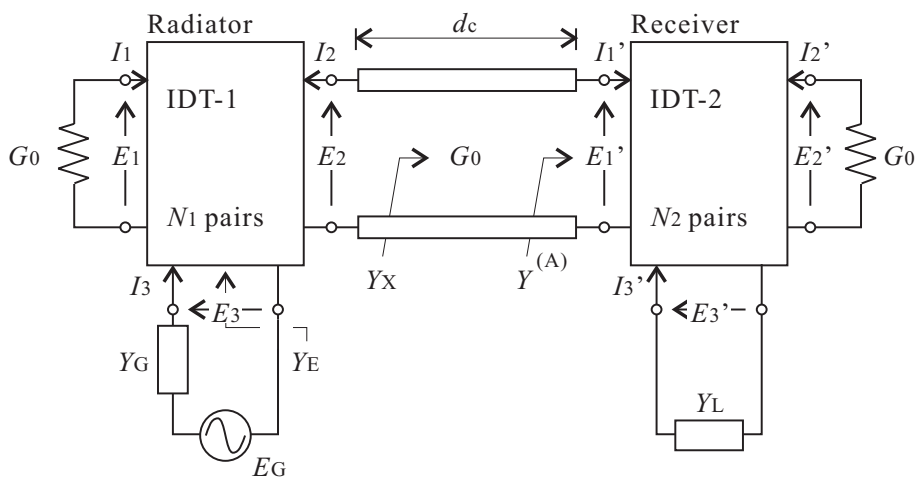


Fig. 3.6 Equivalent circuit for the SAW filter

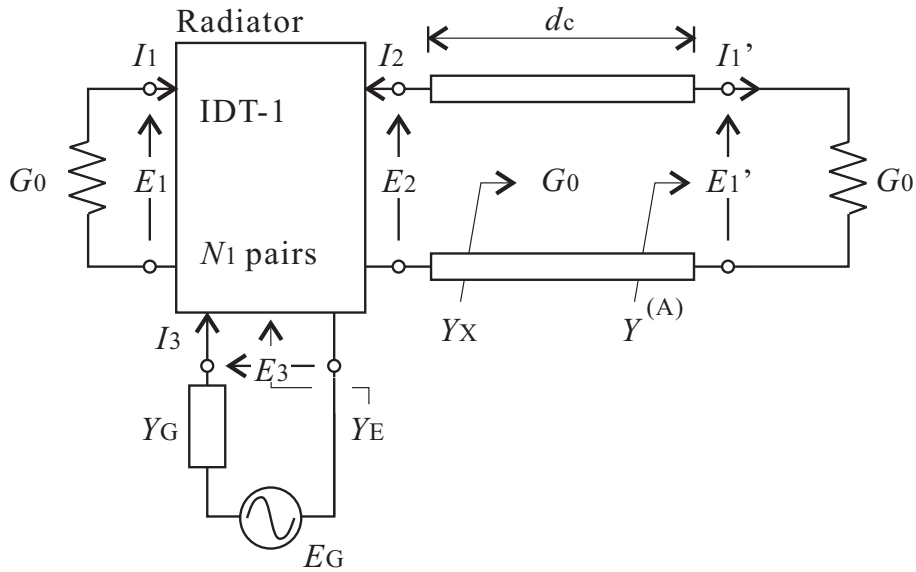


Fig. 3.7 Equivalent circuit for a single SAW transducer with a transmission line

$$Y_{33} = j\omega C_T + G_0 4N F_s \tanh \frac{\gamma_s}{2} \quad (3.5)$$

ここで、 $G_0$  は特性アドミタンス、 $C_T$  は  $N$  対の IDT のキャパシタンスである。 $F_s$  は正規化映像アドミタンス、 $\gamma_s$  は映像伝送定数である。これらは映像パラメータと呼ばれるもので、IDT の二次効果の影響は全て映像パラメータに含まれる。IDT の二次効果のパラメータには、速度比  $\tau_v$ 、不連続定数  $\tau$ 、規格化位相サセプタンス  $b_s$  があり、これらの値について小柴らが詳細に調査している [29][30][31]。

アドミタンスパラメータより、送波側 IDT の伝達関数  $A_{23}$ 、受波側 IDT の伝達関数  $A_{31}$ 、伝送路の特性  $A_{12}$  について、それぞれ求めることができる。ここで、実際の弾性表面波振動子の等価回路モデルを考える。弾性表面波振動子は圧電基板上に 1 つの送波側 IDT と伝送路のみを持つ構成のため、SAW フィルタの等価回路モデルから受波側 IDT の代わりに特性アドミタンスを繋げたものと考えることができる。これは言い換えると、SAW フィルタの等価回路モデルの伝達関数における受波側 IDT のアドミタンス  $y^{(A)} (= \frac{Y^{(A)}}{G_0}) = 1$  とすることで、弾性表面波振動子の等価回路モデルの伝達関数と等しくなることを示す。弾性表面波振動子の等価回路モデルを Fig. 3.7 に示す。弾性表面波振動子の等価回路モデル全体の伝達関数を  $A_t$  とすると、送波側 IDT の伝達関数  $A_{23}$ 、伝送路の特性  $A_{12}$ 、全体の伝達関数  $A_t$  は以下のようになる。

$$A_{23} = \frac{E_2}{E_3} = -\frac{\tanh \frac{\gamma_s}{2}}{1 + F_s \coth N_1 \gamma_s} \quad (3.6)$$

$$A_{12} = \frac{E'_1}{E_2} = \frac{1}{\cosh\gamma_0 d_c + \sinh\gamma_0 d_c} \quad (3.7)$$

$$A_t = A_{23} A_{12} \quad (3.8)$$

ここで、 $N_1$  は送波側 IDT の交差指電極の対数である。  $\gamma_0$  は伝播定数であり、 $d_c$  は送波側 IDT から観測点までの距離である。このとき、信号源インピーダンスが無視できる ( $E_3 = E_G$ ) とすると、電流  $I'$  (すなわち、弾性表面波による媒質中の音速と等価である) は、次の式で表される。

$$I'_1 = G_0 E'_1 = G_0 A_{12} A_{23} E_3 \quad (3.9)$$

### 3.2.4 インパルス応答のシミュレーション

前項にて得られた弾性表面波振動子の等価回路モデルの伝達関数より導出された周波数特性に対して逆 FFT を行うことにより、弾性表面波振動子の等価回路モデルのインパルス応答を近似的に得ることができる [28]。本項では、周波数領域を基本波 (0 から中心周波数の 2 倍の周波数まで) の領域に限定し、シミュレーションを行った。IDT のパラメータは、中心周波数を 9.60 MHz とし、交差指対数は 20 対、メタライゼーションレシオは 0.5 とした。IDT は  $\text{LiNbO}_3(128^\circ\text{Y-X})$  基板上に形成されているものとし、物性値を決定した。IDT の二次効果のパラメータ ( $\tau_v, \tau, b_s$ ) は、小柴らの調査結果より以下の Table 3.1 の数値を用いた [29][30][31]。ここで、 $\tau_v = 1, \tau = 1, b_s = 0$  とすると、Smith の 1st Model の結果を求めることができる。伝播による減衰は無視できるものとし、金属膜下の減衰定数  $\alpha_m = 0$ 、自由表面における減衰定数  $\alpha_0 = 0$  とした [27]。また、バルク波への変換も生じないものとする。IDT の伝達特性のシミュレーション結果を Fig. 3.8 と Fig. 3.10 に示す。Fig. 3.8 はパラメータを Smith の 1st Model と等しくした場合、Fig. 3.10 は二次効果を考慮した場合である。それぞれの結果のグラフにおいて、上のグラフは周波数領域の特性 (位相は省略) を、下のグラフは時間領域の特性を示している。また、Fig. 3.8 と Fig. 3.10 の周波数領域特性の中心周波数付近を拡大したものを Fig. 3.9 と Fig. 3.11 に示す。周波数領域特性を見ると、Smith の 1st Model ではピークの周波数が設定した中心周波数の値である 9.60MHz と等しくなっているが、二次効果を考慮した場合においてわずかに減少し 9.4MHz 付近となっていることが分かる。これは自由表面と金属膜下の速度比  $\tau_v$  の影響であると考えられる。また、時間領域について見ると、Smith の 1st Model では IDT の交差指対数分の 20 波の波が励振されているのに対し、二次効果を考慮した場合において残留振動が見られる。この残留振動は、不連続係数  $\tau$  によるインピーダンス不整合の影響と考えられる。得られたインパルス応答は媒質中の音速

Table 3.1 Parameters for second-order effect[29][30][31]

$\tau_v$	1.02838
$\tau$	1.0178
$b_s$	0.0241

と等価であると考えられるため，応答波形に振幅のゆらぎは見られるものの，基板表面に弾性表面波が励振できるものと考えられる．

次に，パルス波を繰り返し印加することによる弾性表面波の連続波の励振について検討する．まず，時間領域特性は，パルス波の立ち上がりにより励振される弾性表面波の波形とすることができる．また，時間領域特性を時間軸で反転させることで，パルス波の立ち下がりにより励振される弾性表面波の波形とすることができる．このため，パルス波の連続波を印加した場合について，時間領域特性と反転させた特性とを組み合わせることでシミュレーションが可能であると考えられる．IDT の交差指数が 20 対であることから，パルス波の連続波の周波数は (3.1) 式 より 246kHz ，すなわちパルス幅 (パルスの立ち上がりから立ち下がりまでの時間) は  $2.03\mu\text{s}$  とする．時間領域特性により求めた弾性表面波の連続波の波形を Fig. 3.12 に示す．これより，波形にはパルスの切り替え周波数と等しい周波数のうなりが生じることがわかる．

### 3.3 パルスによる弾性表面波励振の実現

#### 3.3.1 FET スイッチング回路

高電圧パルス を IDT に印加するためのスイッチング回路を，FET(field effect transistor) を用いて製作した．製作した FET スイッチング回路の回路図を Fig. 3.13 に，回路の写真を Fig. 3.14 に示す．FET には応答が高速な RF(radio frequency) 用の MOSFET である Advanced Power Technology 社 (現 Microsemi 社) の ARF448 を使い，ハーフブリッジ構成とした．ゲートドライブ回路には汎用ハーフブリッジドライバ IC である International Rectifier 社の IR2110 を用いた．ARF448 の仕様 (抜粋) を Table 3.2 に，IR2110 の仕様 (抜粋) を Table 3.3 に示す．ゲートドライブ回路は FET を駆動するためのレベルシフト及びバッファとしての機能を果たす．また，この回路ではブートストラップ回路によってハイサイド側の FET を ON にする．



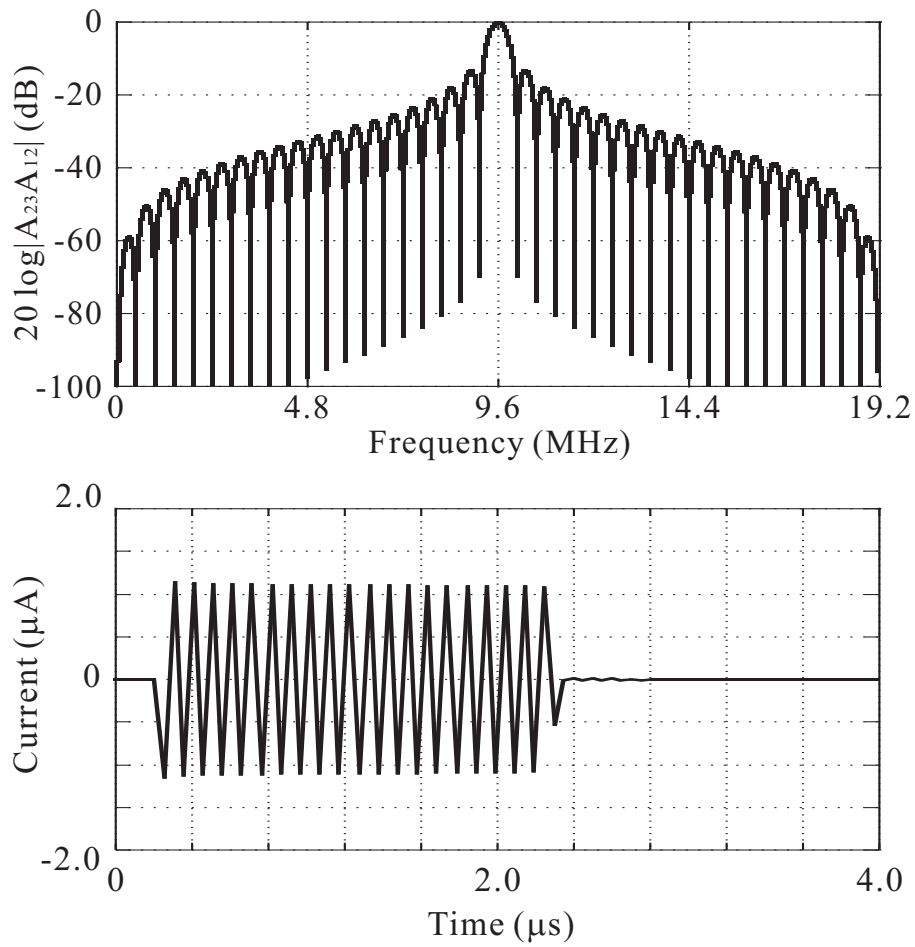


Fig. 3.8 Frequency and time response of Smith's equivalent circuit (1st model)

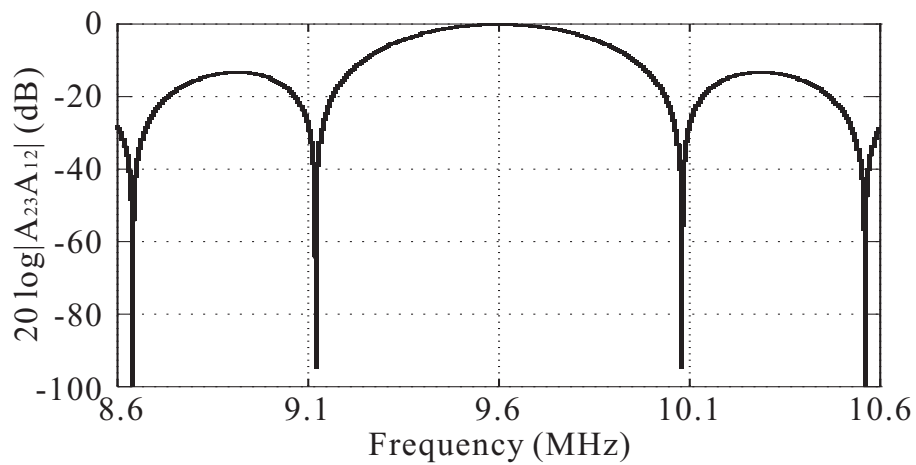


Fig. 3.9 Closeup of frequency response of Smith's equivalent circuit (1st model)

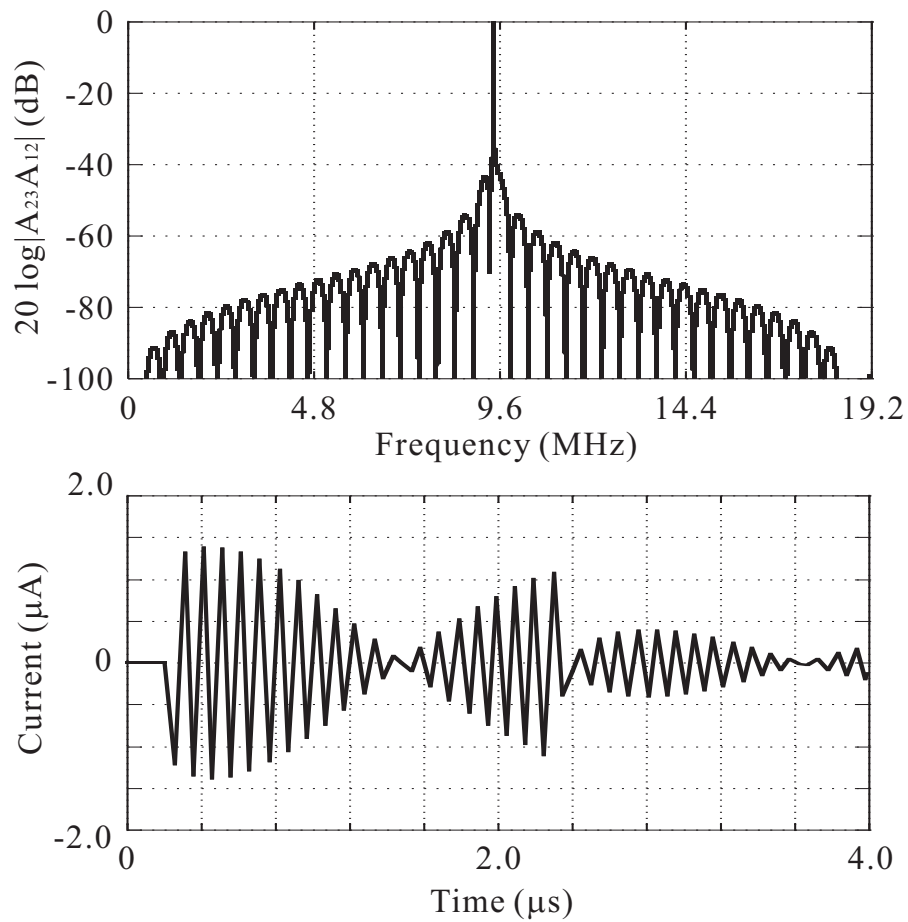


Fig. 3.10 Frequency and time response of improved equivalent circuit considering second-order effects

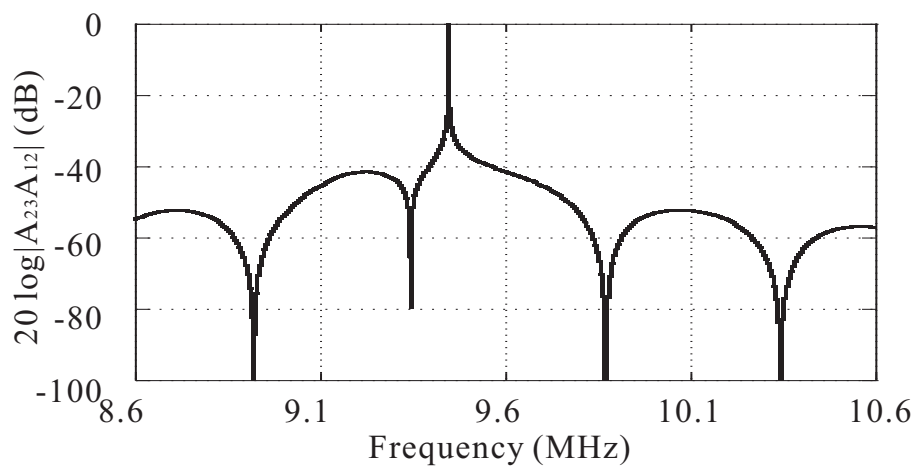


Fig. 3.11 Closeup of frequency response of improved equivalent circuit considering second-order effects

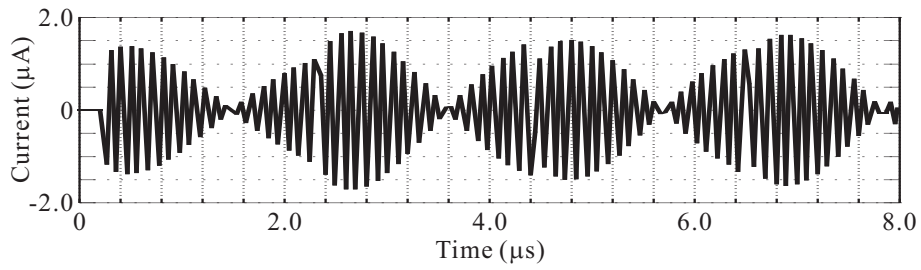


Fig. 3.12 Continuous SAW approximated by time-domain characteristics

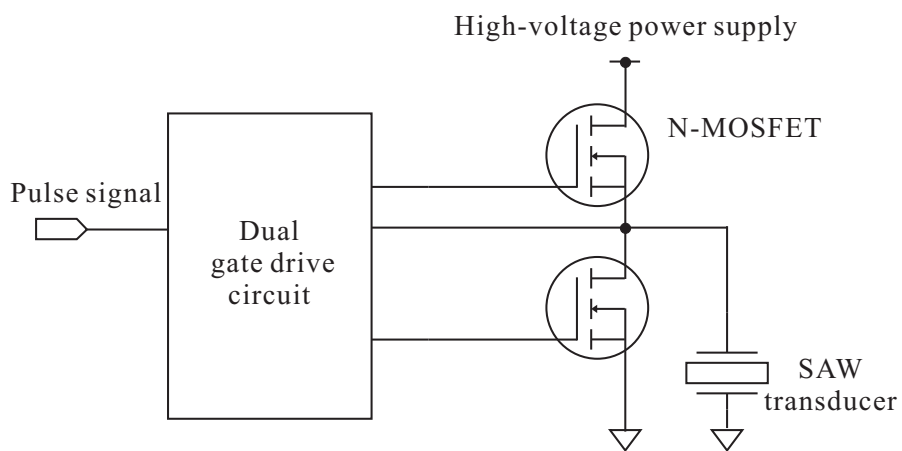


Fig. 3.13 Circuit diagram of FET driving circuit (half-bridge configuration)

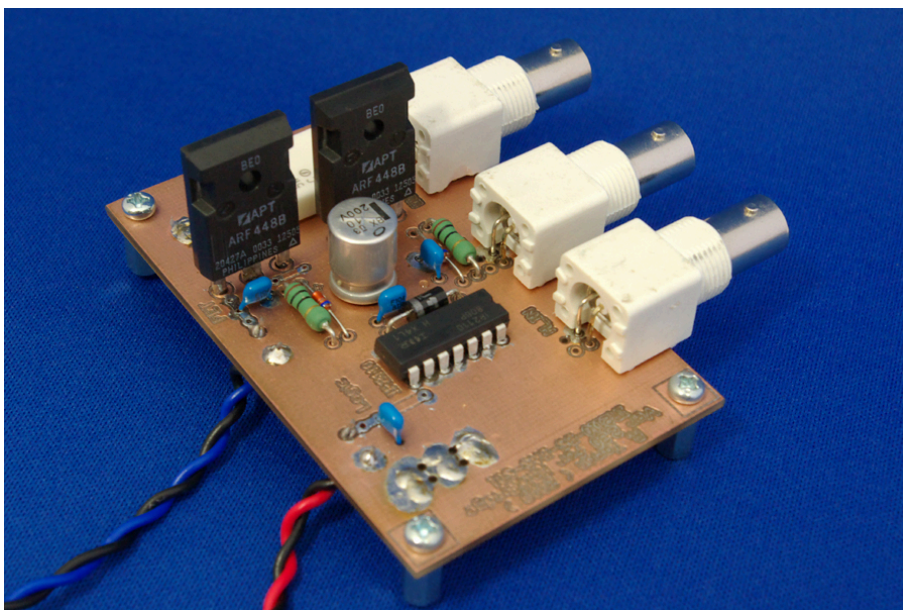


Fig. 3.14 FET driving circuit (half-bridge configuration)

Table 3.2 Specification of ARF448

$V_{DSS}$	450 [V]
$C_{iss}(\text{max.})$	1700 [pF]
$t_r(\text{max.})$	10 [ns]
$t_f(\text{max.})$	25 [ns]

Table 3.3 Specification of IR2110

$t_{on}(\text{max.})$	150 [ns]
$t_{off}(\text{max.})$	125 [ns]
$t_r(\text{max.})$	35 [ns]
$t_f(\text{max.})$	25 [ns]

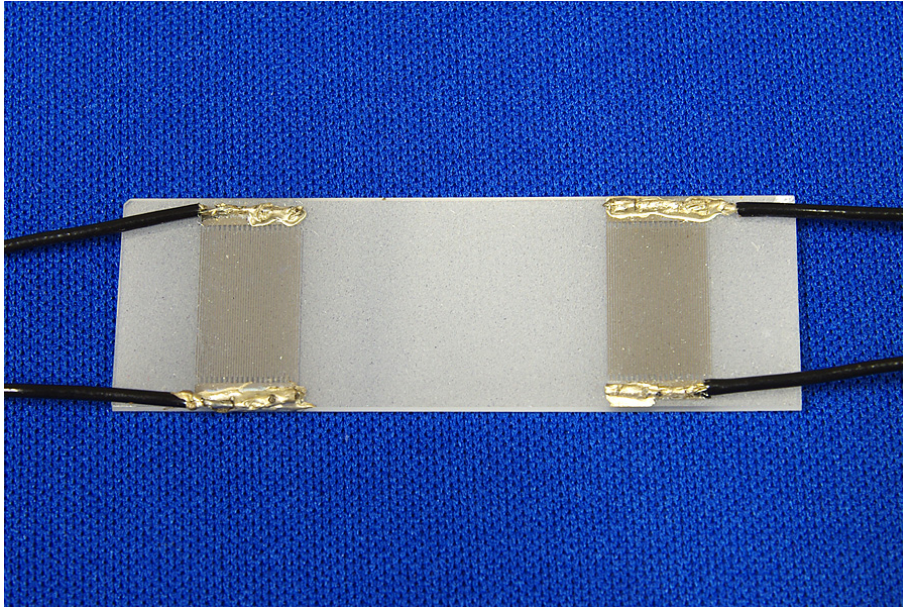


Fig. 3.15 SAW transducer

### 3.3.2 励振実験に使用した弾性表面波振動子

励振実験に使用した振動子を Fig. 3.15 に示す．振動子基板には 1.0mm 厚の  $\text{LiNbO}_3(128^\circ\text{Y-X})$  を用いた．基板表面には共振周波数 9.60MHz，交差指対数が 20 対の IDT が形成されている．基板表面には両側に IDT が形成されているが，片側の IDT に対してのみパルスの印加を行った．基板端面及びもう片側の IDT による反射を防ぐため，基板端面の表面及び基板中央表面には吸音材を塗布した．吸音材には木工用ボンドを用いた．吸音材を塗布した状態における振動子の電気的特性を Fig. 3.16 に示す．測定にはインピーダンスアナライザ (Agilent 4294A) を使用した．

### 3.3.3 基板表面の振動速度の測定 (ハーフブリッジ回路)

製作した回路を用いて IDT に高電圧パルスを印加し，実際に弾性表面波が励振可能か予備実験を行った．実験構成を Fig. 3.17 に示す．IDT への印加電圧は 75V とし，基板表面の振動はレーザードップラー振動計 (小野測器 LV-1710 LV-0160) により測定した．測定点は IDT 端から 1.0mm 離れた点とした．また，測定にはオシロスコープ (Tektronix TDS3014B) を用い，512 回の平均化を行った．実験結果を Fig. 3.18 に示す．図中の赤線が基板表面の振動速度であり，青線が IDT に印加された電圧，緑線が制御用のパルス信号である．図より，パルスの立ち上がりによって基板表面が振動したことがわかる．

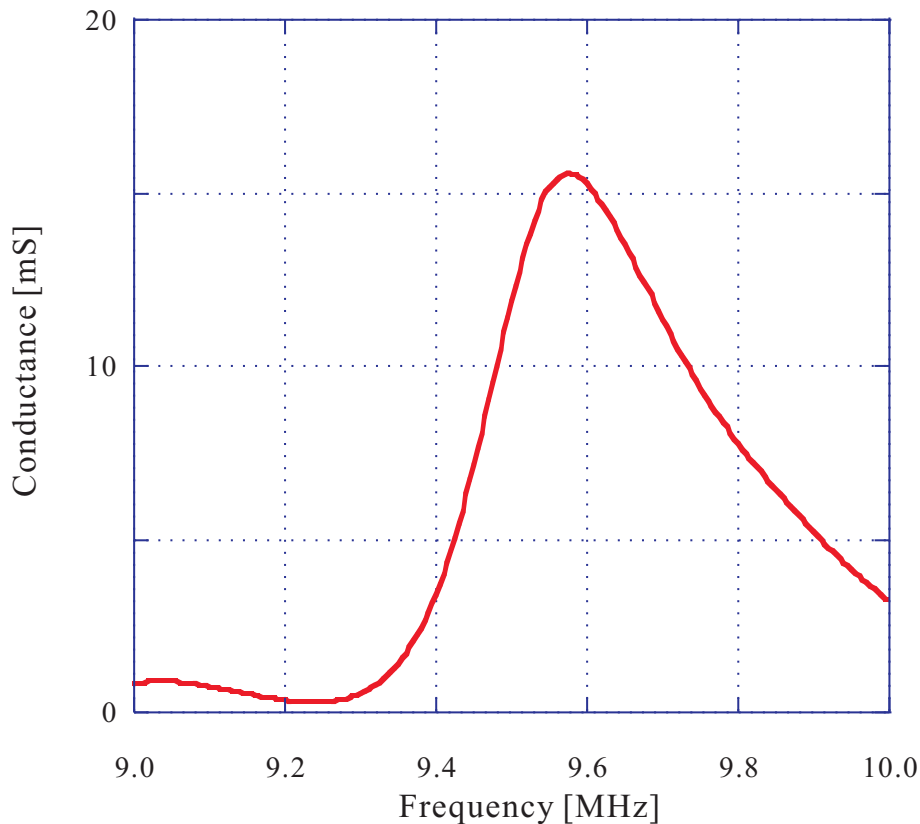


Fig. 3.16 Electrical characteristics of SAW transducer

同様の構成において測定点を IDT から 1.0mm 離れた点を基準とし、2.0mm 離れた点、3.0mm 離れた点と遠ざけて測定した際の実験結果を Fig. 3.19–Fig. 3.21 に示す。遠ざけると基板上の振動が遅れる様子が確認され、1.0 mmあたり 250ns の遅れが確認できた。ここで、使用した  $\text{LiNbO}_3(128^\circ\text{Y-X})$  における弾性表面波の音速は 3992m/s である [32]。得られた遅れから励振された振動における媒質中の音速を算出するとおよそ 4000m/s であり、これは上述の  $\text{LiNbO}_3$  における弾性表面波の音速とほぼ一致する。これにより、弾性表面波の進行波が励振されたことが確認された。また、励振された波の波数は 20 波であり、IDT の交差指対数と一致していることが確認された。振動速度はおよそ  $50\text{mm}/s_{p-p}$  であり、これは振幅に換算するとおよそ  $1.0\text{nm}_{p-p}$  である。ここで、最初に測定された振動速度、すなわちパルス電圧を印加した瞬間に生じる振動速度が最も大きく、その後の振動速度は減衰しているが、これは生じた波が IDT を通過する際にバルク波に変換され、減衰したためと考えられる。

次に、Fig. 3.18 の振動速度波形を FFT 解析したところ、Fig. 3.22 のような結果が得られた。図より、ピークの周波数はおよそ 9.60MHz であることが確認された。これらの結果より、パルス波の立ち上がりを用いて IDT の共振周波数である 9.60MHz の弾性表面波の進行波を励振できたことがわかる。しかしながら、弾性表面波デバイスへ適用するには振幅が不足



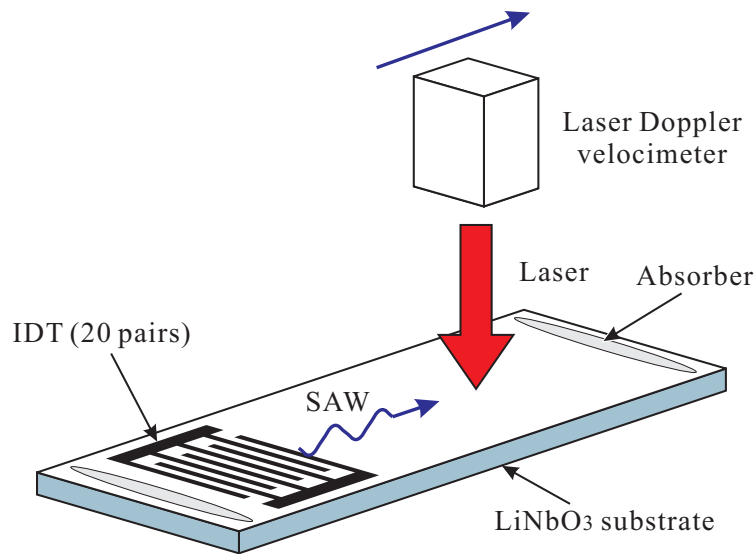


Fig. 3.17 Experimental configuration of measuring surface vibration

していると考えられる。

### 3.3.4 スイッチング回路の改良による印加電圧の改善

より高電圧のパルス(IDT)に印加するため、スイッチング回路の改良を行った。製作したFETスイッチング回路の回路図をFig. 3.23に、回路の写真をFig. 3.24に示す。3.3.1にて使用したRF用のMOSFETは大電力の高速スイッチングが可能であるが、FETの中では高価である。一方、本研究で用いるIDTはキャパシタンス負荷であることから、駆動に対してそれほどの大電力は必要なく、立ち上がり時間と立ち下がり時間が高速であれば問題はないと考えられる。そこでFETにより一般的なMOSFETであるSTMicroelectronics社のSTD3NM60を用い、高電圧の印加が行えるようにフルブリッジ構成とした。これにより素子の単価低減と高密度実装を可能とし、また電源電圧を変えずにスイッチング電圧を高めることができる。ゲートドライブ回路には3.3.1と同様に汎用ハーフブリッジドライバICであるInternational Rectifier社のIR2110を用いた。STD3NM60の仕様(抜粋)をTable 3.4に示す。回路をフルブリッジ構成とすることでFETが4つ、ハーフブリッジドライバICが2つ必要となり素子の個数が増加するが、印加電圧を逆転することができるためハーフブリッジ回路に比べて2倍の電位差を得ることができる。また、印加電圧を逆転する際の回路の短絡保護用に汎用ロジックを用いたデッドタイム生成回路を設けた。

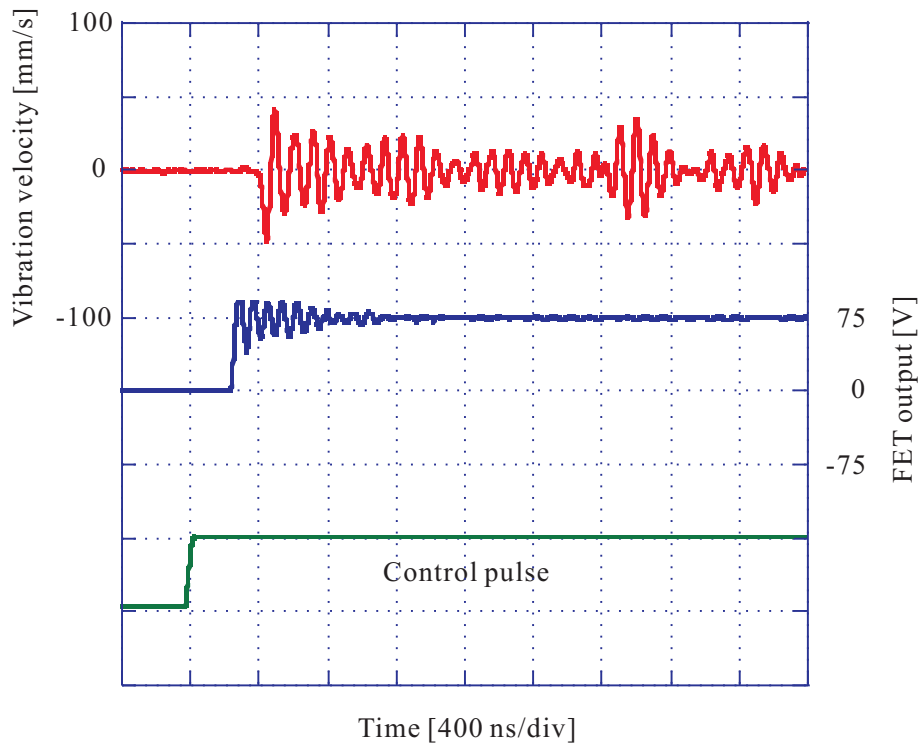


Fig. 3.18 Vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration)

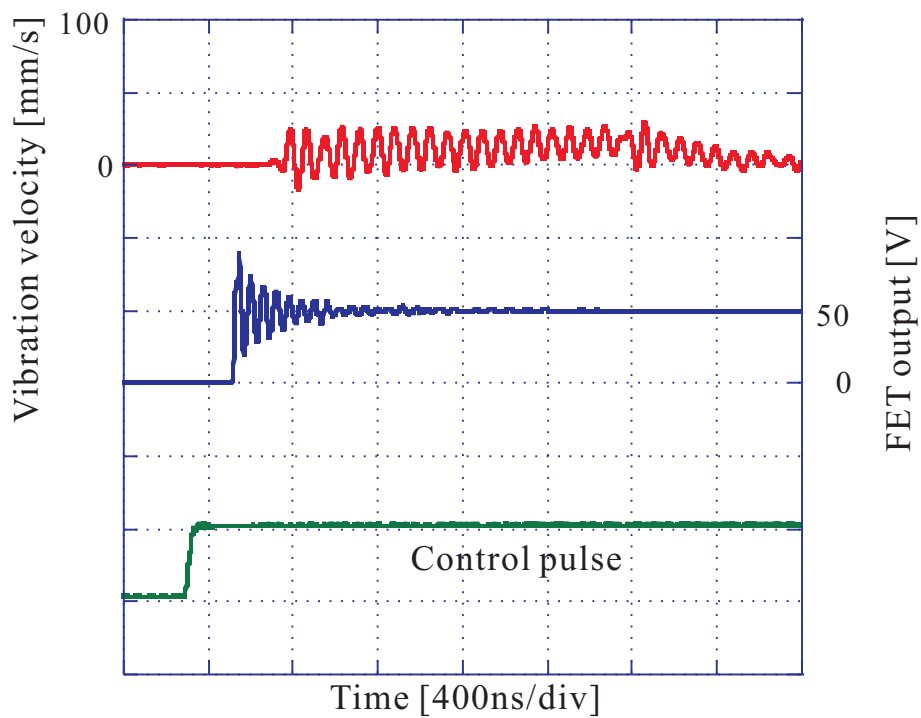


Fig. 3.19 Propagation of vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration, 1.0mm away from IDT)



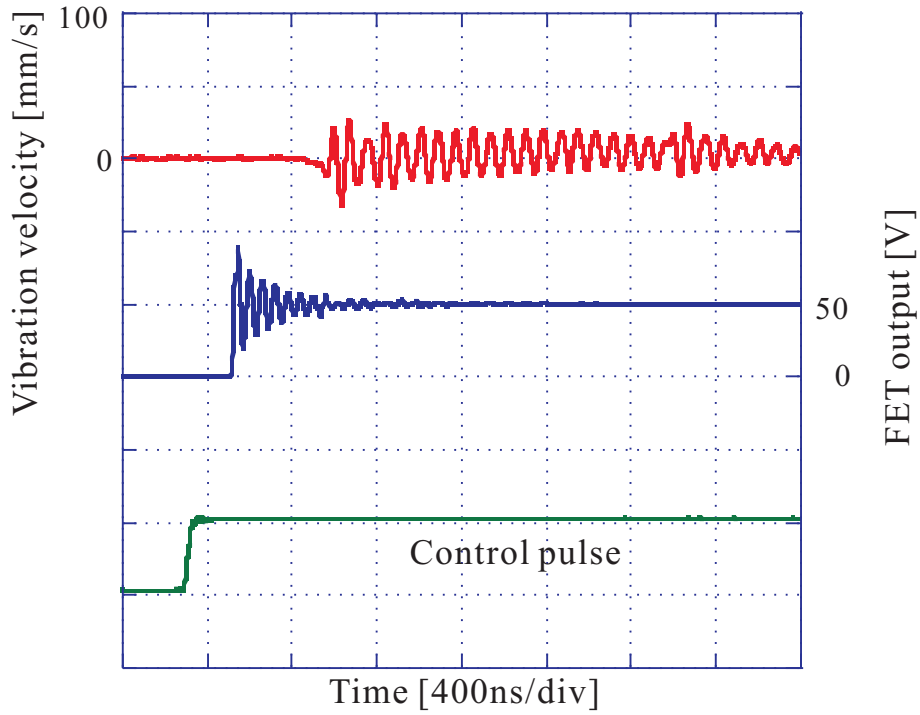


Fig. 3.20 Propagation of vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration, 2.0mm away from IDT)

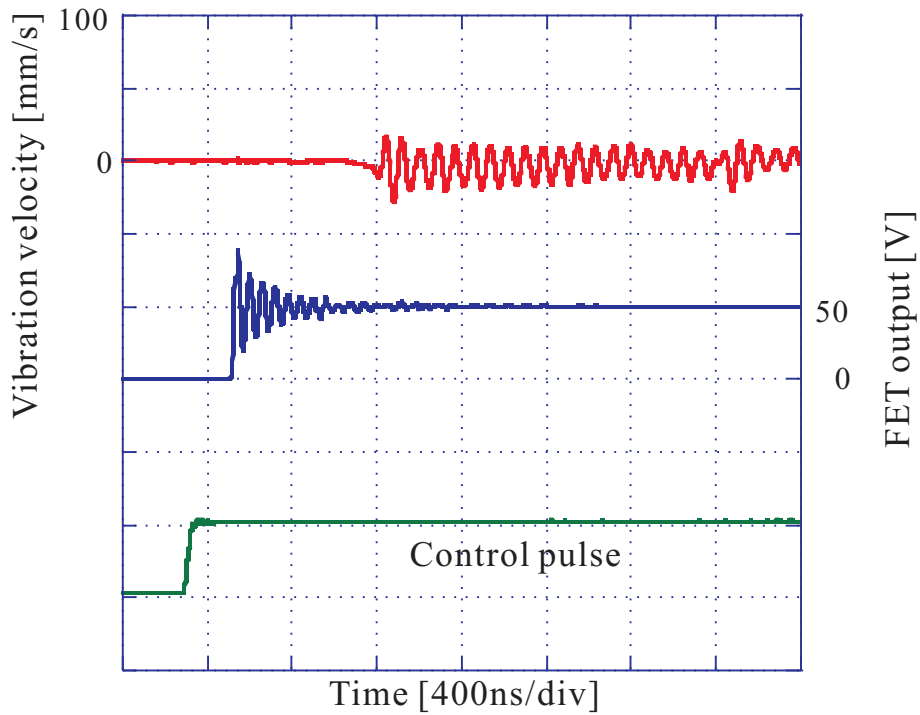


Fig. 3.21 Propagation of vibration velocity by pulse wave (half-bridge configuration, 3.0mm away from IDT)

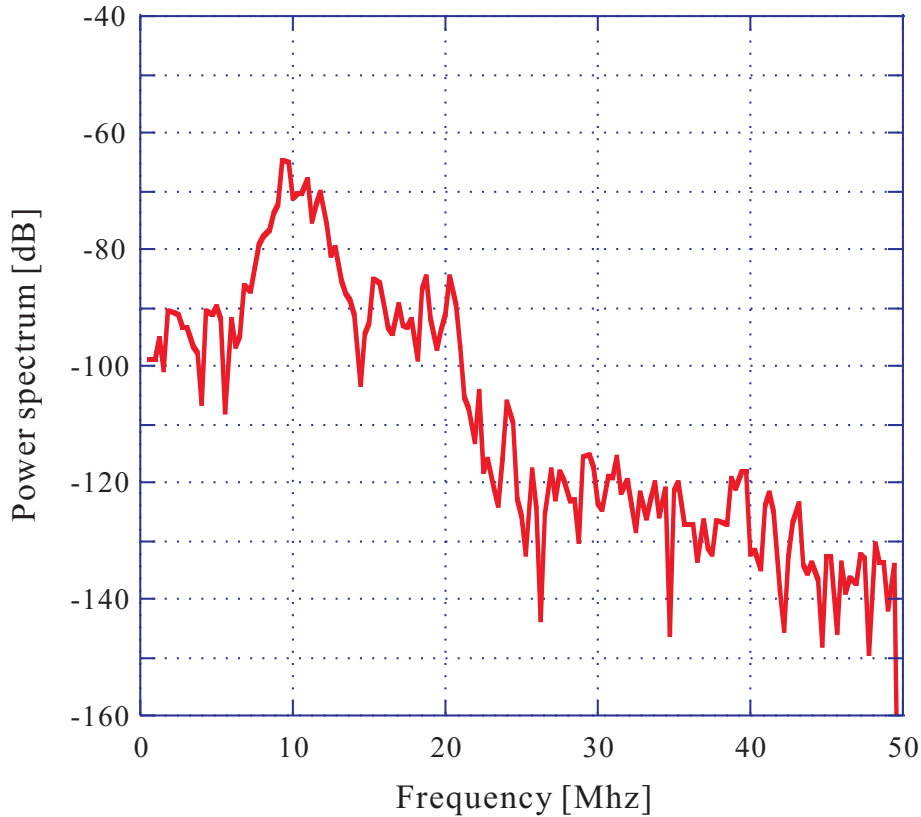


Fig. 3.22 FFT analysis result of vibration velocity (half-bridge configuration)

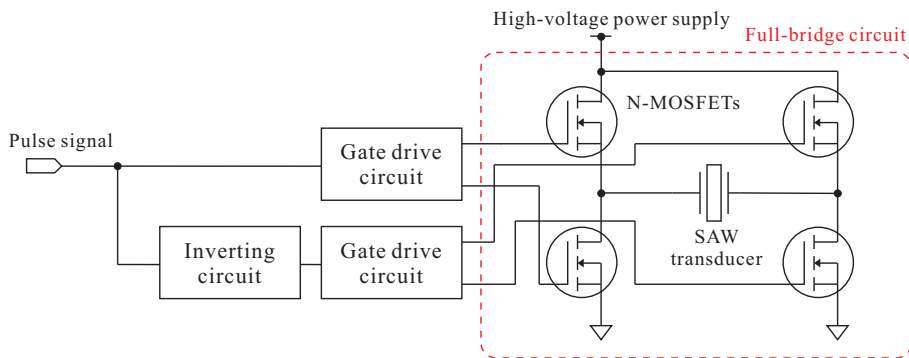


Fig. 3.23 Circuit diagram of FET driving circuit (full-bridge configuration)

### 3.3.5 基板表面の振動速度の測定 (フルブリッジ回路)

改良した回路を用いて IDT に高電圧パルスを印加し，弾性表面波の振幅がどのように変化したか予備実験を行った．実験構成は 3.3.3 と同じものとした．振動子基板には 1.0mm 厚の  $\text{LiNbO}_3(128^\circ\text{Y-X})$  を用いた．基板表面には共振周波数 9.60MHz，交差指対数が 20 対の IDT

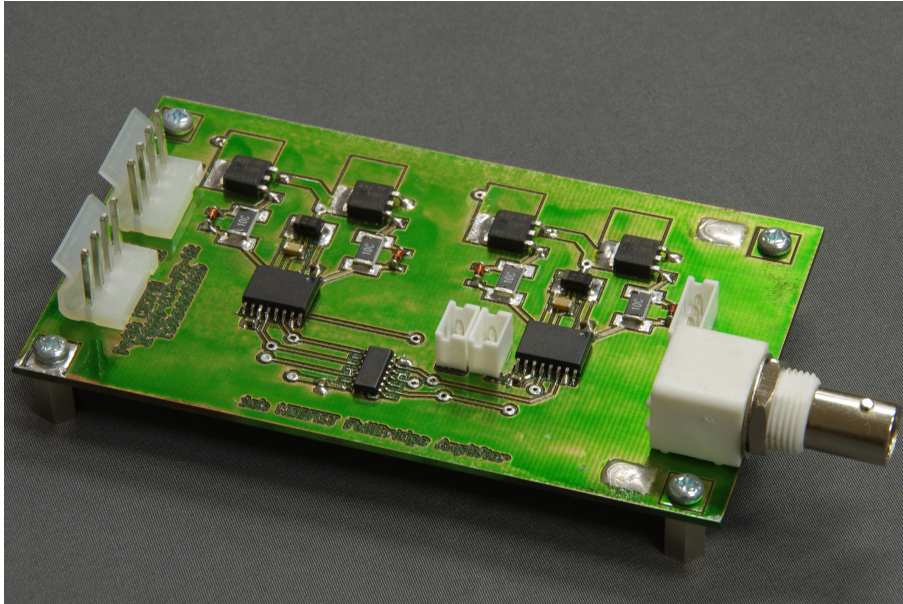


Fig. 3.24 FET driving circuit (full-bridge configuration)

Table 3.4 Specification of STD3NM60

$V_{DSS}$	650 [V]
$C_{iss}(\text{max.})$	324 [pF]
$t_r(\text{max.})$	4 [ns]
$t_f(\text{max.})$	10.5 [ns]

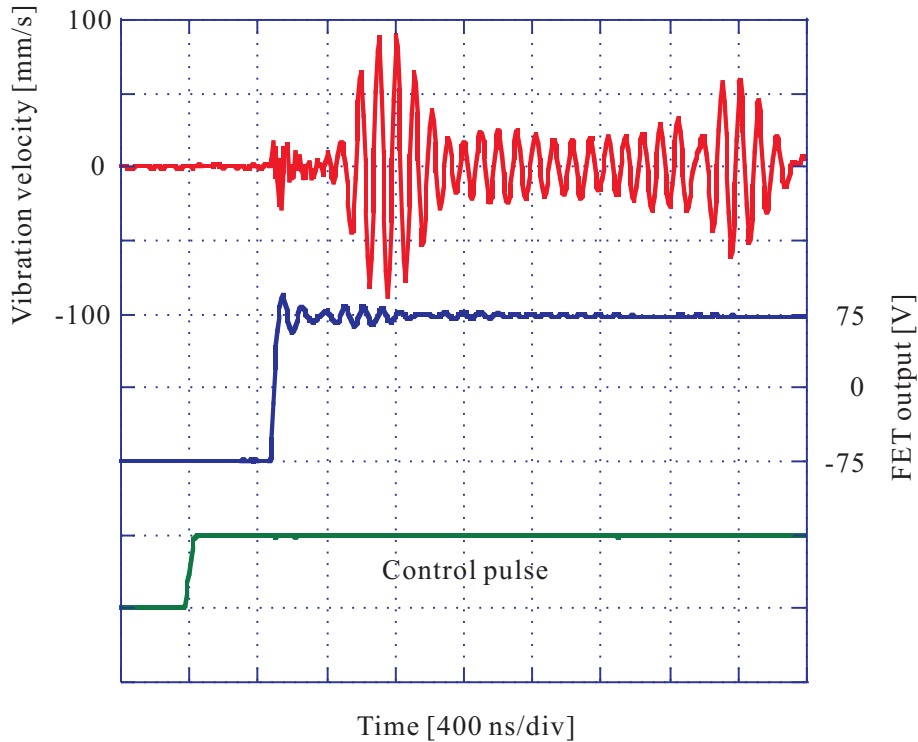


Fig. 3.25 Vibration velocity by pulse wave (full-bridge configuration)

が形成されている．高電圧源は 75V とし，基板表面の振動はレーザードップラー振動計（小野測器 LV-1710 LV-0160）により測定した．測定点は IDT 端から 1.0mm 離れた点とした．また，測定にはオシロスコープ（Tektronix TDS3014B）を用い，512 回の平均化を行った．実験結果を Fig. 3.25 に示す．図中の赤線が基板表面の振動速度であり，青線が IDT に印加された電圧，緑線が制御用のパルス信号である．図より，パルスの立ち上がりによって 3.3.3 と同様に基板表面が振動した様子がわかる．ここで，印加電圧が -75V から 75V まで 150V の電位差となっていることが確認できる．振動速度はおおよそ  $100\text{mm/s}_{p-p}$  であり，これは振幅に換算するとおおよそ  $2.0\text{nm}_{p-p}$  である．ハーフブリッジ構成の時と比べて印加電圧が 2 倍となったことで，得られた振動振幅もおおよそ 2 倍となった．

次に，Fig. 3.25 の振動速度波形を FFT 解析したところ，Fig. 3.26 のような結果が得られた．図より，ピークの周波数は同様におおよそ 9.60MHz であることが確認された．これらの結果より，パルス波の立ち上がりを用いて IDT の共振周波数である 9.60MHz の弾性表面波の進行波を励振できたことがわかる．また，この構成であれば弾性表面波デバイスへ適用するのに十分な振幅を得ることができると考えられる．

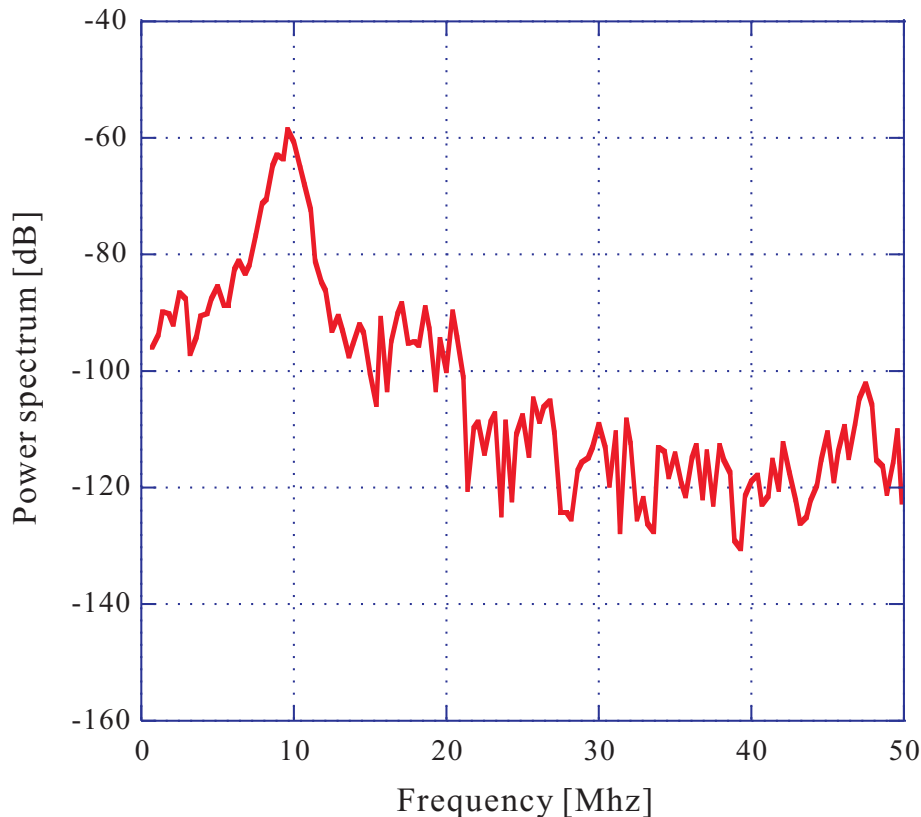


Fig. 3.26 FFT analysis result of vibration velocity (full-bridge configuration)

### 3.3.6 パルス波による弾性表面波の連続波の励振

次に、改良した回路を用いて、パルス波を連続して印加し、立ち上がりにより励振される弾性表面波と立ち下がりにより励振される弾性表面波を繋げ、弾性表面波の連続波を励振可能かどうか実験を行った。実験構成は3.3.5と同様とした。パルス波の周波数は(3.1)式よりIDTの交差指対数及び共振周波数から246kHzとした。実験結果をFig. 3.27に示す。図より、弾性表面波の連続波が確認できた。しかしながら、パルスの立ち上がりによって得られる振動速度にはゆらぎが確認できた。ゆらぎの原因としては、交差指電極を弾性表面波が通過する際に生じる多重反射が考えられる。また、振動速度は立ち上がり・立ち下がり直後に比べて後方の振動が減衰していることがわかる。これは交差指電極を弾性表面波が通過する際にバルク波として変換されることによる損失であると考えられる。

次に、Fig. 3.27の振動速度波形をFFT解析したところ、Fig. 3.28のような結果が得られた。図より、ピークの周波数は同様におおよそ9.60MHzであることが確認された。これらの結果より、パルス波を連続して印加することでIDTの共振周波数である9.60MHzの弾性表面波の連続波を励振できたことがわかる。FFTの周波数分解能が125kHz程であるため、ゆ

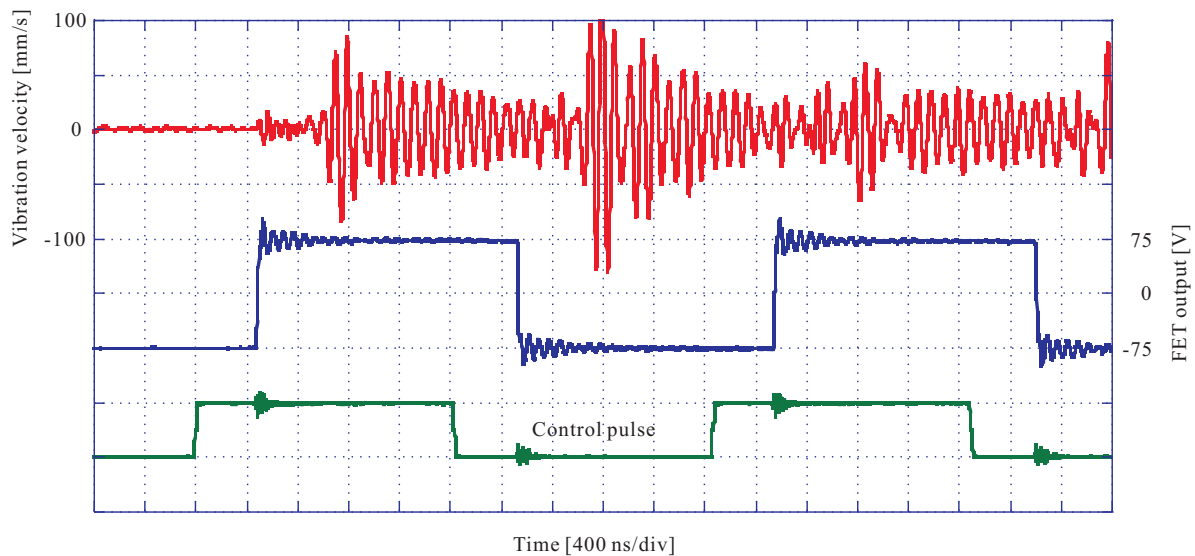


Fig. 3.27 Vibration velocity by continuous pulse wave (full-bridge configuration)

らぎに関して FFT 結果から見ることはできないが、実際にデバイスへ応用する場合に影響があると考えられる。

## 3.4 パルスにより励振した弾性表面波の振動速度波形の評価

### 3.4.1 シミュレーションとの比較

3.3 項の励振実験において、パルスの立ち上がり・立ち下がりにより弾性表面波が得られ、立ち上がり・立ち下がりを繰り返すことにより弾性表面波の連続波が得られることを確認した。ここで、1 回のパルスの立ち上がりによって得られた振動速度波形 (Fig. 3.25) に対し、2 次効果を考慮したシミュレーション結果 (Fig. 3.10) の時間領域特性を比較すると、よく似た波形が得られたことがわかる。得られた波形にはゆらぎがあり、励振後の数波長の後に振幅のピークが見られる。この特徴は励振実験によって得られた波形、シミュレーション結果ともに見られるが、励振実験の結果は振幅が時間経過とともに徐々に減少している。この理由として、バルク波変換損失が考えられる。シミュレーションにおいては、バルク波変換損失のパラメータ  $G_s = 0$  と無視しているため、シミュレーション結果と相違があったと考えられる。

一方、弾性表面波の連続波について、励振実験によって得られた結果 (Fig. 3.27) とシミュレーション結果 (Fig. 3.12) とを比較すると、全体的な傾向は似ているが、励振実験によって得られた波形にはゆらぎが生じている。このゆらぎの原因としては、同様に IDT の交差指電極を通過する際の多重反射とバルク波変換損失が考えられる。

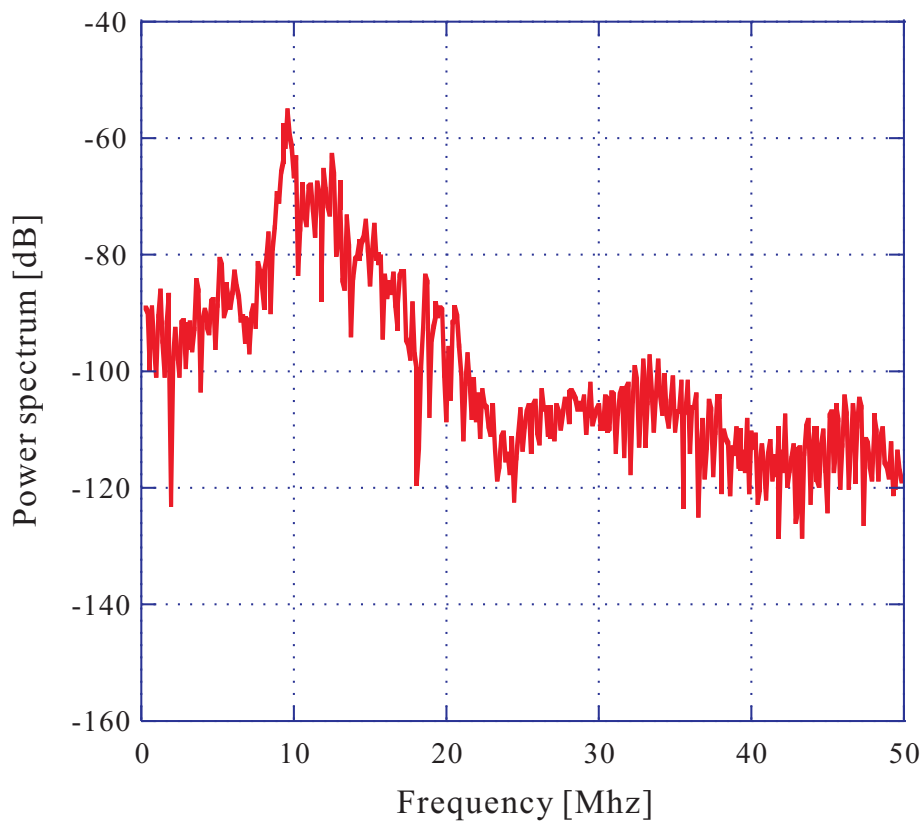


Fig. 3.28 FFT analysis result of vibration velocity (full-bridge configuration)

### 3.4.2 振動速度波形におけるゆらぎと安定化

パルスの立ち上がり・立ち下がりの繰り返しにより弾性表面波の連続波が得られたが、1回のパルスの立ち上がりによって生じる波は IDT を通過する度に減衰するため、立ち上がりと立ち下がりの繰り返しによって生じる波はゆらぎが生じた。減衰によるゆらぎがパルス波の周波数により繰り返されることで、切り替え周波数ののこぎり波を変調波とした AM 変調を行ったような波形となる。これまでの正弦波を用いて励振する方法では一定の振動振幅の正弦波を用いているため、ゆらぎを含む弾性表面波を皮膚感覚ディスプレイに使用した場合、生じる摩擦変化に影響があると考えられる。このため、パルスによる励振方法を従来の方法の代替として提案する上で、得られる振動振幅は一定であることが望ましい。

ここで、パルス波の周波数を高くすることで、減衰の影響が少なく安定した振動速度波形を得ることができると考えられる。立ち上がり・立ち下がりによって励振される弾性表面波が連続波となるパルス波の周波数  $f_p$  は前述の (3.1) 式の通り

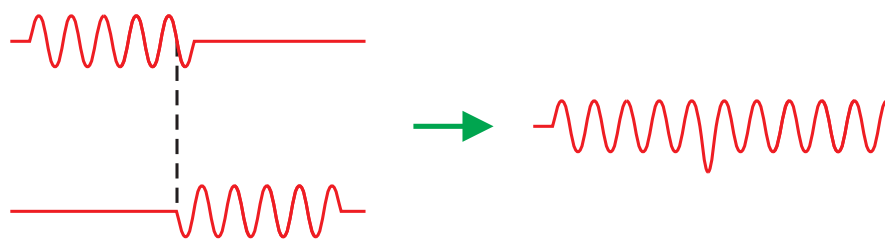
$$f_p = \frac{f_n}{2N - 1}$$

である。上式において IDT の交差指対数  $N$  は 20 であるため右辺の  $2N - 1$  は 39 となり、立ち下がりによって励振される波の位相が  $180^\circ$  進んで励振されることで連続波となって励振される。ここで (3.1) 式を以下のように置き換える。

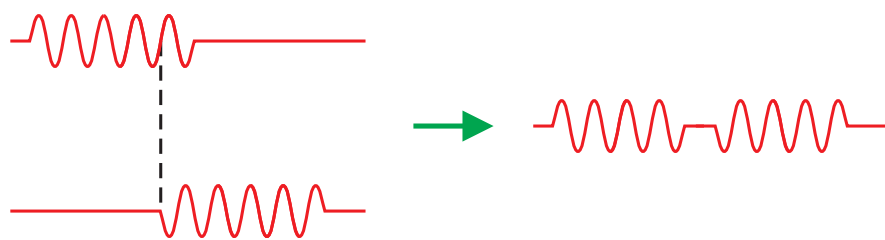
$$f_p = \frac{f_n}{2m - 1} \quad (3.10)$$

上式において、 $m$  は任意の実数とする。 $2m - 1$  の値による場合分けを考えると、 $m$  が IDT の交差指対数  $N$  と等しいとき、弾性表面波が連続波となって励振される最小の周波数  $f_{pmin}$  となる。 $2m - 1$  が  $2N - 1$  よりも大きいとき、励振される弾性表面波は繋がらずに断続的な波となる。一方、 $2m - 1$  が  $2N - 1$  よりも小さいとき、すなわち  $f_{pmin}$  よりも高い周波数のとき、励振される波は重ね合わせが生じる。このとき、IDT を通過する際の波の減衰の影響が少なくなり、より安定した振動振幅を得ることができると考えられる。しかしながら、 $m$  の値によってパルスの立ち上がりと立ち下がりの位相差が生じ、条件によっては励振される波には重ね合わせだけでなく打ち消しが生じると考えられる。すなわち、仮に減衰が生じないと仮定した場合、使用する IDT の交差指対数が 5 であれば励振される弾性表面波の重ね合わせ及び打ち消しは Fig. 3.29(a) 及び Fig. 3.29(b) のようになる。実際には IDT を通過する際の減衰によりゆらぎが生じるため、Fig. 3.30(a) 及び Fig. 3.30(b) に示すような波形になると考えられる。



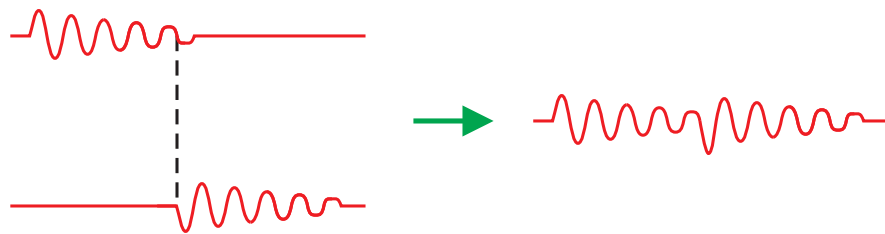


(a) Superposition

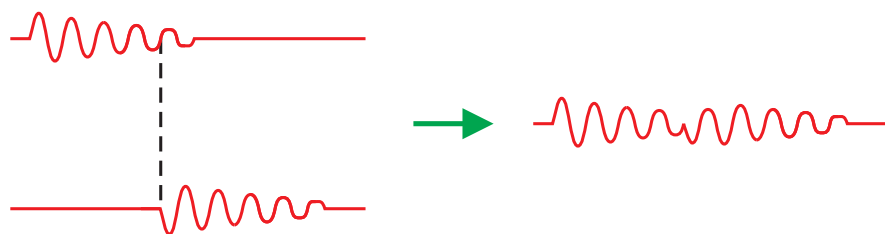


(b) Cancellation

Fig. 3.29 Superposition and cancellation in SAW excited by pulse waves



(a) Superposition



(b) Cancellation

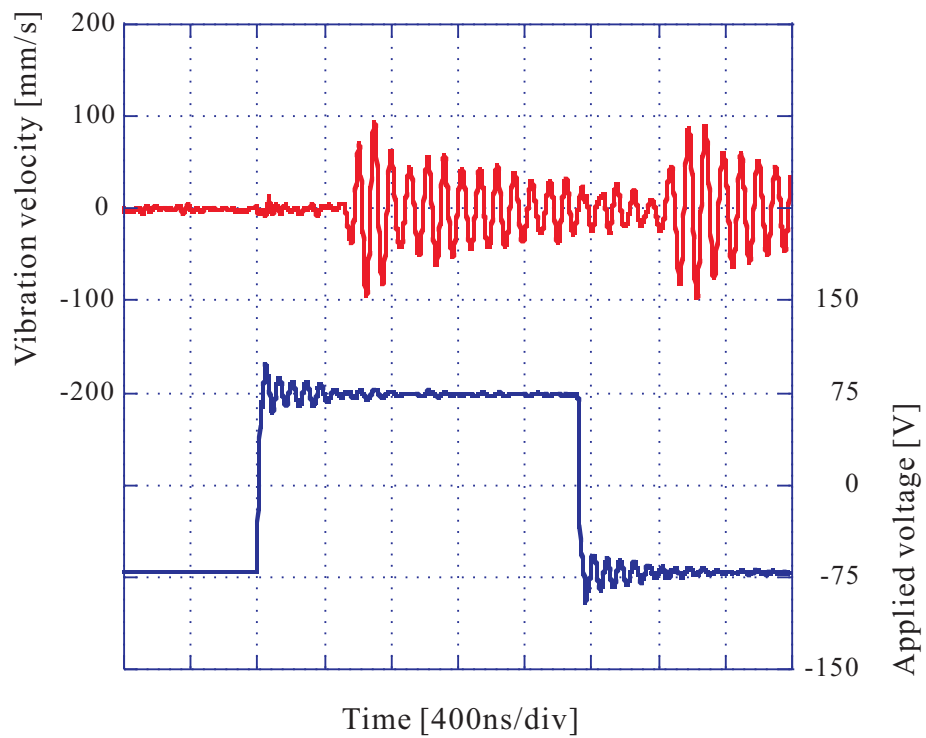
Fig. 3.30 Superposition and cancellation in SAW excited by pulse waves (with damping by IDT)

### 3.4.3 パルス波の周波数変化に対する振動振幅の変化

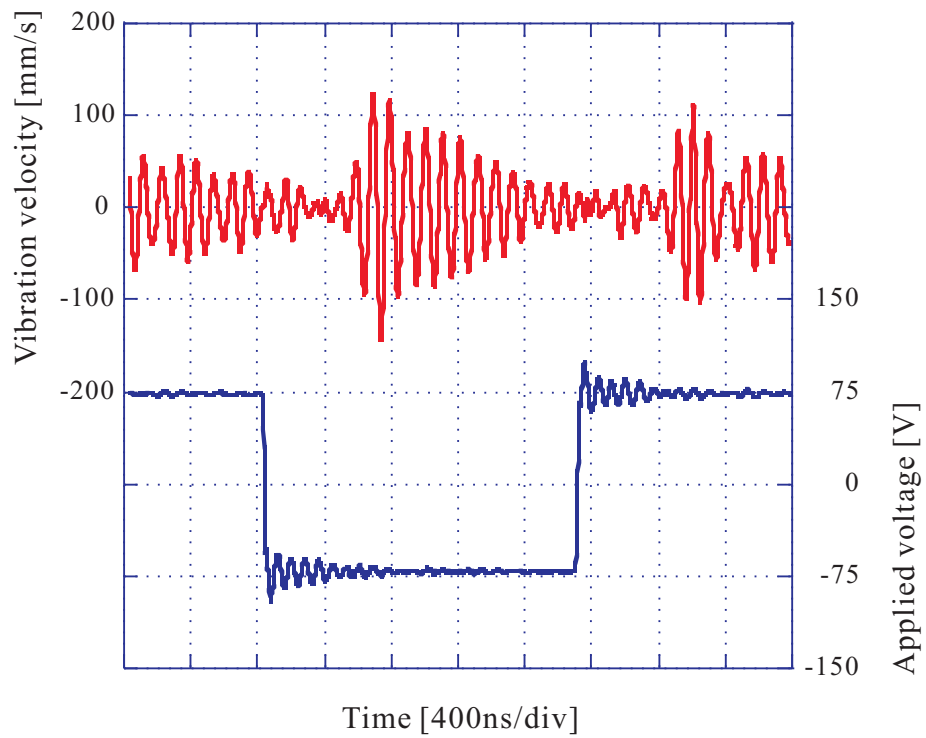
パルス波の周波数が増加することにより立ち上がり立ち下がり位相差が生じ、波の重ね合わせや打ち消しが生じると考えられる。またパルス波の周波数を高周波にすることで、波の減衰によるゆらぎが少なくなり振動振幅が安定すると考えられる。そこで印加するパルス波の周波数をより高周波に変化させ、振動速度の測定を行った。実験構成は3.3.5と同一とした。IDTの共振周波数の設計値は9.60MHzであるが、インピーダンスアナライザ(Agilent 4294A)により測定した電気的特性より共振周波数は9.70MHzであったため、(3.10)式へはこちらの値を適用した。パルス波の周波数は、(3.10)式における $2m-1$ が39から19まで、すなわち $f_p$ が248.92kHzから910.95kHzまでとした。 $2m-1$ の値の刻み幅は0.5ずつとした。

実験結果(抜粋)をFig. 3.31 - Fig. 3.34に示す。Fig. 3.31は $2m-1$ の値が37のとき、Fig. 3.32は $2m-1$ の値が19のときである。それぞれ、パルス波の周波数はFig. 3.31は262.38kHzであり、Fig. 3.32は510.95kHzである。Fig. 3.31はパルス波の位相を $360^\circ$ 進めることで1波分の、Fig. 3.32は $3600^\circ$ 進めることで10波分の波の重ね合わせが生じると予想される周波数である。Fig. 3.31(a)及びFig. 3.32(a)はパルス波の1波目の立ち上がりの瞬間であり、Fig. 3.31(b)及びFig. 3.32(b)はパルス波の10波目の立ち下がりの瞬間である。また、 $2m-1$ の値が38のときの結果をFig. 3.33に、 $2m-1$ の値が20のときの結果をFig. 3.34に示す。それぞれ、パルス波の周波数はFig. 3.33は255.47kHzであり、Fig. 3.34は485.40kHzである。Fig. 3.33はパルス波の位相を $180^\circ$ 進めることで1波分の、Fig. 3.34は $3420^\circ$ 進めることで10波分の波の打ち消しが生じると予想される周波数である。Fig. 3.33(a)及びFig. 3.34(a)はパルス波の1波目の立ち上がりの瞬間であり、Fig. 3.33(b)及びFig. 3.34(b)はパルス波の10波目の立ち下がりの瞬間である。

これらの結果より、波の打ち消しや重ね合わせは明確に見られなかった。この理由として、一回のパルスの立ち上がり・立ち下がりによって生じた弾性表面波には二次効果による残留振動が生じるが、残留振動自体に位相のズレが生じているため、波の打ち消しや重ね合わせが理論通りに起こらなかったことが考えられる。また、IDTの設計時の共振周波数の計算にはIDTの周期構造と媒質の音速のみを用いているため、製作時の誤差によってパルス波の周波数が適切でなくなることも考えられる。しかしながら、パルス波の周波数を高めた結果、振動速度の揺らぎが少なく、減衰の影響が少なくなったことが確認できた。

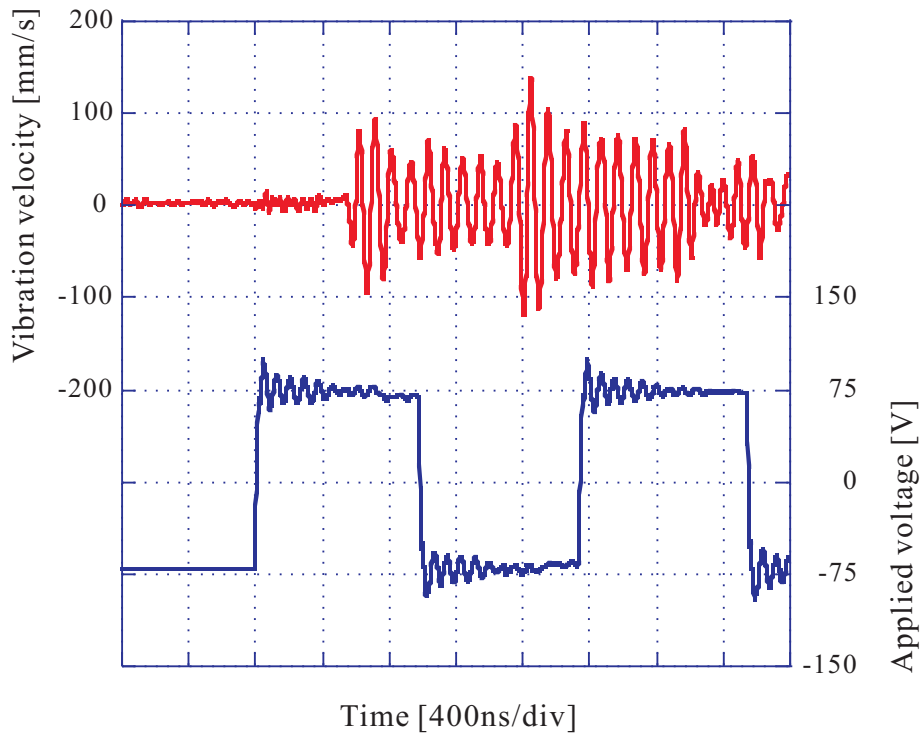


(a) rising edge of 1st pulse wave

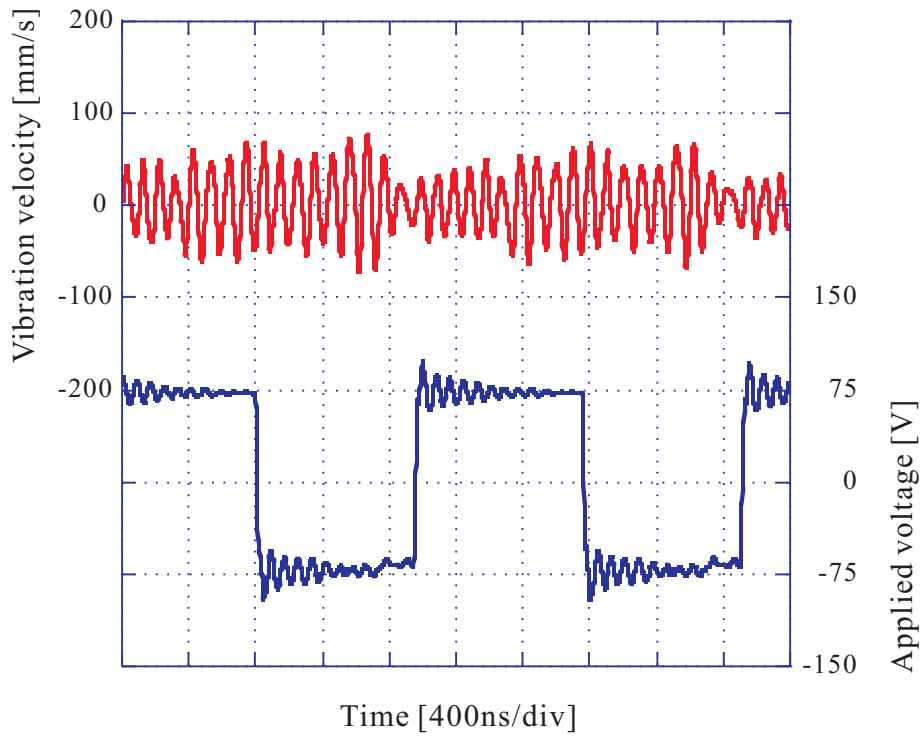


(b) trailing edge of 10th pulse wave

Fig. 3.31 Vibration velocity by edge of pulse wave with 360 degree phase lead

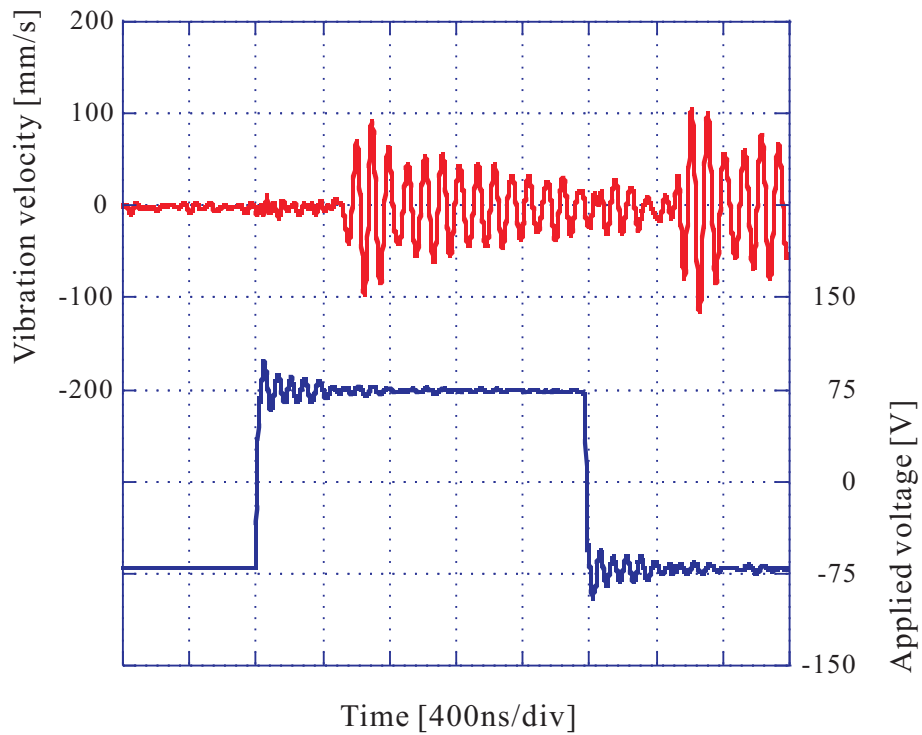


(a) rising edge of 1st pulse wave

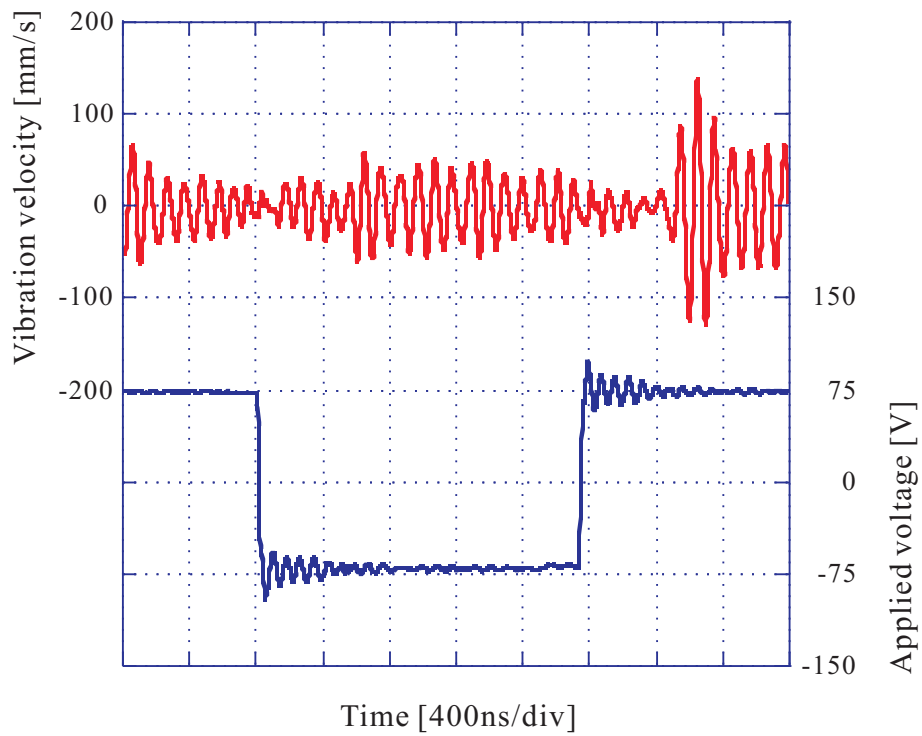


(b) trailing edge of 10th pulse wave

Fig. 3.32 Vibration velocity by edge of pulse wave with 3600 degree phase lead

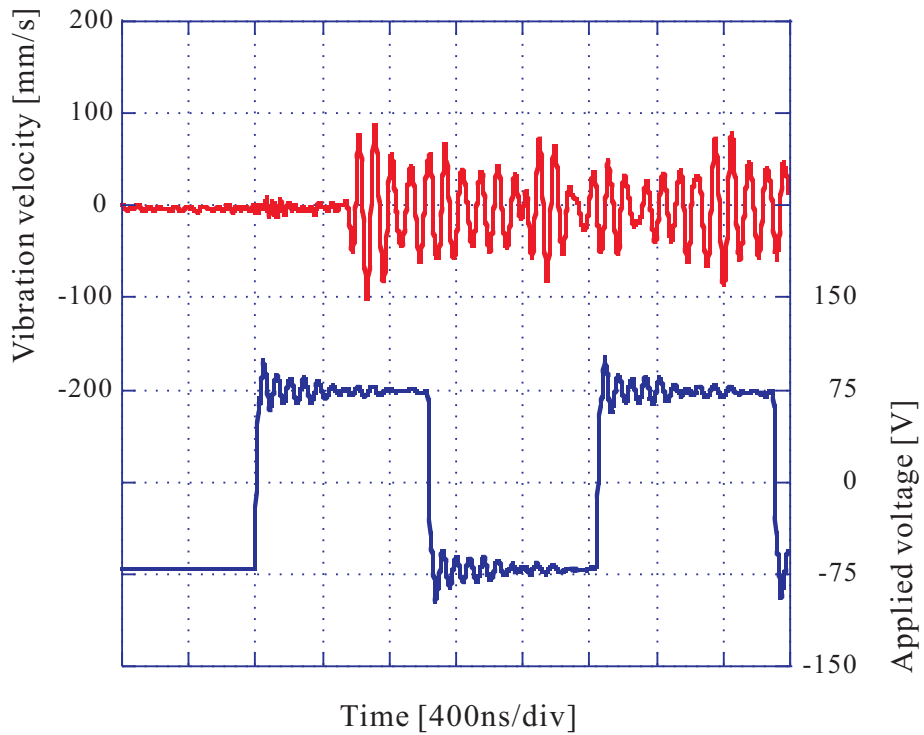


(a) rising edge of 1st pulse wave

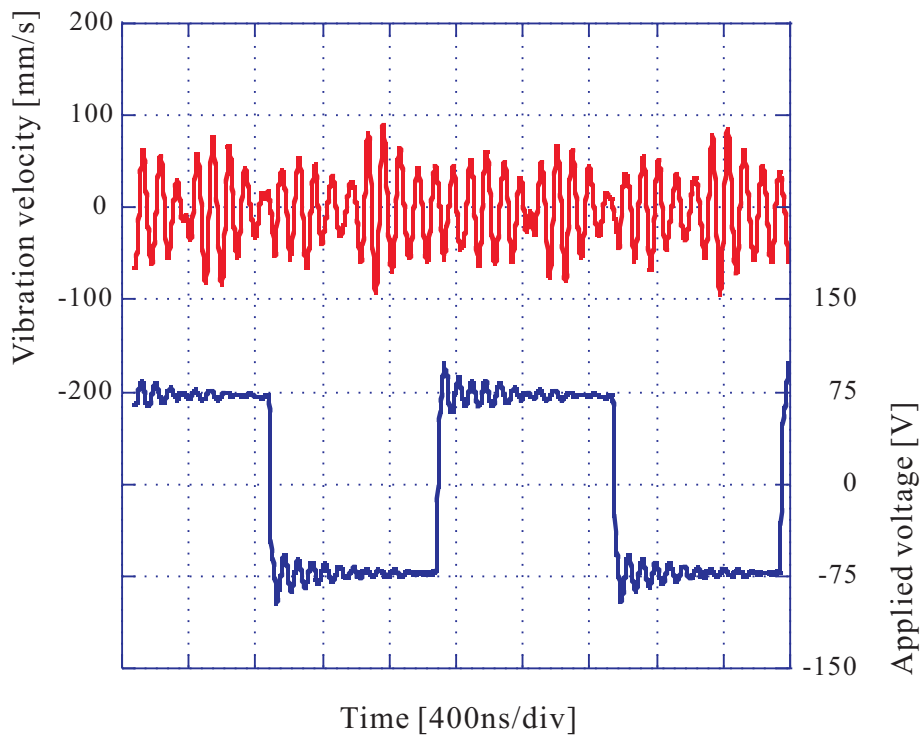


(b) trailing edge of 10th pulse wave

Fig. 3.33 Vibration velocity by edge of pulse wave with 180 degree phase lead



(a) rising edge of 1st pulse wave



(b) trailing edge of 10th pulse wave

Fig. 3.34 Vibration velocity by edge of pulse wave with 3420 degree phase lead

### 3.4.4 ゆらぎの評価

3.4.3 における実験にて得られた振動速度変化の評価方法について検討を行った．波形の評価方法として，例えば電圧変動の指針であるリップル率 (Ripple factor) というものがある．これはスイッチング電源等の直流電源から出力される電圧波形 (目標とする直流電圧値) に対し，スイッチングによるゆらぎ (ripple) がどれだけ含まれるかを表すものである．通常，スイッチング電源のリップル率は次の式のように表される．

$$R = \frac{V_R}{V_{DC}} \quad (3.11)$$

ここで， $R$  はリップル率を， $V_{DC}$  は電圧の DC 成分 (目標電圧) を， $V_R$  はリップル電圧を表す\*1．実験結果の評価を行う上で，上記のリップル率と同様の評価方法を検討した．評価方法の概念図を Fig. 3.35 に示す．この評価方法では，得られた振動速度波形を正弦波が変調されたものとして考える．まず，波形が軸対称なものであると考え，絶対値波形を算出する．得られた波形のピーク値より包絡線を取得し，この包絡線の実効値を算出する．算出した実効値と実効値を基準とした包絡線の最大値より，以下の式を「ゆらぎ率 (fluctuation factor)」として定義した．

$$F = \frac{V_{RM}}{V_{RE}} \quad (3.12)$$

ここで， $F$  はゆらぎ率を， $V_{RE}$  は包絡線の実効値を， $V_{RM}$  は実効値を基準とした包絡線の最大変動値を表す．

(3.12) 式を用いて，横軸を (3.10) 式における  $2m - 1$  の値，縦軸を (3.12) 式における対応するゆらぎ率，及び包絡線の実効値としてグラフに表した．結果を Fig. 3.36 に示す．また，パルス波の周波数を  $2m - 1$  が 33 から 31 まで，すなわち  $f_p$  が 294.18kHz から 313.16kHz までとし， $2m - 1$  の値の刻み幅を 0.1 ずつとして詳細に測定した結果を Fig. 3.37 に示す．加えて，パルス波の周波数を  $2m - 1$  が 23 から 19 まで，すなわち  $f_p$  が 422.09kHz から 510.95kHz までとし， $2m - 1$  の値の刻み幅を 0.2 ずつとして詳細に測定した結果を Fig. 3.38 に示す．

図中における赤丸は包絡線の実効値であり，青丸はゆらぎ率である． $2m - 1$  の値が小さく，すなわちパルス波の周波数が高くなるにつれて，振動速度ピーク値のゆらぎ率が少なくなっていることがわかる．これらにより，パルス波の周波数を高くすることでゆらぎが少なく安定した振動を得ることができると考えられる．一方，振動速度の包絡線の実効値は周波数が高くなるにつれて振幅が大きくなり，ある程度重ね合わせや打ち消しが生じていると考えられる．また，周波数が高いほど重ね合わせる波の数が多く，このため振動速度の振幅が大きくなると考えられる．

\*1 リップル電圧が正弦波の場合は実効値を，それ以外は最大値を用いる．



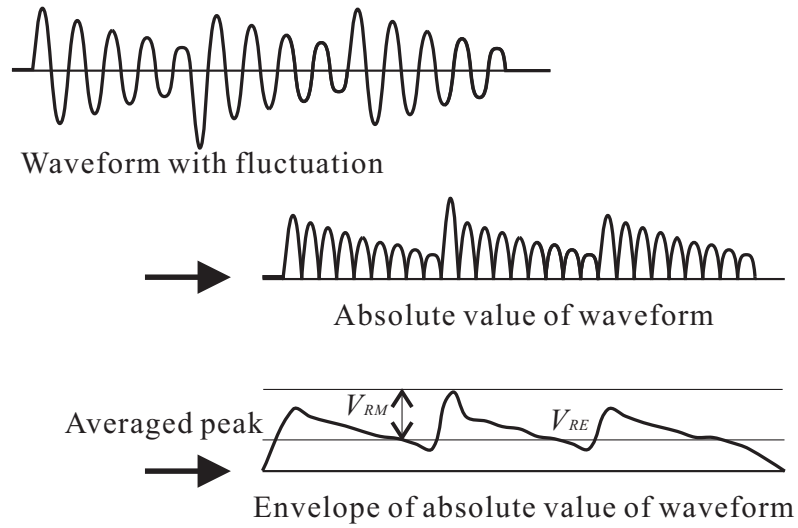


Fig. 3.35 Method of fluctuation evaluation

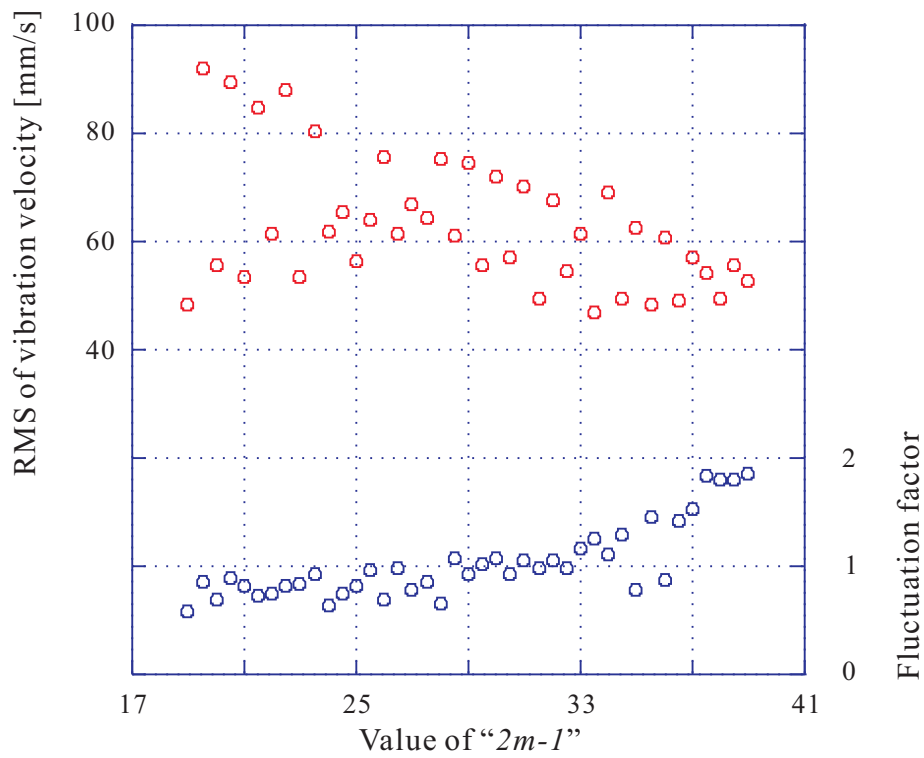


Fig. 3.36 Fluctuation of vibration velocity by changing frequency of pulse wave

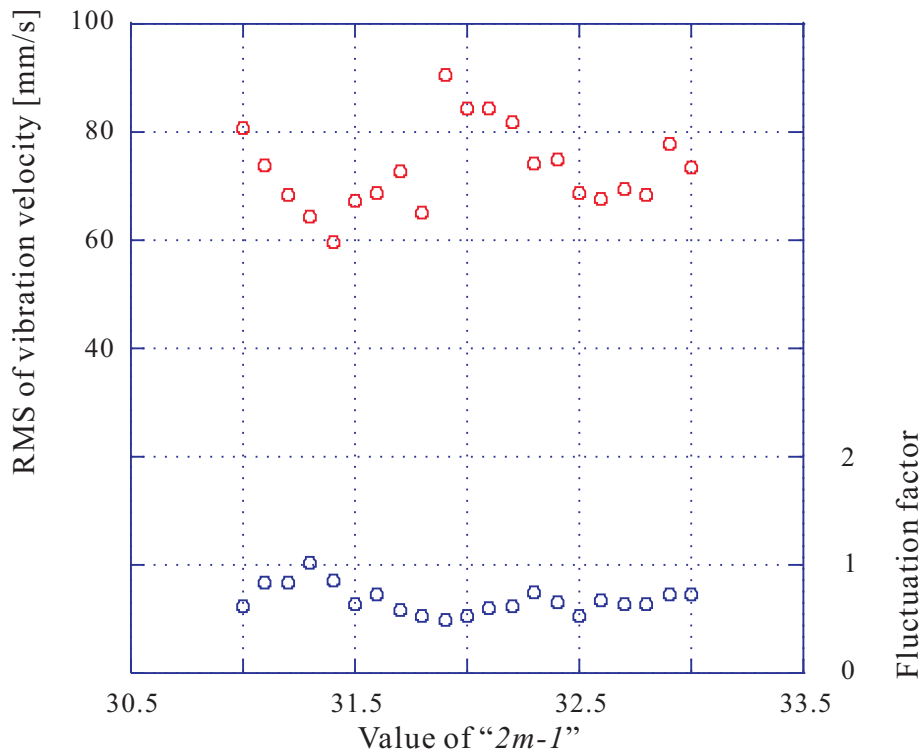


Fig. 3.37 Closeup of fluctuation of vibration velocity by changing frequency of pulse wave

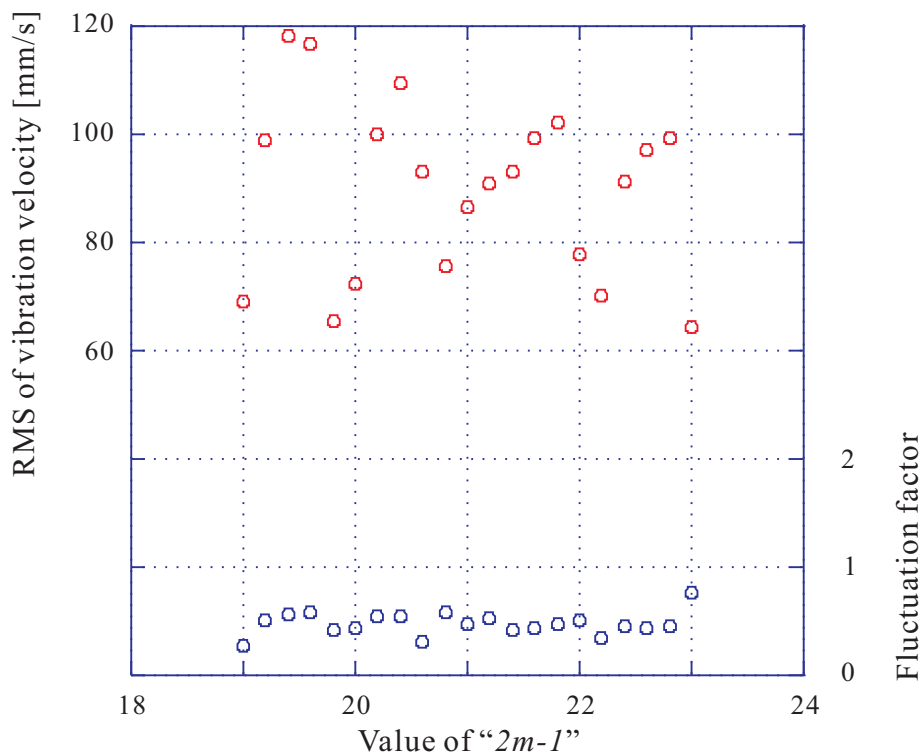


Fig. 3.38 Closeup of fluctuation of vibration velocity by changing frequency of pulse wave

### 3.4.5 励振効率

パルス波により弾性表面波の連続波の励振が確認されたが、仮に従来の方法と比べて効率が低ければ、励振システムのコストを下げることも実用には向かないと考えられる。そこで、パルス波を用いて弾性表面波の励振を行ったときの消費電力について、従来の方法で弾性表面波を励振した場合と比較を行った。実験構成は 3.3.5 と同様のものとし、IDT への印加電圧のみを変更した。ここで、有効電力の算出は以下のように行った。

- ・ パルス波を用いた場合: 電源の電圧・電流から算出し、無負荷時を減算<sup>\*2</sup>
- ・ 正弦波を用いた場合: IDT への印加電圧・電流から算出

電流の測定には AC/DC 電流プローブ (Tektronix TCP312) を使い、プローブの遅れを考慮し電力計算を行った。結果を Fig. 3.39 に示す。グラフの横軸が IDT への入力電力、縦軸が振動速度を示す。図中の赤丸がパルス波による駆動時、青丸が正弦波による駆動時の電力である。図より、どちらも同程度の消費電力で弾性表面波の励振が可能であることがわかる。ここで、正弦波による駆動、すなわち従来の駆動において用いているアンプは高周波用のリニアアンプ (Thamway 46 シリーズ) であるが、一般的に高周波の増幅回路では A 級あるいは AB 級の増幅回路を使用していることが多く、歪みの少ない出力が得られる代わりに一定のバイアス電流が常に流れるため消費電力が大きい、効率のそれほど高くない増幅回路である。一方、本研究にて製作した FET を用いたスイッチング増幅回路は D 級アンプからローパスフィルタを取り除いた構成であり、非常に消費電力の少ない高効率な増幅回路である。実際に双方の無負荷時のアイドル電力を測定したところ、本研究で製作した FET を用いたスイッチング増幅回路では 7W の消費電力であるのに対し、高周波用リニアアンプ (Thamway 46 シリーズ) では 86W であった。このことから、増幅回路の効率を含めたシステム全体の効率面で非常に有利であると考えられる。提案した方法を用いることで増幅器の初期コストのみならず、運用コストについても低減可能であるといえる。

## 3.5 まとめ

第3章では、パルス波による弾性表面波の励振について検討を行った。その結果、パルス電圧の急峻な立ち上がり及び立ち下がりにおいて弾性表面波の進行波が励振可能であることが確認され、適切な周波数のパルス波を繰り返し励振することで弾性表面波の連続波が励振可能であることを確認した。

励振された弾性表面波はパルス波の周波数で減衰によるゆらぎを生じるが、パルス波の周波

<sup>\*2</sup> IDT への印加電圧・電流にノイズ成分が多いため、このような算出方法とした。

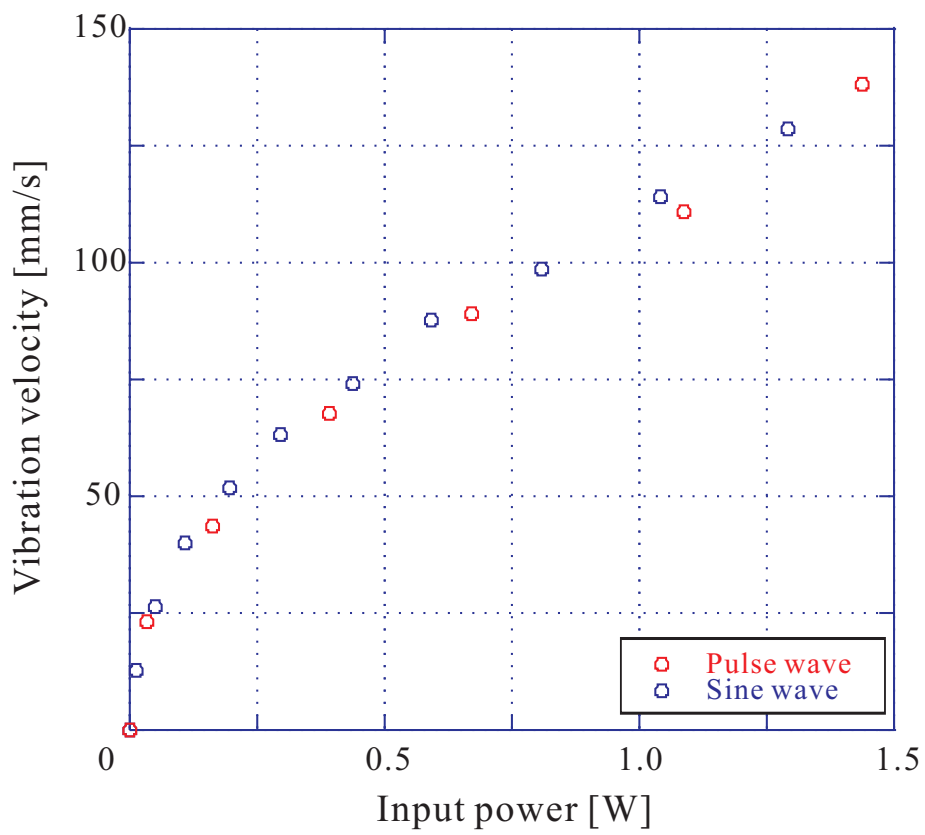


Fig. 3.39 Comparison of power consumption

数を高くすることでゆらぎを少なくし、安定した励振が可能である。

また、これまで一般的であった正弦波の印加による弾性表面波の励振方法と比較して、励振そのものについては同程度の消費電力で励振可能であることを示した。増幅器の効率を考慮した場合、一般的な高周波用リニアアンプを用いる従来の方式と比べ、提案したパルス波を用いる方式ではFETによるスイッチングを使用しているため安価かつ高効率な励振が可能であり、十分なアドバンテージを有しているといえる。

以上より、パルス波による弾性表面波の励振方法を提案し、また提案した方法が従来の励振方法と比べて簡易かつ安価な励振方法であることを示した。

## 第 4 章

# 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの改善

第 4 章では，弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイについて述べる．最初に，皮膚感覚について説明し，様々な触覚ディスプレイについて述べる．弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイについて述べ，得られる感覚やデバイス自体の完成度の向上について説明する．

### 4.1 皮膚感覚 [33]

#### 4.1.1 皮膚感覚

皮膚とは，動物の体の表面を覆う層であり，脊椎動物では外側の表皮と内側の真皮からなる．皮膚には神経終末が達しており，触覚の感覚器としても働いている．人間が持つ感覚のうち，何かに触る感覚，なぞっている感覚，持つ・掴む感覚といった機械的刺激により感じる感覚を体性感覚といい，この体性感覚は主に 2 つに分けることができる．この体性感覚のうち，一方は「固有受容感覚」（または，「運動感覚」，「深部感覚」，「力覚」）であり，筋肉，腱，関節嚢等の深部に存在する深部受容器 (proprioceptor) によって受容される．他方は「皮膚感覚」であり，皮下組織中の機械受容器細胞 (mechanoreceptor) によって受容される．皮膚感覚には触覚，圧覚，痛覚，温度覚等が含まれ，固体表面のざらざら感や材質感，摩擦等を認識する感覚である．

#### 4.1.2 皮膚の構造 [34]

人間の皮膚のうち，皮膚感覚ディスプレイにおいてなぞり動作を行う指腹部について考える．指腹部は表皮 (epidermis)，真皮 (dermis)，皮下脂肪組織 (subcutaneous fat tissue) から構成される．指紋とは高さ約 0.1mm，幅約 0.3~0.5mm の小稜 (epidermal ridge) であり，胎児の時にパターンが形成される．また，表皮と真皮の間には真皮乳頭 (papilla) と呼ばれる突起群が指紋直下に 2 列配置されている．表皮は角質層 (stratum corneum)，透明

層 (stratum lucidum), 顆粒層 (stratum granulosum), 有棘層 (stratum spinosum), 基底層 (stratum basale) よりなる。基底層及び有棘層深部の細胞は有糸分裂を盛んに行い, 表皮細胞を外側に送り出す。表皮細胞は次第に角化し, 最終的に角質層に至り, 角質となって皮膚から剥離する。角質層は体を保護する役割を担うかたい層である。これまで, 皮膚の表皮・真皮・皮下組織の縦弾性係数の算出が有限要素法により行われている [35]。

皮下には形・大きさ・配置の異なる多数の触覚受容器が埋め込まれている。それぞれ触覚受容器の配置が皮膚構造と深く関わっている。触覚受容器は大きく4つに分けることができ, それぞれマイスナー小体 (Meissner corpuscle), メルケル細胞 (Merkel cell), パチニ小体 (Pacinian corpuscle), ルフィニ終末 (Ruffini ending) である。これらの受容器はそれぞれ異なる役割を持ち, 応答特性が異なる。マイスナー小体は触刺激による皮膚変位の速さを検出する。メルケル細胞は順応速度が遅く, 皮膚変位の大きさに比例し応答する。ルフィニ終末はメルケル細胞と同様に皮膚変位の大きさに比例した応答を示すが, 真皮層に存在するため遠い部位に加わった変位に対しても反応する。パチニ小体は皮膚変位の加速度を検出する。

### 4.1.3 粗さ感

人間が指で固体表面をなぞった場合, 固体表面に多数存在する微視的な突起により微小な振動が発生する。「粗さ」の認識は触覚受容器細胞がこの振動を検知するためと考えられる。「粗さ」は人により感じ方が多種多様である。表面粗さとなぞり速度によって振動の周期や強さは異なるため, この違いに応じて「粗さ」の違いを認識しているものと考えられる。ある間隔で突起を持つ固体表面をなぞった場合, Fig. 4.1 のように皮膚質点の運動は次の3つの状態を繰り返すと考えられる。

#### Through 期

皮膚が対象物体と接触せず, 空中を移動している状態

#### Slip 期

皮膚が突起と衝突し, 摩擦力により速度が減少していく状態

#### Stick 期

皮膚質点が静止し, 摩擦力が最大静止摩擦力になるまで静止し続ける状態

周期的に皮膚表面に発生する stick-slip-through 応力状態が皮膚内部をせん断変形波となって伝播し, 触覚受容器細胞であるマイスナー小体やパチニ小体によって検出されると考えられる。指で固体表面をなぞった感覚を提示するためには, 上記の周期的なせん断応力を皮膚表面に与えること, もしくはせん断変形波を皮膚表面に励振することが有効である。stick 状態から突起部分で slip し, through 期に入る一連の運動は stick-slip 現象 (固着すべり) と呼ばれる。この現象は自励振動, すなわち自身の運動により外部から非振動的なエネルギーを取り込

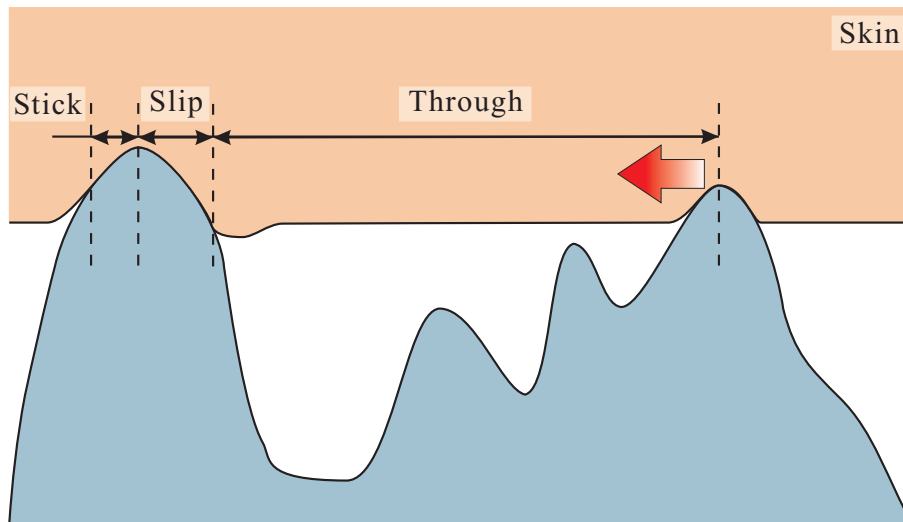


Fig. 4.1 Model of stick-slip-through

むことで振幅が減衰せず持続する振動である．これは静止時の摩擦抵抗よりも動き出した後の抵抗のほうが小さいときなどに生じ，工作機械のびびり振動や航空機の翼のフラッター現象，バイオリンの弦の振動等にもこの stick-slip 振動が関係している．through 期の長さは突起間隔から決定される．slip 期及び stick 期はなめらかな固体表面と皮膚の間の stick-slip 現象ととらえることができる．through 期の長さとして stick-slip 期の突起の高さを指定することにより，ある間隔で突起を持つ固体表面の状態を表現することができる．

## 4.2 触覚ディスプレイ

触覚を提示するデバイスは2つに分類することができる．深部感覚を対象として提示するものは力覚ディスプレイ，皮膚感覚を対象として提示するものは触覚ディスプレイあるいは皮膚感覚ディスプレイと呼ばれる．バーチャルリアリティ環境において，ユーザーが壁面に触れた場合について考える．力覚ディスプレイでは壁面から受ける反力を提示することが可能であり，一方触覚ディスプレイでは壁面の「つるつる」、「ざらざら」といった表面のテクスチャ感，材質感，摩擦感などの情報を提示することが可能である．

触覚ディスプレイの応用方法として，バーチャルリアリティの分野やマスタースレーブ等の遠隔操作システムその他，インターネット上のオンラインショッピングの際に商品の質感を画面上で確認してから購入できるようなシステムにも利用可能であると考えられる．また，視覚情報と融合させて用いることで，後天的な視覚障害者や弱視者に対してタッチパネルやコンピュータの操作補助を行うことも可能であると考えられる．現在，力覚提示ディスプレイは数多く研究され，成熟度の高い製品も存在している．しかしながら，触覚ディスプレイは現実



感・臨場感の高い触覚情報の提示は容易ではなく、また提示可能な触覚の種類に限りがあるものも多い。そのため、試行錯誤を重ねながら研究開発が進められている。

これまで、皮膚感覚を提示するデバイスとして様々なものが研究開発されているが、提示する感覚によって次のような分類に分けることができる。

- ・ 表面のテクスチャ感を提示するもの
- ・ 物体の硬軟感を提示するもの
- ・ 粘着感を提示するもの
- ・ 温度感を提示するもの

次項では、近年の触覚ディスプレイの動向について紹介する。

#### 4.2.1 ピンアレイを利用した触覚ディスプレイ

視覚障害者向けの情報提示手段として点字ディスプレイというものがあるが、これは平面内にピンがアレイ状に構成されたものである。表面のテクスチャを再現する方法として、点字ディスプレイのように垂直方向に変位もしくは振動するピンをアレイ状に構成したものがある。ピンの駆動には圧電素子が用いられるものが多いが、圧電素子単体での発生ストロークは短い。このため、下条らはバイモルフ型のアクチュエータを用いて変位を確保している [36]。また、池井らは片持ち梁のてこ機構を使用することで変位の拡大を行っている [37]。

また、高いエネルギー密度を有する小型の素子に形状記憶合金 (shape memory alloy: SMA) があり、大きな発生力と変位の生成が可能である。松永らはこの形状記憶合金をピンアレイの駆動に用いており [38]、芳賀らの報告によれば比較的low周波な空間周波数領域のテクスチャに関して正確な再現が可能である [39]。加えて、2次元形状だけでなく何段階かに分けて垂直方向に駆動することで3次元形状についても提示可能である。しかしながら、ピンアレイ型では形状を再現する際の分解能はピンの直径と配置に制限される。垂直振動だけでなく水平振動するピンアレイ型の触覚ディスプレイも Wang らによって提案されており [40]、Pasquero らのデバイスでは 1mm 間隔と高密度にアクチュエータ及びピンを構成している [41]。

#### 4.2.2 電気刺激を利用した触覚ディスプレイ

梶本らにより電気刺激を利用した触覚ディスプレイが提案されている [42] – [46]。皮膚には前述のように4種類の機械受容器が存在するが、これらを選択的に刺激することで様々な触感を提示することが可能である。この方式では機械的なアクチュエータを必要とせず、平面状に電極を配置するだけで実現可能であるため他の方法と比べて小型化が容易である。しかしながら、神経発火に対してばらつきが大きく、梶本らはこれまで安定した感覚提示の方法の模索を

行っている [46]。また、梶本らはこの触覚ディスプレイを用いた皮膚感覚のオーグメンテッドリアリティ (augmented reality: AR) をこれまでに提案しており、触りえないものを触る技術として研究が進められている [43][44]。

#### 4.2.3 超音波振動を用いた触覚ディスプレイ

超音波振動を使用し、テクスチャを再現する触覚ディスプレイが提案されている。超音波の励振には、圧電セラミックス等の圧電体に対して交流電圧を印加する構成である。微小な空隙の 2 平面間に相対的な垂直方向の振動が生じるとスクイズ膜効果 (squeeze film effect) と呼ばれる現象が生じる。Biet らはこのスクイズ膜効果を用いて触覚テクスチャの生成を行っており、格子状に圧電セラミックスを配置することで大面積のデバイスを開発している [47]。同様のデバイスに T-PaD と呼ばれるデバイスがあり、Winfield らによって開発されている [48]。Marchuk らはこれを改良し様々な振動モードを組み合わせることで、LATPaD と呼ばれる大面積の T-PaD を開発している [49]。Samur らによって T-PaD の弁別実験や、振動生成時の摩擦係数測定が行われている [50]。加えて、Chubb らにより T-PaD を用いた ShiverPaD というデバイスが開発されており、これは T-PaD により摩擦を変調させることで使用者の得る摩擦感を変化させる触覚ディスプレイである [51]。また、本研究で用いている弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ (後述) についてもこれに分類される。

#### 4.2.4 音響放射圧を用いた触覚ディスプレイ

岩本ら、星らは超音波の音響放射圧を利用した触覚提示を提案している [52][53]。PZT (lead zirconate titanate) の超音波振動子がアレイ状に配置されており、音響放射圧を収束できる。この収束位置において、非接触での感覚提示を行うことができる。収束位置を走査させることで、3 次元の触覚ディスプレイを構成することができる。また、高橋らは空中映像システムとの融合を実現している [54]。この触覚ディスプレイを用いた触覚フィードバックを持つ空中入力システムが星により提案・試作されている [55]。

### 4.3 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ

様々な形式の触覚ディスプレイが提案されているが、それらの多くはアクチュエータ部分に体積を必要とする。また電気刺激や静電気力を利用するものは小型化が可能であるが複雑な配線が必要とする場合がある。本研究では超音波振動の一種である弾性表面波 (surface acoustic wave: SAW) を応用する。弾性表面波振動子は構造が簡素かつ薄型のディスプレイの開発が可能という利点を持つ。弾性表面波振動子において、振動エネルギーはほとんどが振動子の片面表面に分布する。このため、振動子は薄く構成でき、振動子を裏面支持することが可能であ

る．また，駆動周波数が数 MHz と高いため応答の速いデバイスの作成が可能である．

皮膚感覚は，以下のようなプロセスで得られると考えられている．

- (1) 指で物体表面をなぞった際にその表面形状に応じた変位分布が皮膚表面に与えられる．
- (2) 弾性体である皮膚内部に弾性変形が生じる．
- (3) 皮膚内部の受容器細胞が変形や物理量を検出して発火する．

このため，ある粗さを持った固体表面をなぞったときの粗さ感覚を再現し提示するには，なぞり動作に応じた振動を皮膚に与えることが有効である．弾性表面波を用いて擬似的に同様な振動を与えることにより，「ざらざら」，「つるつる」といった粗さ感覚を提示することが可能となる．

これまで，弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイとして2種類のものが提案されている．一方は超音波モータの原理を応用したもので，パッシブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと呼ばれている．これはディスプレイの基板上に使用者が指を置き，感覚を模擬した振動により皮膚感覚を提示する．もう一方はアクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと呼ばれている．これはディスプレイの基板上を使用者自らがなぞることにより皮膚感覚を提示する．

#### 4.3.1 パッシブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ

これまで，高崎らにより超音波モータの原理を応用したパッシブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイが提案されている [56][57]．レイリー波の進行波中では媒質の表面粒子は後方楕円運動をしており，剛性を持つ物体を押し付けると摩擦により物体はレイリー波の伝播方向とは逆向きにせん断力を受ける．これが弾性表面波リニアモータの原理である．レイリー波が励振されるときせん断力が励起され，励振されていないときせん断力は励起しないが，これを繰り返すことで擬似的に stick-slip-through 応力状態を再現することができる．パッシブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイではこのせん断力による stick-slip-through 応力状態を用いる．使用者は皮膚感覚ディスプレイのパッド部に指を置き，左右それぞれの IDT から交互にレイリー波を励振・伝播することで交番力を生じ，あたかも粗さのある物質表面をなぞっているかのような感覚を得ることができる．これまでマウスへの応用 [56][57] や櫻田らによる力覚提示デバイス PHANToM への応用 [58][59] がなされている．マウスとの組み合わせでは視覚情報との融合が，PHANToM との組み合わせでは力覚情報との融合がなされている．

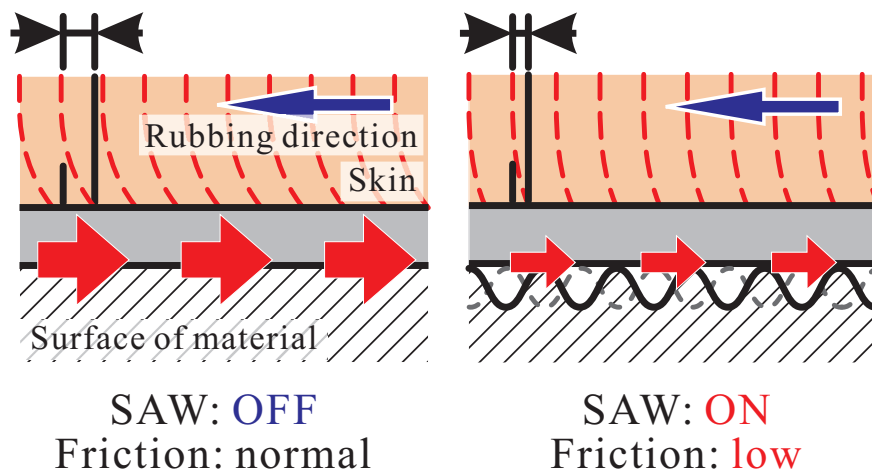


Fig. 4.2 Friction change by SAW ON/OFF

### 4.3.2 アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ [60][61]

#### 4.3.2.1 皮膚感覚提示原理

アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの皮膚感覚提示原理について述べる．弾性表面波の定在波を振動子に励振すると，数 MHz 以上の周波数でスライダとステータ振動子との接触面では接触と非接触とを繰り返す（タッピングモード）．このため，Fig. 4.2 に示すようになぞり動作時における摩擦力はわずかではあるが減少する．アクティブタイプ皮膚感覚ディスプレイではこの摩擦力の変化を利用して皮膚感覚の提示を行う．ディスプレイの使用者がスライダに指を乗せてなぞり動作を行っている際に摩擦力の変化が生じると，弾性体である皮膚がせん断方向に伸縮する．なぞり動作に応じて適切に弾性表面波の定在波の励振の ON/OFF を制御することで，摩擦力の周期的な変化を生成させることができる．この摩擦力の変化は振動となって皮膚内部へ伝播し，機械受容器細胞を発火させる．これにより擬似的な stick-slip 振動を生成することができ，ある固体表面をなぞったときの感覚を提示することができる．これまでスライダには振動子と接触する球体の分布とそれを支持するゴムフィルムを用いていたが，これに替わるより簡易な方法としてアルミフィルムを用いることが可能である．本研究では，アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを基本構成として用いる．

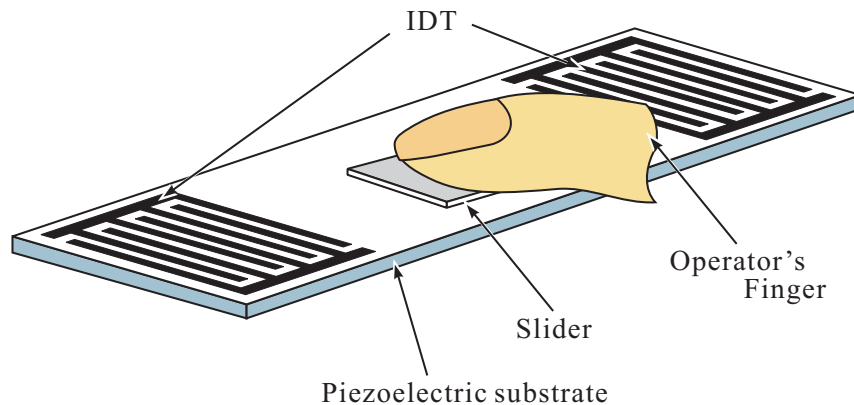


Fig. 4.3 Active type SAW tactile display

#### 4.3.2.2 ディスプレイの構成

アクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの基本構成を Fig. 4.3 に示す．弾性表面波の定在波を励振するために，振動子上には2つのIDTを対向して配置する．各々のIDTから励振・伝播される弾性表面波の進行波の組み合わせにより，定在波を形成する．弾性表面波を振動子の中央部に効率的に閉じ込めるため，IDTの背後には反射器 (OMSA) を配置することもでき，共振時に高いQ値となる振動子とすることができる．IDTは真空蒸着及びフォトリソグラフィプロセスにより  $\text{LiNbO}_3$  基板上に形成される．

#### 4.3.2.3 制御システム

皮膚感覚ディスプレイの制御システムを Fig. 4.4 に示す．皮膚感覚ディスプレイ上より指の位置に応じた信号が制御回路へ送信される．指の位置検出にはエンコーダやカメラによる画像処理等を適用することが可能である．制御回路はホストコンピュータに実装される．制御回路では一定時間毎に指の位置を検出し，指の位置及び計測時間間隔によりなぞり速度  $v_m$  を算出する．コンピュータ内にて予め決定した粗さ情報  $k_r$  により出力される振動の周波数  $f$  を以下の式により決定する．

$$f = \frac{v_m}{k_r}, \quad (4.1)$$

この  $k_r$  は一様に突起を有する粗さ表面における突起間隔を表す．同様にコンピュータ内にて予め決定したデューティ比  $d$  より，周波数  $f$  の矩形波信号がマイコン (SH2-7045F) にて生成され出力される．コンピュータ上にてこれらのパラメータ ( $k_r$  及び  $d$ ) を適宜書き換えることで様々な粗さ感覚を提示することが可能である．マイコンから出力された矩形波はセンサイザのトリガに用い，Hレベルのときに弾性表面波の駆動信号を出力する．このバースト信号は

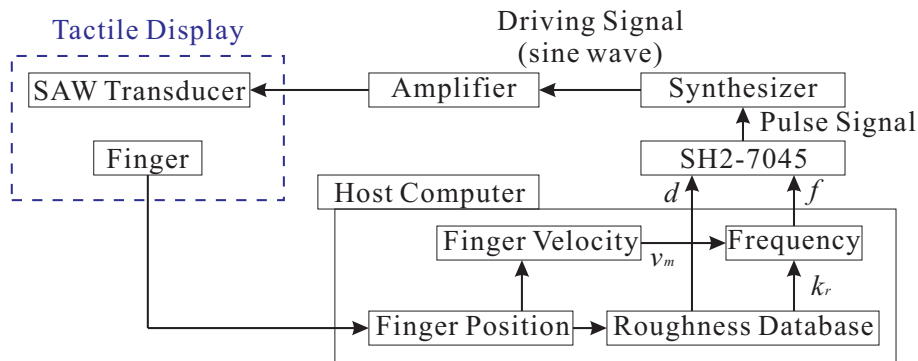


Fig. 4.4 Control system of active type SAW tactile display

アンプに入力され、増幅されて弾性表面波振動子に印加される。

## 4.4 皮膚感覚ディスプレイのコンピュータインターフェースへの適用

### 4.4.1 直感的なインターフェース

#### 4.4.1.1 タッチパネル

コンピュータのインターフェースとして代表的なものにキーボードとマウスを用いて操作を行うグラフィカルユーザーインターフェース (graphical user interface: GUI) がある。この GUI を用い、より直感的な操作を行うものの一つにタッチパネルがある。タッチパネルとは、タッチスクリーンとも呼ばれ、ディスプレイモニタとマトリクススイッチ等を組み合わせた装置で、画面上を指やペンなどにより押さえることで機器の操作を行う入出力装置である。ユーザーは画面上を直接操作することができるため、より直感的な入力が可能となる。このため、鉄道切符の券売機や銀行の ATM、更には携帯ゲーム機や携帯電話、デジタルカメラといった身近な機器に使用されている。特に近年携帯電話の中でもタッチパネルを搭載するスマートフォンの普及が急速に進んでおり、多くの人々が使用経験のあるインターフェースである。

タッチパネルには、押下した位置の検出方式によって様々な種類のものがある。代表的な検出方式を以下に記す [62]。

#### マトリクススイッチ

最も古い方式であり、透明な電極によるスイッチを碁盤の目のように配列させる。面を押下すると電極が接触し、位置情報が検出できる。スイッチの大きさによって位置検出の分解能が決定され、またマトリクススイッチの設計から表示するレイアウト等に制限が生じるため現在ではあまり用いられていない。

### 抵抗膜方式

マトリクススイッチに替わるものとして開発された方式で、安価に構成することが可能である。2枚の抵抗を持つ透明な金属薄膜をディスプレイ上に配置させる。抵抗膜の1枚に電圧を印加させておくことで、押下した位置に応じてもう1枚に電圧が生じ、これにより押下位置を検出する。欠点として、金属薄膜を2枚要することから透明度が劣ることが挙げられる。検出対象には基本的に制限はないが、ディスプレイに表示する操作対象が小さい、あるいは複雑であるといった場合に、検出精度を高めるためにペンのような接触面積が小さいものを使用することもある。また、面積が大きくなると検出精度が下がるため、複数のエリアに分割して検知するものもある。

### 弾性表面波方式 [63]

弾性表面波を用いて位置検出を行う。ディスプレイの隅に圧電素子を取り付け、弾性表面波を伝播させる。ディスプレイに触れると伝播した波は吸収及び反射するため、検波用の圧電素子の電圧の有無と反射時間から位置を検出できる。検出対象が指等の弾性表面波を吸収できるものに限られるという欠点がある。

### 赤外線方式 (光学式)

赤外線 LED を光源として用いる方式で、位置検出の方法にはいくつか種類がある。一つは赤外線 LED・センサをディスプレイの4辺に多数取り付け、検出対象が赤外線を遮断することで位置検出を行うものである。この方式は精度を高めるために多数の素子を必要とするため、大面積には不向きである。また、液晶パネル自体に赤外線センサを内蔵し、位置検出を行うものもある。加えて、ディスプレイの上端に赤外線 LED・センサを2つ取り付け、三角測量により位置検出を行うものもある。この方式は安価に大面積化ができ、近年の大面積タッチパネルはこの方式を採用したものが多い。パネルに直接触れることなく操作できることから、手袋等を装着していてもタッチ操作が可能である。しかしながら、外光の影響に弱いという欠点を持つ。

### 静電容量方式

表面型と投影型の2つがあり、どちらも指先とパネル側に取り付けられた導電膜との間の静電容量の変化を捉えて位置検出を行う。静電結合は指がセンサ表面に近づくだけで生じるため、接触前のカーソル操作も可能である。欠点として、検出対象は静電的な導電性を有する物体に限られる。

#### 表面型

シンプルで低コストな方法であり、大型のパネルで用いられることが多い。ガラス基板の上に導電膜、その上に絶縁体の保護カバーを重ねた構造で、ガラス基板の4隅には電極が取り付けられる。電極に電圧を掛けてパネル全体に均一な電界を発生させ、検出対象が表面に触れた際の静電容量の変化を4隅で測定することで位置検出を行う。

### 投影型

表面型に比べて大画面には向かず、小さなパネルサイズのものに用いられる。ガラス基板の上に縦横 2 層の特定パターンが並んだ透明電極層、その上に絶縁体の保護カバーを重ねた構造である。検出対象が近付くと複数の電極間の静電容量が同時に変化するため、この比率を測定することで高精度な位置検出が可能である。配線や端子数が多く、制御用の IC を必要とするため高コストであるが、マルチタッチ (多点検出) が可能であり実用性が高い。

近年のスマートフォン端末をはじめとした携帯機器のほとんどはマルチタッチ機能に対応する投影型の静電容量方式を採用している。加えて、コンピュータ OS においてマルチタッチ対応の API が標準対応となりつつある。また、端末の小型化や低消費電力化が進められており、近年では折り曲げが可能なタッチパネル [64] が開発されており、これを用いた薄型タブレット端末の開発も行われている [65]。

#### 4.4.1.2 ペンタブレット

ペンタブレット (英: graphics tablet) とは、GUI を用いたコンピュータインターフェースの一つである。一般的なペンタブレットを Fig. 4.5 に示す。本体である板状のタブレット部分上をスタイラスペンと呼ばれる専用のペン型入力装置によってなぞることで、ペンの位置を読み取り、画面上のポインタ (カーソル) を操作する。ペンの位置検出には電磁誘導方式 (電磁授受作用方式) が用いられており、タブレットとスタイラスペン先端に設置されたコイルの磁場変化による誘導電流によりスタイラスペンの位置検出を行う。多くのタッチパネルが接触により位置検出を行っているが、ペンタブレットは非接触で位置検出を行い、また接触の有無はスタイラスペン先端のスイッチが押し込まれることにより検出される。マウスに比べて繊細かつ正確なポインタ操作が可能であり、コンピュータ上でのイラスト・絵画の製作に用いられる。また、ペン型入力装置には筆圧や傾きを検出可能なものもある。これまで、画面出力とペン入力を同時に行うインターフェースはタッチパネルをペン操作するものが主流であったが、近年ではペンタブレットに液晶ディスプレイを統合した液晶ペンタブレットもあり、画面上に直接描画することでより直感的かつ正確な操作が可能である。

#### 4.4.1.3 触覚・皮膚感覚の適用例

現在、タッチパネルやペンタブレットが携帯電話や携帯ゲーム機に搭載されたことで、急速に普及している。しかしながら、タッチパネルではマウスのクリック操作をタッチ操作により行うため、操作したときのクリック感がなく、入力できたのかがわかりにくいという問題点がある。このためタッチ操作時に音を出す、バイブレーションにより振動を与えるといった聴覚・触覚によるフィードバックがパナソニック株式会社デバイス社や SMK 株式会社





Fig. 4.5 Graphics tablet (Wacom bamboo, from Wacom's website [66])

等で行われている [67][68][69] もの、満足に操作するには不十分である [62]。また、Tactus Technology 社ではタッチスクリーンの液晶画面に流体を流す層を配して膨らませることによる物理ボタンの形成が試みられている [70][71]。Artificial Muscle, Inc. 社ではタッチパネルの下面に電場応答高分子型人工筋肉を配置した触覚フィードバックの提示が試みられている [72][73]。Senseg Ltd. 社では静電気力を利用した触感提示について試みられており [74][75]、これを用いたタッチパネル端末について東芝情報システム株式会社にて開発が進められている [76]。これらに加えて、Apple Inc. 社ではタッチパネル全面に小型の圧電素子を格子状に形成し動作させることによる触感フィードバックの再現 [77] が試みられ、京セラ株式会社ではタッチパネルの4辺に圧電素子を配し振動させることでクリック感や押し込み感の再現が試みられている [78][79] が、いまだ実用化はなされていない。また、イラスト・絵画製作に用いられるペンタブレットにおいては使用者がイラストレータ・画家であることが多い。従来これらの人々は実際にペンと紙を使用していたが、ペンタブレットはタブレット面がプラスチックやガラスであり、凹凸がないため書き味に違和感を抱くユーザーが多い。このため、よりリアルな感覚を提示することが課題の一つである。このようなペンタブレットの使用感を向上させる研究・開発もなされている。使用感の向上について、タブレット面の感触を変更するものとペン先を変更するものに分けることができる。前者は、例えば凹凸や柔らかさを有するシートを使用することで実際の紙の質感に近付け、後者はペン先をフェルトなどの他の材質のものへ

交換することでサインペンのような書き味に近付けることができる。しかしながら、ある程度の書き味の変更は可能ではあるものの満足のある再現はできておらず、また自由度に劣る。特に、液晶ペンタブレットにおいてはタブレット面と液晶ディスプレイが統合されているため、シートの使用は透明度の悪化を招く。

こうした直感的なインターフェースの問題点を解決し、使用感・ユーザビリティを向上させることが今後重要であると考えられる。これまで、皮膚感覚ディスプレイを統合することで触覚のフィードバックを組み合わせ、使用感の向上が図られている。西野らは力覚提示デバイスを用いて筆圧を再現することで、書道・毛筆における書き味の再現を試みている [80]。Kuchenbecker らはスタイラスベースの力覚提示デバイスに関する研究を行っており、これまでに力覚フィードバックによってタッピングする際に得られる感覚が向上することが報告されている [81]。Wintergerst らはペンコンピューティング用の力覚提示スタイラスのプロトタイプを開発している [82]。このデバイスでは先端にコイルによるブレーキを取り付けたボールペンを用い、ボールの摩擦力を変化させることで力覚提示を行う。また、実際の触覚は伴わないが、渡邊らは視覚情報によりブラシの毛先を画面上に表示することで、ペン型のインターフェースの使用感・リアリティ向上を目指した研究を行っている [83]。本研究では、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを対象としているが、これまでに次のような提案・研究がなされている。

#### ペンタブレットへの適用

これまで、吉らによってペンの位置検出にカメラを用いたペンタブレット型の皮膚感覚提示インターフェースが研究されている [84][85]。インターフェースの写真を Fig. 4.6 に示す。カメラが液晶ディスプレイ上に設置され、使用者が再帰性反射シールを貼り付けたペンを用いてなぞり動作を行う。カメラから画像を取得し、二値化処理を行うことで、ペンの位置を検出する。位置検出を一定時間間隔で繰り返すことで、差分よりペンのなぞり速度を算出する。また、弾性表面波振動子の透明という特徴を活かし、液晶ディスプレイの表面に振動子を構成する。これにより、皮膚感覚情報と視覚情報とを同時に提示することが可能である。

#### タッチパネルへの適用

シート状の超音波振動子を使用した皮膚感覚ディスプレイが提案され、タッチパネルを搭載する端末への適用を行った [86][87][88]。シート状超音波振動子を適用したタッチパネル搭載端末の写真を Fig. 4.7 に示す。端末上に薄いガラスが貼り付けられ、その上に弾性表面波振動子をカップラントを介して貼り付ける。ガラスの厚さは弾性表面波の波長よりも薄いため、振動子に交流電圧を印加すると弾性表面波とは異なるモードの振動がガラス全体に生じる。これまで、使用する薄ガラスの材質や厚さについて検討がなされており、0.3mm 厚の石英ガラスに 9.60MHz の弾性表面波振動子を貼り付けた際

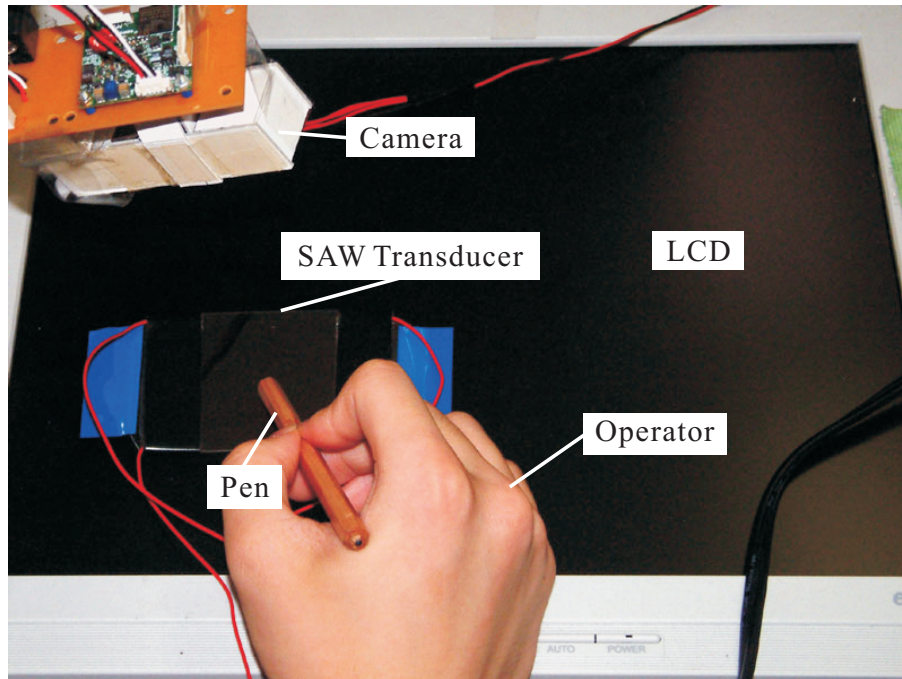


Fig. 4.6 Pen tablet type interface using SAW tactile display[85]

にガラス全体が強く振動し、スライダ越しになぞり動作を行い皮膚感覚が提示できたことが確認された [89] .

本研究ではペンタブレット型の皮膚感覚ディスプレイを対象として更なる研究を行った．従来のカメラを用いた位置検出には、光の変化に弱い、使用者がカメラを遮ってしまうといった問題があった．このため、市販のペンタブレットを用いることでペンの位置検出方法の解決を行い、ペンタブレットの使用感向上を図った．

## 4.4.2 ペンを用いる皮膚感覚ディスプレイ

### 4.4.2.1 原理

ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの基本構成を Fig. 4.8 に示す．指でなぞり動作を行うアクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでは、振動子上にアルミフィルムからなるスライダを取り付け、スライダ越しになぞり動作を行うことで使用者に粗さ感覚の提示を行った．ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでは、従来のアクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの構成をそのまま利用し、指の代わりにペンを用いてなぞり動作を行う．ペンの先端には弾性表面波の機械振動を利用するためスライダが取り付けられる．ここで、スライダはアルミフィルムとゴム膜から構成される．ゴム膜は歪エネルギーを蓄積・開放しやすくするために用いた．弾性体であるゴム膜が従来の皮膚感覚ディス

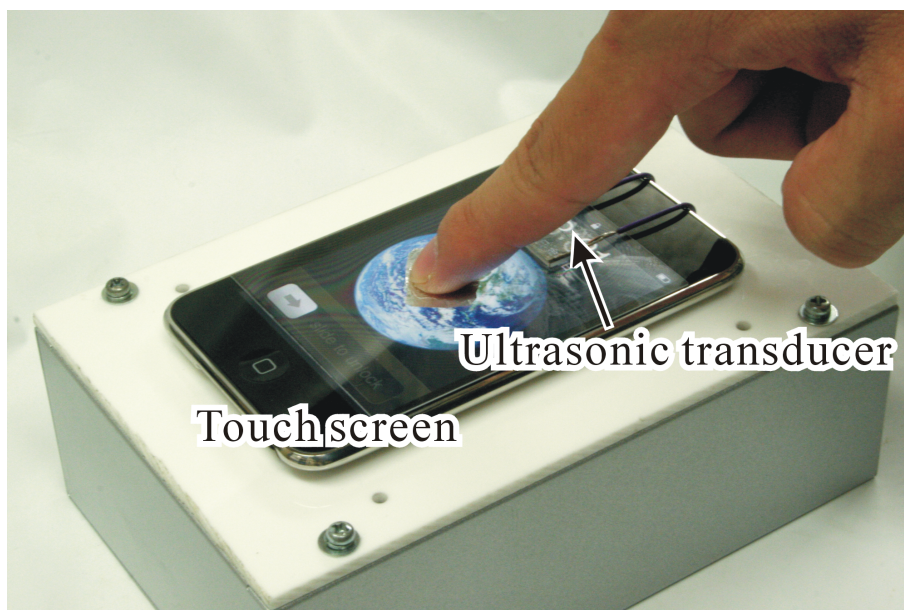


Fig. 4.7 Tactile touch screen using sheet-like ultrasonic transducer[88]

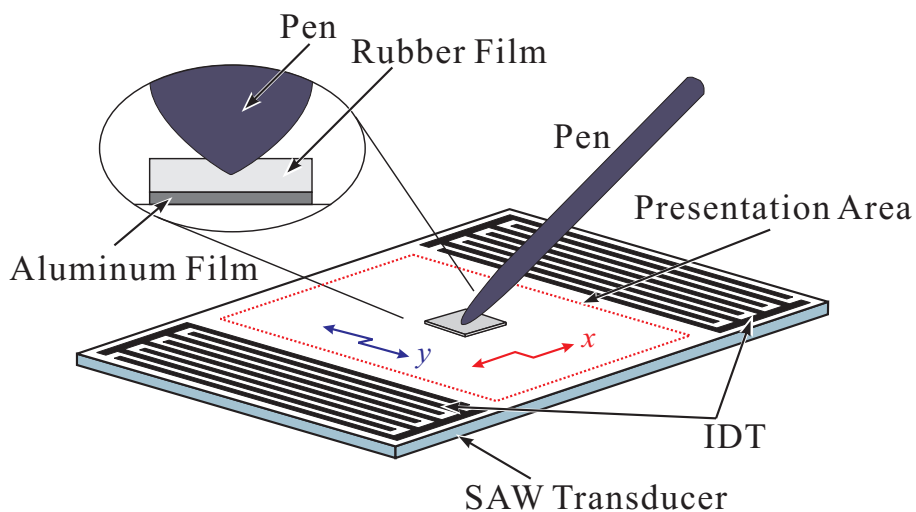


Fig. 4.8 Pen tablet type SAW tactile display

プレイにおける指の皮膚に相当し，ペンが指の骨格に相当する．ペンの先端に摩擦変化が生じるとペンに振動が生じ，この振動によりペンの把持部分に振動が伝達される．

#### 4.4.2.2 振動子の構成

ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイで使用する大面積弾性表面波振動子を Fig. 4.9 に示す．Fig. 4.9 において，電極部分は保護用のビニールテープの下部に形成されて



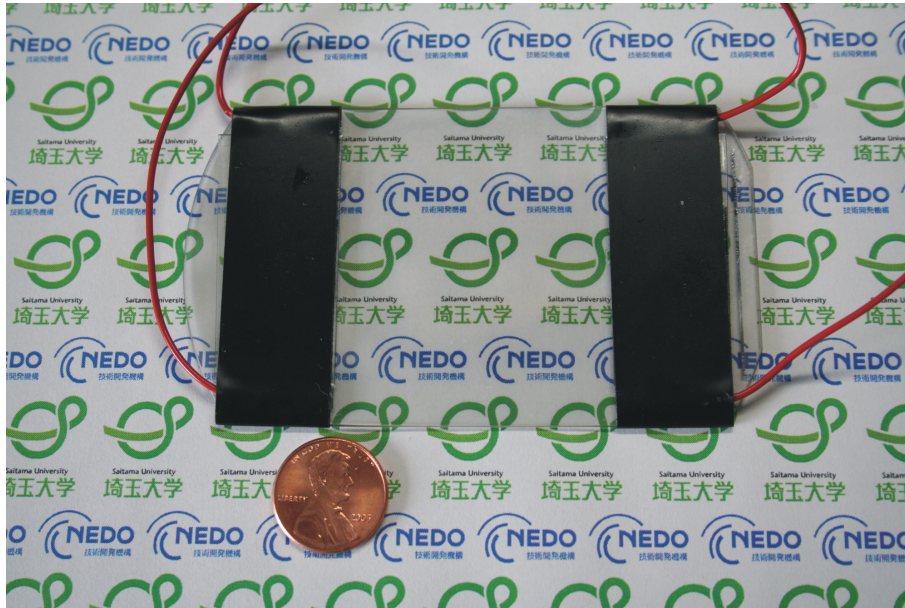


Fig. 4.9 Large-size SAW transducer

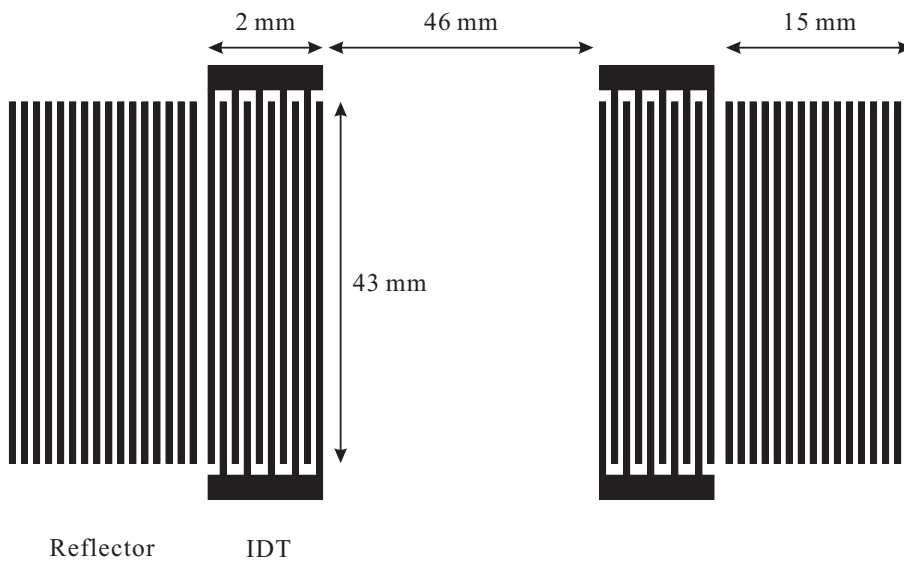


Fig. 4.10 Dimension of large-size SAW transducer

いる．振動子の寸法を Fig. 4.10 に，電極の仕様を Table 4.1 に示す．振動子は 10 対の交差指電極からなる IDT2 つと 120 本の OMSA からなる反射器 2 つとで構成される．振動子の共振周波数は 15.14MHz であり，定在波が形成される領域は 46mm×43mm である．4 インチの LiNbO<sub>3</sub>(128°Y-X) 基板にパターンを形成し，切り出して製作した．

Table 4.1 Specification of electrodes

	Metal strip width	Pitch	
IDT	63 $\mu\text{m}$	127 $\mu\text{m}$	10 finger pairs
Reflector (OMSA)	100 $\mu\text{m}$	130 $\mu\text{m}$	120 strips

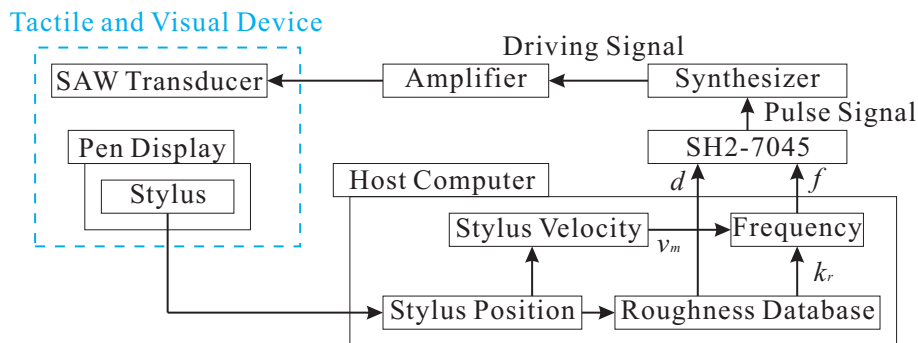


Fig. 4.11 Control system of pen tablet type SAW tactile display

#### 4.4.2.3 制御システム

ペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイの制御システムを Fig. 4.11 に示す．基本的な制御システムは従来のアクティブタイプ皮膚感覚ディスプレイと同様のものを用いる．ペンタブレットによりペンの位置はコンピュータ上のポインタ位置となる．制御回路はホストコンピュータに実装される．制御回路では一定時間毎にペンの位置を検出し，ペンの位置及び計測時間間隔によりなぞり速度  $v_m$  を算出する．ペンの実際の位置は，コンピュータ上のポインタ位置と液晶ディスプレイの画素ピッチより算出される．ペンの位置に応じて，コンピュータ内にて予め決定した粗さ情報  $k_r$  により出力される振動の周波数  $f$  を (4.1) 式により決定する．コンピュータ上にてパラメータ ( $k_r$  及び  $d$ ) を適宜書き換えることで様々な粗さ感覚を提示することが可能である．マイコンから出力された矩形波はシンセサイザのトリガに用い，Hレベルのときに弾性表面波の駆動信号を出力する．このバースト信号はアンプに入力され，増幅されて弾性表面波振動子に印加される．

#### 4.4.2.4 視覚情報との統合

従来の液晶ディスプレイ上に配置するペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイの延長として，液晶ペンタブレットへの適用を行った．液晶ペンタブレットはペンタブレットに液晶ディスプレイが組み合わされたもので，汎用のコンピュータインターフェースである．液晶ペンタブレットはペンタブレットと基本的な原理は同じで，スタイラスペンの位置検出方法としては

電磁誘導方式を用いている．このためカメラを用いることなくペンの位置検出が可能である．液晶ペンタブレットには，Wacom 社の DTI-520 U Model を使用した．DTI-520 U Model の仕様 (抜粋) を Table 4.2 に示す．電磁誘導方式は非接触の位置検出方式であり，ディスプレイ上から数 mm 上方での位置検出が可能である．すなわち，液晶ペンタブレット上へ弾性表面波振動子の取り付けでも，ペンタブレットとしての機能を損なうことがない．弾性表面波振動子の駆動による電界の発生がペンタブレット及び液晶ディスプレイに影響を及ぼすことも考えられるが，駆動周波数が 10MHz~15MHz と非常に高周波であるため，ペンタブレット・液晶ディスプレイともにノイズとして扱われ，組み合わせて使用する上で影響は確認されなかった．液晶ペンタブレットと弾性表面波振動子を組み合わせ，実際に皮膚感覚ディスプレイとして使用している際の様子を Fig. 4.12 に示す．

Table 4.2 Specification of Wacom DTI-520 U Model[66]

LCD display	
Screen size	304.1×228.1mm
Screen resolution	1024×768
Pixel pitch	0.297×0.297 mm
Video interface	VGA video-in, Composite video-in
Graphics tablet	
Detecting system	Electro-magnetic
Report rate	100 point/sec
Data interface	USB

#### 4.4.2.5 デモンストレーション用ソフトウェアの開発

液晶ペンタブレット上で皮膚感覚ディスプレイの駆動を行うため，Microsoft Visual Studio 2005 を使用し，Visual C++ によって Windows 上で動作するアプリケーションを製作した．製作したソフトウェアの動作画面を Fig. 4.13 に示す．3色の四角いパネルをスタイラスペンでなぞることにより，粗さ感覚が提示される．粗さ感覚のパラメータはパネル毎に異なる設定が可能である．

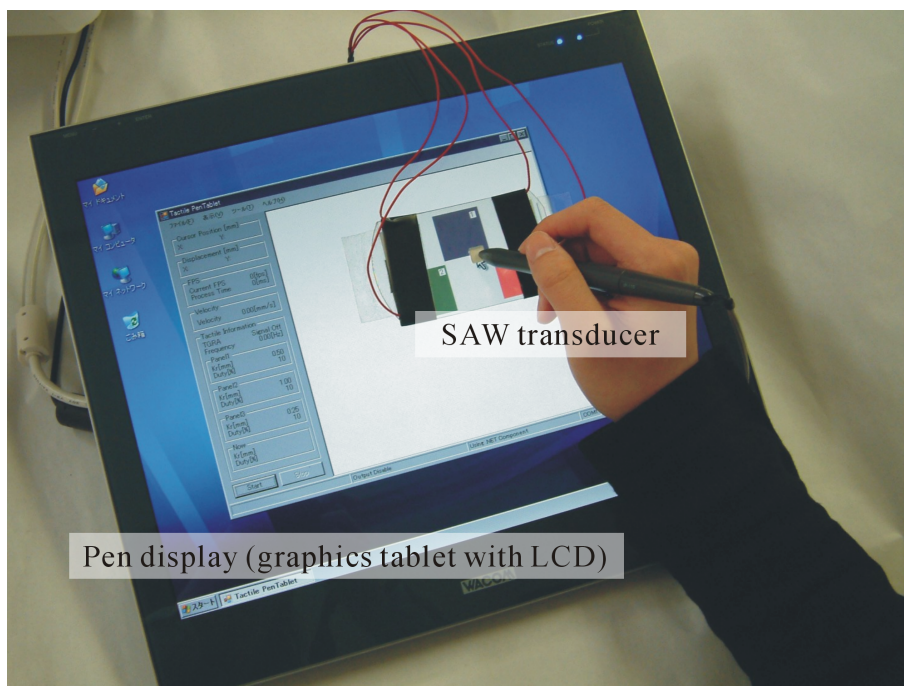


Fig. 4.12 SAW tactile display with pen display

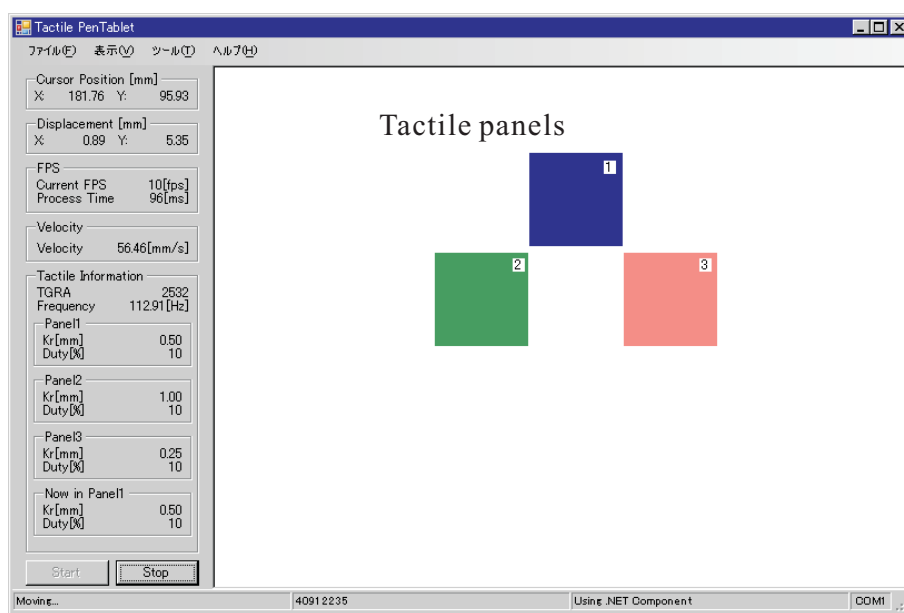


Fig. 4.13 Demonstration software for tactile display



## 4.4.2.6 皮膚感覚提示実験

製作したソフトウェアを使用し、スタイラスペンを用いてなぞり動作を行った際に粗さ感覚の提示が可能かどうか被験者(29人)に対し弁別実験を行った<sup>\*1</sup>。被験者に対しては、以下のような質問を行った。

- (1) 無地の部分と色付きのパネルの部分とで得られる感覚が違うか
- (2) 色の違うパネル3つそれぞれ得られる感覚に違いはあるか
- (3) 得られた感覚はどのような感覚か(もし似たような感覚等で表せるならば)

実験中は画面上に粗さのパラメータ等は表示せず、被験者はパネルの色の違いのみ認識できる状態とした。また、パネルの色に対応する粗さのパラメータを Table 4.3 に示す。被験者の分布を Table 4.4 に示す。実験の結果、全ての被験者が(1)の質問にパネル上で粗さ感覚が得られたと答えた。また、被験者のうち表の(a)に示す被験者(29人中24人)が(2)の質問にパラメータの違う3箇所の粗さの違いを判別できたと答えた。これにより、市販の液晶ペンタブレットに皮膚感覚ディスプレイを組み合わせることで、ペン越しに粗さ感覚の提示が可能であることが確認された。また、(3)の質問に対し、「チャコペン<sup>\*2</sup>で布地をなぞっている感覚」、「硬筆用の鉛筆<sup>\*3</sup>で硬筆用の下敷き<sup>\*4</sup>をなぞっている感覚」等、人により様々な答えとなった。このことから、粗さ感覚の感じ方には個人差が非常に大きいですが、比較的軟らかめの粗さ感覚として認識していたことがわかる。この理由として、スライダにゴムを用いていたため、もしくは直接ではなくペンを介した振動であるため等が考えられる。

Table 4.3 Parameters of panels

Color	$k_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	d [%]
Blue	500	10
Green	1000	10
Red	250	10

<sup>\*1</sup> 本実験実施時には埼玉大学の倫理規則が施行されておらず、倫理委員会は設置されていなかったが、本実験において特に個人情報記録しておらず、得られた情報は匿名化されていたことを付記する。

<sup>\*2</sup> 裁縫に用いる水性インクを用いた布地用印付けペン

<sup>\*3</sup> 硬度が5Bや6Bの軟らかい芯のもの

<sup>\*4</sup> ゴム製で厚手のもの

Table 4.4 Distribution of subjects

Age	Male	Female	Total
10	8	3	11
20	1	0	1
30	0	4	4
40	4	6	10
50	2	1	3
Total	15	14	29
(a)	11	13	24

#### 4.4.2.7 ペン先の統合によるユーザビリティ向上

製作したペンタブ型皮膚感覚ディスプレイでは、液晶ペンタブのスタイラスペンを用い、アルミフィルムとゴム膜からなるスライダ越しになぞり動作を行うことで粗さ感覚を感じることができる。しかしながら、スライダの位置を意識してスタイラスペンを扱う必要があるため、ペンタブ自体のユーザビリティは劣ってしまう。そこで、スライダをスタイラスペンと一体化させることでペンタブ型皮膚感覚ディスプレイのユーザビリティの向上を図った。また、皮膚感覚の提示には摩擦の変化を用いているため、スタイラスペンの先端と振動子との接触面積が提示可能な感覚の幅を狭めていることが予想される。これまではスタイラスペンに使用している芯は直径 1.5mm と接触面積が小さく、スライダを介した際にもゴム膜が変形して周辺部が浮き上がり、点接触に近くなっていた。そこで、液晶ペンタブを Wacom 社の Cintiq 12WX に変更し、接触面積の拡大が可能なマーカーペン (Wacom 6D Art Pen) を使用しスライダを統合した。Cintiq 12WX の仕様 (抜粋) を Table 4.5 に示す。

マーカーペンの芯 (ニブ) は幅広な形状をしており、芯先は  $5 \times 1.5$  mm の長方形である。このため、十分に広い接触面積を確保することができる。スライダを統合したニブ (以降、スライダニブと呼ぶ) を Fig. 4.14 に、マーカーペンに取り付けた様子を Fig. 4.15 に示す。取り外したフェルト部分と同様の形状にシリコンゴムを加工した。加工したシリコンゴムの表面にアルミフィルムを巻き付け、その後、ニブに接着した。

スライダを統合したマーカーペンを用い、皮膚感覚の提示実験を行ったところ、スライダを使用した際と同様に粗さ感覚の提示が確認できた。従来のスライダ越しにスタイラスペンを用いてなぞり動作を行っている様子とスライダを統合したマーカーペンを用いてなぞり動作を行っている様子の比較を Fig. 4.16 に示す。スライダをスタイラスペンに統合することで、

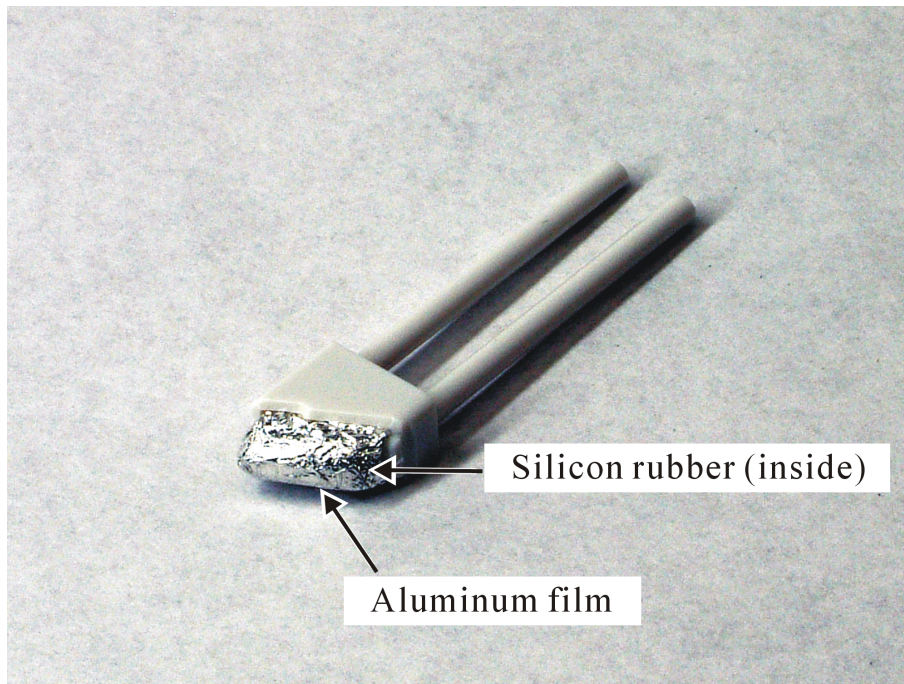


Fig. 4.14 Slider nib for SAW tactile display



Fig. 4.15 Marker with slider nib

Table 4.5 Specification of Wacom Cintiq 12WX[66]

LCD display	
Screen size	261.12×163.2 mm
Screen resolution	1280×800
Pixel pitch	0.204×0.204 mm
Video interface	DVI-I video-in
Graphics tablet	
Detecting system	Electro-magnetic
Report rate	133 point/sec
Data interface	USB

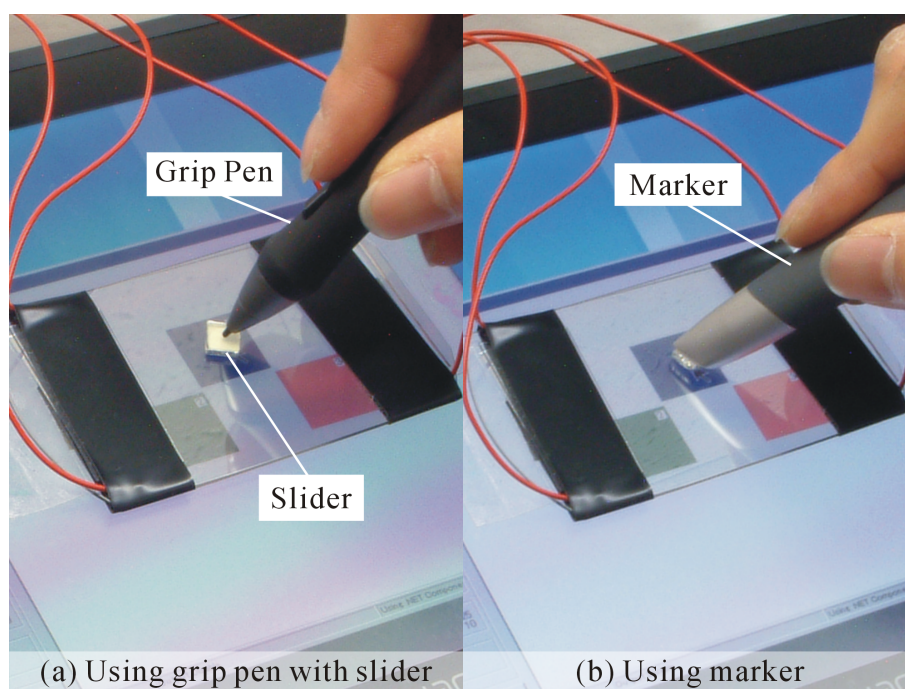


Fig. 4.16 Comparison of tactile display with/without slider

ディスプレイの使用者はスライダを意識することなく通常のペンと同様にペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイを扱うことができる。加えて、これまではスライダが落下するため皮膚感覚ディスプレイを水平にして使用していたが、スライダの統合によりディスプレイの設置角度の制限をなくすことができた。このことから、ペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイのユーザビリティを向上することができた。



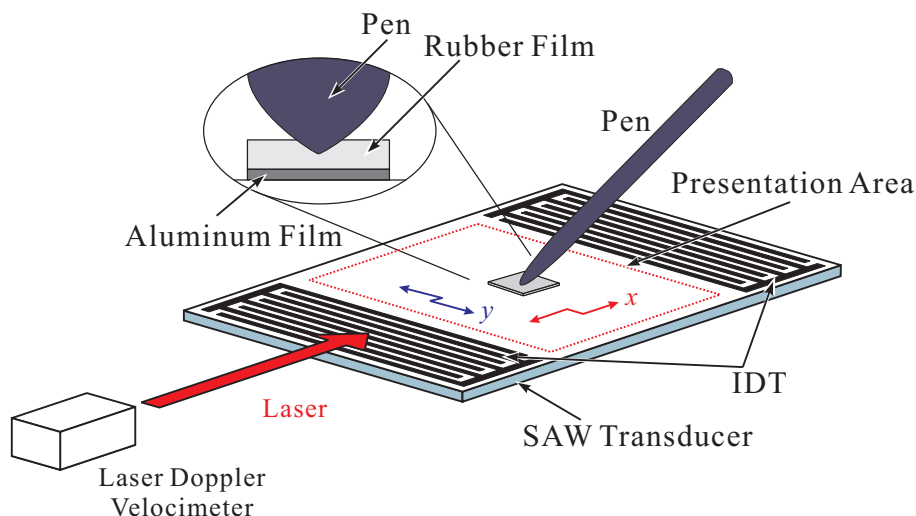


Fig. 4.17 Experimental configuration of measuring pen velocity

#### 4.4.2.8 速度変化の測定実験

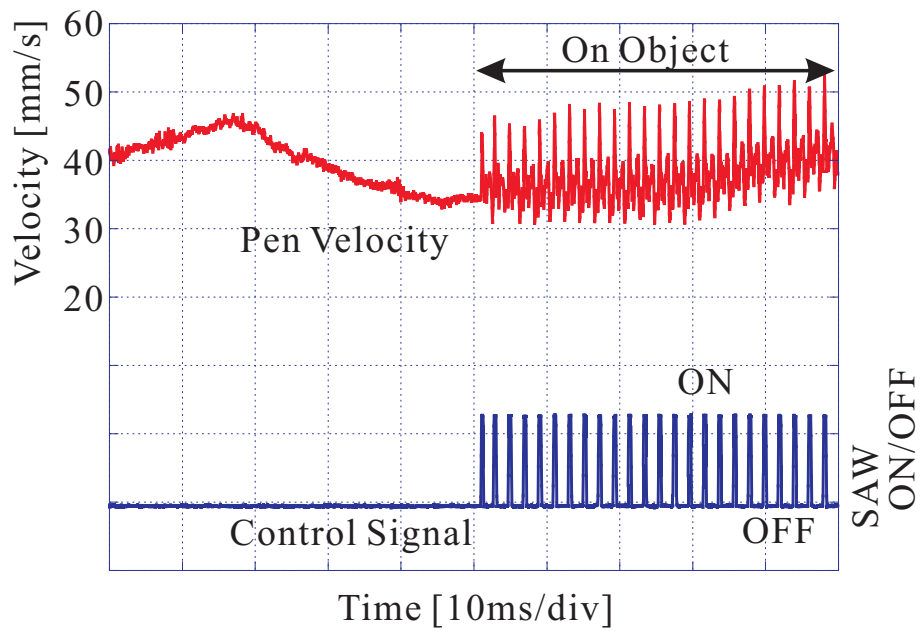
スライダを統合したマーカーペンを用いてなぞり動作を行った．なぞり動作中に弾性表面波の ON/OFF を行い，このときのペンの速度変化を観測した．実験構成を Fig. 4.17 に示す．ペンの速度の測定にはレーザードップラー振動速度計 (PI Polytec OFV-3001 OFV-353) を用いた．得られた結果を Fig. 4.18 に示す．図中の赤線がペンの速度で，青線が弾性表面波の制御信号である．弾性表面波の制御信号が ON のとき，ペンが加速し，OFF になるとペンが減速，結果として制御信号の周波数でペンが振動したことがわかる．

## 4.5 周波数スペクトルへの着目による提示感覚の改善

### 4.5.1 不自然さの原因

指でなぞるタイプのアクティブタイプ皮膚感覚ディスプレイやペンを用いるペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイを用いて，粗さ感覚の提示が可能なが確認された．しかしながら，ディスプレイの体験者からは「得られる感覚が不自然」といった感想も得られた．インターフェースとして実用化を行う上で，より自然な感覚の提示が必要であると考えられる．

この不自然な粗さの原因として，振動の周波数に因るものと考えられる．仮に一定速度でなぞり動作を行った場合，(4.1) 式よりなぞり速度  $v_m$  が一定となるため振動の周波数  $f$  は一定となる．ここで，普段我々が触れる機会の多い，身近な「ざらざら」した粗さ表面について考えてみる．一定間隔で繊維が編まれた「布地」や，番手によって砥粒の大きさの異なる「紙やすり」のような粗さ表面がある．しかしながら，これらの粗さ表面を微視的に見ると，

Fig. 4.18 Pen velocity ( $k_r=100\mu\text{m}$ ,  $d=20\%$ )

平均の粗さはあるものの、一つ一つの突起間隔は一定ではない。また、このような粗さ表面上においてなぞり動作を行うとき、布地や紙の伸縮等も生じる。これまでの制御方法において提示可能な一定突起間隔の粗さ表面は「粗さ試験片 (グレーティング)」のような表面に限られ、またそのような物体は身近ではないため「不自然な粗さ」という感想が得られたのではないかと考えられる。そこで、本研究では「ランダム性を有する粗さ」が「自然な粗さ」とであると仮定し、このような粗さの提示を目的とする。

#### 4.5.1.1 粗さの定義

一般的な粗さ表面の一例として、前項において「布地」や「紙やすり」を例に挙げた。ここで、これらの粗さ表記について本項にて説明する。

##### 布地

布地とは、繊維を薄い板状に加工したものであり、作り方によって織物、編み物、レース、フェルト、不織布に分けられる。使用する繊維の種類、織り方、編み方により性質が異なる。織物の基本的な織り方の一つに「平織り」があり、これは縦糸と横糸とを交互に浮き沈みさせて織る方法である。この平織りは丈夫で摩擦に強く、織り方も簡単であるため広く応用されている。本研究にて実験に用いた「キャンバス地」は、帆布 (canvas) のことであり、油彩を描くために用いられる。キャンバス地は一般的には上述した平織りで織られることが多く、麻の繊維が用いられる。粗さについては「荒目」や「中目」、「細目」といった分け方がなされており、明確な規格化はされていないものの、「1cm 辺りの糸 (縦糸及び横糸) の本数」が明記されていることが多い。

##### 紙やすり

紙やすり (sandpaper) とは、紙状のシートに研磨材 (砥粒) を塗布した工具であり、研磨加工に用いられる。使用される研磨材の粒度によって粗さが表記され、これは番手と呼ばれる。粒度は JIS によって規格化されており、粒度の番号の先頭に「P」を付けて表記する [90]。粒度によって使用する研磨材の材質は異なる [93]。また、粒度によって製作方法が異なり、12 番 (P12) から 220 番 (P220) までは「ふるい」を使って研磨材の大きさの選別を行う [90][91]。ふるいは 5 段階あり、それぞれ網の目の開きが異なる。Table 4.6 に 12 番から 220 番までの粒度と 5 段目のふるいの目の開きを示す。また、240 番から 1200 番までは「沈降試験方式」により選別を行う [90][92]。Table 4.7 に 240 番から 1200 番までの粒度と最大粒子径及び累積沈降高さ 95% の粒子径を示す。1500 番から 2500 番までは「沈降試験方式」もしくは「電気抵抗試験方式」によって選別を行う [90][92]。これらの選別方法によって得られる粒子径の範囲はそれぞれ異なるため、注意が必要である。Table 4.8 に沈降試験方式によって選別された 1500 番から 2500 番までの粒度と最大粒子径及び累積沈降高さ 95% の粒子径を、Table 4.9 に電気

抵抗試験方式によって選別された同様のデータを示す。

これらから，一般的に粗さを持つ物体表面はある程度基準となる粗さ（突起間距離）があるものの，その値は一定ではないことがわかる．布地であれば織るときの力の加え方，紙やすりであれば砥粒の大きさのばらつきがあり，そしてこれらの物体表面においてなぞり動作を行う場合は物体の伸縮等が影響する．

Table 4.6 Mesh size (#12 – #220) from JIS R 6010[90]

Grit number	Mesh size [ $\mu\text{m}$ ]
12	1400
16	1000
20	710
24	600
30	500
36	425
40	300
50	250
60	212
80	150
100	125
120	90
150	75
180	63
220	53

#### 4.5.2 時系列に着目した制御システム (テレタッチ)

物体をなぞった時の振動波形に着目し，時系列ベースで同じ振動を生成することができれば，実際になぞったものと同じ振動を得ることができる．この方法を遠隔地において用いることで，皮膚感覚を伝達することが可能となる．これは「テレタッチ」と呼ばれ，「テレフォン」や「テレビジョン」と同様に遠隔地の情報を伝達することでバーチャルリアリティやマスタースレーブ型ロボットの遠隔操作等への応用が期待されている [94][95]．

これまで，藤井らにより物体表面の表面形状を針により走査し，これを AM 変調 (amplitude modulation: 振幅変調) により弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ上に再現する手法が提案され



Table 4.7 Particle size (#240 – #1200) from JIS R 6010[90]

Grit number	Maximum particle size [ $\mu\text{m}$ ]	95% of particle size (minimum) [ $\mu\text{m}$ ]
240	110	44.5
280	101	39.2
320	94	34.2
360	87	29.6
400	81	25.2
500	77	21.5
600	72	18.0
800	67	15.1
1000	63	12.4
1200	58	10.2

Table 4.8 Particle size (#1500 – #2500, by precipitation test) from JIS R 6010[90]

Grit number	Maximum particle size [ $\mu\text{m}$ ]	95% of particle size (minimum) [ $\mu\text{m}$ ]
1500	58	8.3
2000	58	6.7
2500	58	5.4

Table 4.9 Particle size (#1500 – #2500, by electric resistance test) from JIS R 6010[90]

Grit number	Maximum particle size [ $\mu\text{m}$ ]	95% of particle size (minimum) [ $\mu\text{m}$ ]
1500	30	5.5
2000	20	4.0
2500	18	3.0

ている [94][95] . また , 中鉢らにより指を模したスキャナ (指ダミー) の製作が行われている [96] . この指ダミーを用いて物体表面をなぞり , 得られた振動の皮膚感覚ディスプレイ上への再現が試みられている . 指ダミーには振動を電気信号に変換するための歪ゲージが埋め込まれており , またウレタン樹脂 (エクシールコーポレーション製人肌ゲル) を用いて形作られている . 人の指を模すためにウレタン樹脂は硬度の異なる樹脂を用いた 2 層構造となっており , 硬度比が人の指の表皮・真皮の縦弾性係数比と等しくなっている . また , 中心部には骨が埋め込まれ , 形状は人の指のレントゲン写真を再現し , 材質には縦弾性係数の近いヒノキが用いられ

ている．加えて，関節部分にシリコンゴムを埋め込むことによる違いについて実験及び考察がなされている [97]．この指ダミーを用いて粗さ試験片の表面をなぞった結果から伝達関数の同定を行い，AM 変調を用いた制御を行うことで弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ上での振動の再現が試みられている．

加えて，ペン型皮膚感覚ディスプレイについても時系列ベースの振動の再現が試みられている [101]．これまで，スキャナ（ペン型スキャナ）が製作されている．ペン型スキャナには市販のペンを用い，ペン先はシリコンゴムに入れ替えて使用されている．また，ペン型スキャナには加速度センサとジャイロセンサが取り付けられ，ペンの振動を電気信号に変換する．これまで，ペン型スキャナを用いて粗さ試験片をなぞった結果から，ジャイロセンサのみで振動の取得が可能であることが確認されている [98]．また，実際に伝達関数の同定を行い，制御系への実装が行われている [99]．加えて，制御信号の保存・再生が行われ，テレタッチの実現がなされている [100]．粗さ試験片を含む様々な物体表面をなぞり，AM 変調を用いた制御を行うことで弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ上での振動の再現が行われている [102]．

### 4.5.3 周波数スペクトルに着目した制御システム

本研究では，これまで行われてきた時系列ベースの粗さ感覚の再現とは異なるアプローチとして，周波数スペクトルに着目した制御システムを提案する．この制御システムでは，生成される振動の時間軸波形ではなく，振動の周波数スペクトルに着目する．実際の粗さ表面をなぞった際の振動の周波数スペクトルに似せた振動を生成することで，弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにより得られる振動をより自然なものとする．

#### 4.5.3.1 得られる振動の比較

実際に「粗さ」を持つ物体表面として，以下の物体を用いてなぞり動作を行った．

- ・ キャンバス地 (およそ 1mm の繊維間隔)
- ・ 紙やすり (#80)

なぞり速度を一定とするため，これらを自動ステージに取り付け，約 1N の荷重でペンを押し付けた際のペンの振動を取得した．自動ステージを移動させ，ペンの振動はレーザードップラー振動速度計 (PI Polytec OFV-3001 OFV-353) を用いて測定した．キャンバス地をなぞった際の測定結果を Fig. 4.19 に示す．図中の赤線はペンの速度変化である．また，得られた速度変化の波形の FFT 解析結果を Fig. 4.20 に示す．紙やすり (#80) をなぞった際の測定結果を Fig. 4.21 に，得られた速度変化の波形の FFT 解析結果を Fig. 4.22 に示す．

一方，実際の弾性表面波皮膚感覚ディスプレイをペンでなぞった際についても同様の構成を用いて実験を行った．皮膚感覚ディスプレイの制御パラメータは  $k_r=1.25\text{mm}$ ， $d=20\%$  とし

た．このときの測定結果を Fig. 4.23 に示す．図中の赤線はペンの速度変化，青線は弾性表面波の ON/OFF の制御信号である．また，得られた振動波形の FFT 解析結果を Fig. 4.24 に示す．

これらの FFT 解析結果を比較すると，実際の粗さ表面をなぞった場合に比べ，皮膚感覚ディスプレイをなぞった場合において一定周波数間隔のピークが確認できる．これはなぞり速度を一定としたときの振動周波数が一定となるため，この周波数を基本周波数とする高調波であると考えられる．ペンでなぞった際の速度変化からは，加速の極値後に振動が確認できる．この振動についてはペンを把持している際の回転による慣性モーメントの影響であると考えられる．

一方，このようなピークは実際の粗さ表面をなぞった際の FFT 結果からは観測されなかった．実際の粗さ表面をなぞった際の結果を見ると，キャンバス地をなぞった際の結果からはピークの周波数が 50Hz 付近に見られる．キャンバス地に対する平均のなぞり速度がグラフより 10mm/s であるとすれば，繊維の間隔は 1mm であるため，振動の周波数は 10Hz 程度になると考えられる．これに対し結果は異なっているが，この原因としてキャンバス地の伸縮性が影響したと考えられる．

また，紙やすりをなぞった際には明確なピークは確認できなかった．Table 4.6 より，#80 の紙やすりでは粒子径は  $150\mu\text{m}$  以下となるため，平均のなぞり速度がグラフより 40mm/s であれば振動の周波数は 260Hz 程度となる．これはペン先の材質・形状やペンの構造がローパスフィルタとなり，FFT 結果からはピークとして見られない程度の微小な振動となったと考えられる．振動の周期は 3.8ms であり，振動波形のグラフを見るとわずかに振動していることがわかる．

これらの結果より，皮膚感覚ディスプレイにおける不自然な感覚の原因は一定周波数間隔に見られるピーク周波数であると考えられる．特に，最も皮膚感覚に寄与すると考えられる周波数成分は 200Hz 近傍であり，またそれぞれの FFT 結果より 200Hz 以降の周波数領域において振動強度は大幅に減少していることから，200Hz 以下の周波数帯域における特徴的なピークが原因と考えられる．よって，このピークをなくすことができれば皮膚感覚ディスプレイにより生成される粗さ感覚をより自然な感覚に近付けることができると考えられる．

#### 4.5.3.2 擬似乱数列によるゆらぎの生成

より自然な感覚の生成を行うため，弾性表面波の励振切替周波数に擬似乱数列の参照を行った．擬似乱数列として，本研究では M 系列乱数 (M-sequence/MLS random number) を使用した．M 系列乱数とは，M 系列を用いた擬似乱数であり，実装が容易な擬似乱数列として知られている．

M 系列

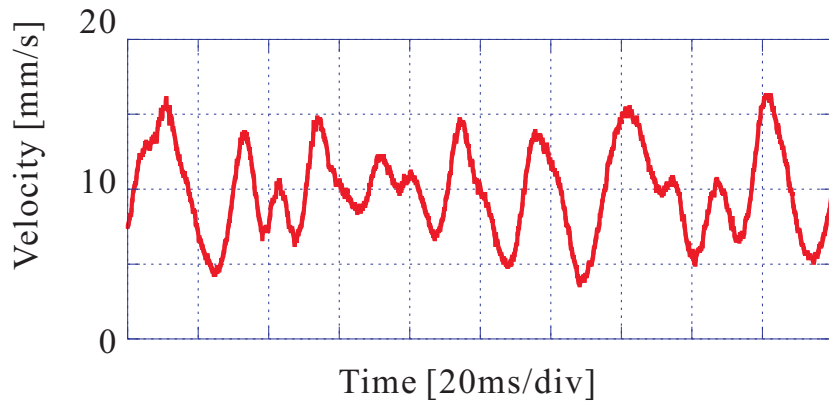


Fig. 4.19 Pen velocity (rubbing canvas)

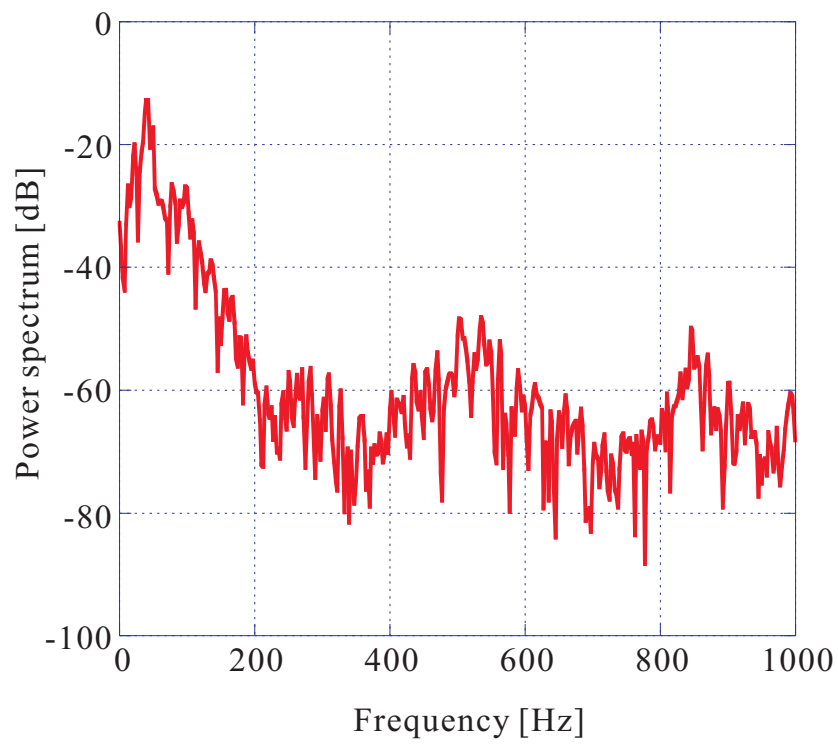


Fig. 4.20 FFT analysis result (rubbing canvas)

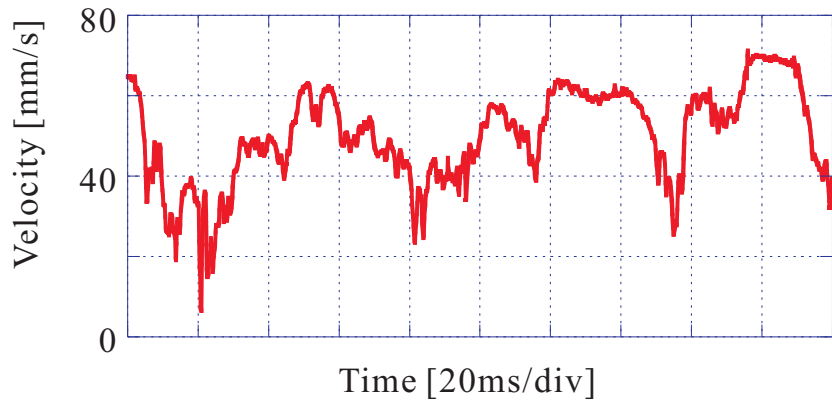


Fig. 4.21 Pen velocity (rubbing sandpaper #80)

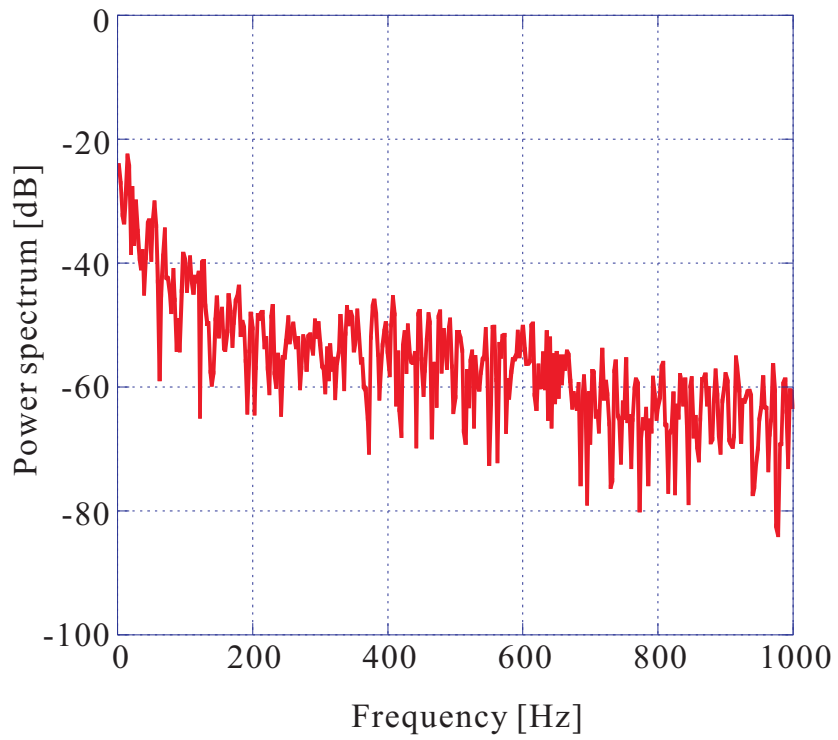


Fig. 4.22 FFT analysis result (rubbing sandpaper #80)

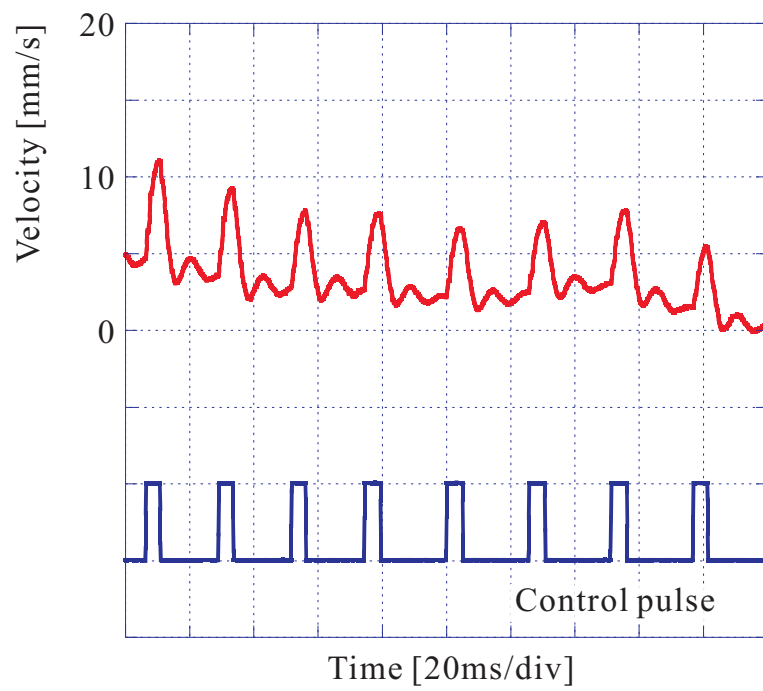


Fig. 4.23 Pen velocity (rubbing tactile display)

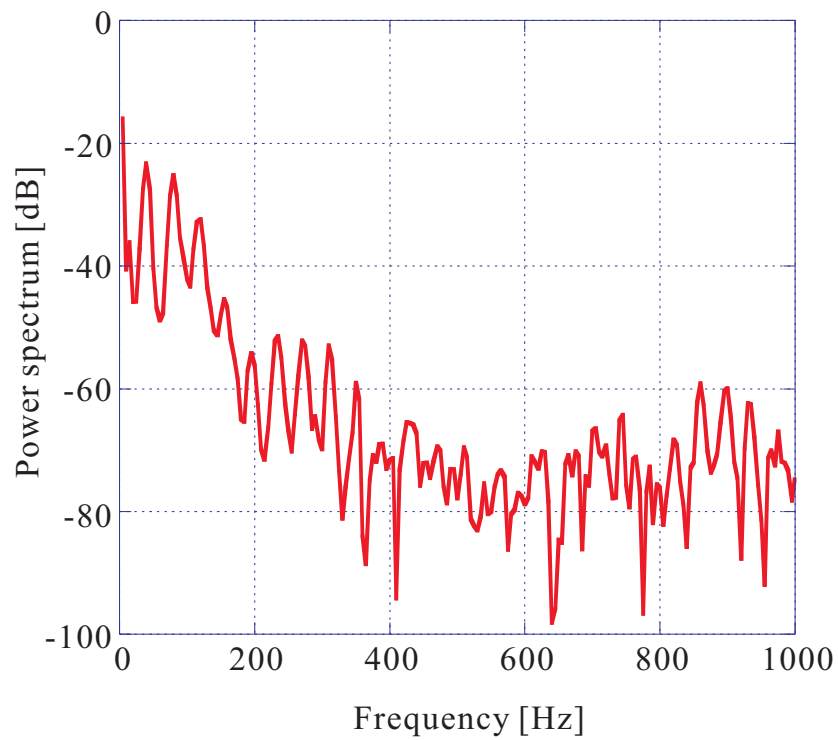


Fig. 4.24 FFT analysis result (rubbing tactile display)

M 系列 (M-sequence/MLS) とは、次のガロア体の漸化式により生成される数列である。

$$x_n = x_{n-p} \vee x_{n-q} (p > q) \quad (4.2)$$

上式において、 $x$  の値は 1 ビット (0 もしくは 1) である。 $n$  は整数であり、 $n$  番目の項を表す。 $\vee$  は排他的論理和 (Exclusive OR: XOR) を表す。すなわち、 $n$  番目の項は  $n-p$  番目の項と  $n-q$  番目の項の排他的論理和からなる。ここで、M 系列の周期は  $2^p - 1$  である。例えば 10 ビットの M 系列の場合、 $2^{10} - 1 = 1023$  の数列となる。M 系列の生成を実装する場合には全て零以外の初期値が  $p$  個必要である。

M 系列乱数を切替周波数に参照することで、元々の切替周波数を中心周波数としたゆらぎを含む信号を生成することができる。これにより、生成される信号の周波数にゆらぎを持たせ、周波数スペクトルにおけるピークを平坦化させることができるため、得られる振動をより自然なものとするのが期待できる。

#### 4.5.3.3 制御システム

M 系列乱数を参照した場合のペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイの制御システムを Fig. 4.25 に示す。予め M 系列乱数のデータベースをマイコン上に作成しておき、出力時にこれを参照することでマイコンから送信する弾性表面波の ON/OFF 信号にゆらぎを持たせる。ここで、従来の制御系より出力される ON/OFF 信号に M 系列乱数をそのまま参照させると、M 系列乱数の最小単位 (1 回の 0/1 の切替) が最小切替周期  $T_{min}$  となり、ビット数を  $n$  とすると最大切替周期は  $T_{max} = nT_{min}$  となる。このため、平均周期  $T_{ave}$  は、

$$T_{ave} = \frac{1+n}{2} T_{min} \quad (4.3)$$

となる。仮に 5bit の M 系列を用いる場合、乱数データベースに送信する周期は上式より元の基準周期の 3 倍となる。

#### 4.5.3.4 提示可能な周波数帯域

ここで、前項における平均周期の式は  $T_{min}$  を基準とすると、

$$T_{min} = \frac{2}{1+n} T_{ave} \quad (4.4)$$

と表すことができ、同様に  $T_{max}$  について考えると、

$$T_{max} = \frac{2n}{1+n} T_{ave} \quad (4.5)$$

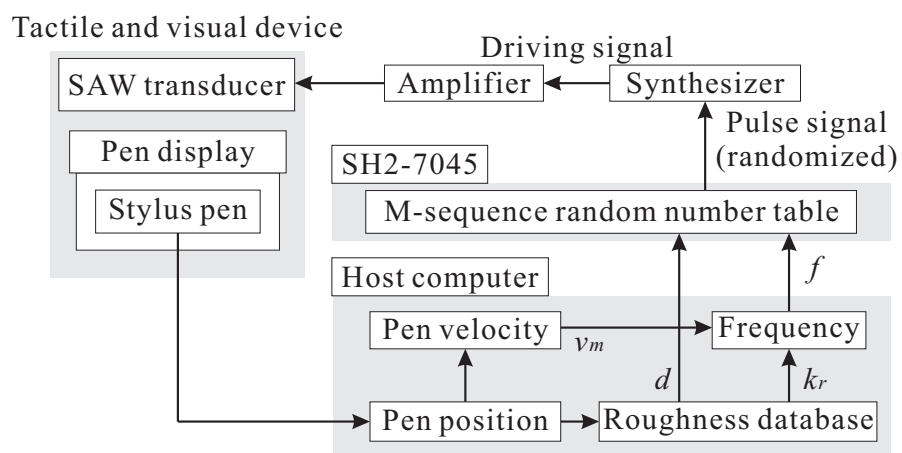


Fig. 4.25 Control system of SAW tactile display referring to MLS random number



と表すことができる．それぞれ周波数で表すと，最小周波数  $f_{min}$  及び最大周波数  $f_{max}$  は，平均周波数を  $f_{ave} = \frac{1}{T_{ave}}$  とすると，

$$f_{min} = \frac{1}{T_{max}} = \frac{2}{1+n} f_{ave} \quad (4.6)$$

$$f_{max} = \frac{1}{T_{min}} = \frac{2n}{1+n} f_{ave} \quad (4.7)$$

となる．この周波数帯域  $B$  は，

$$B = f_{max} - f_{min} = \frac{2(n-1)}{1+n} f_{ave} \quad (4.8)$$

となり，平均周波数を固定して M 系列乱数のビット数を大きくすると，周波数帯域を広くすることができる．ここで，それぞれの値の極限を考えると，

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_{min} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2}{1+n} f_{ave} = 0 \quad (4.9)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_{max} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{2n}{1+n} f_{ave} = 2f_{ave} \quad (4.10)$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} B = 2f_{ave} \quad (4.11)$$

となり，平均周波数の 2 倍の周波数までしか帯域を増やすことはできない．仮に平均周波数が 50Hz のときを考えると，M 系列乱数のビット数  $n$  を 1 (乱数ではない従来通りの ON/OFF) から 10 まで変化させた際の最小/最大周波数の変化は Fig. 4.26 のようになる．このため，提案した M 系列乱数を参照する方法ではピークとなる周波数のゲインを 0Hz からピーク周波数の 2 倍の帯域幅まで平坦化することが可能である．それ以外の周波数領域については，ピークゲインが平坦化することによる相対的なゲインのオフセットのみが生じ，傾きは変化しない．周波数特性の傾きの変化やピーク以外の領域のゲイン平坦化を行う場合には，提案した方法以外を併用する必要がある．

#### 4.5.3.5 速度変化の測定実験

M 系列乱数を参照した制御方法を用いて，4.5.3.1 と同様の実験構成でのペンの速度変化及び得られた振動波形の FFT 解析を行った．M 系列乱数には 5bit の乱数列を用いた．ペンの速度変化を Fig. 4.27 に示す．図中の赤線はペンの速度変化，青線は弾性表面波の ON/OFF の制御信号である．また，得られた速度変化の FFT 解析結果を Fig. 4.28 に示す．FFT 解析結果を以前の皮膚感覚ディスプレイのものと比較すると，最も皮膚感覚に寄与すると考えられ

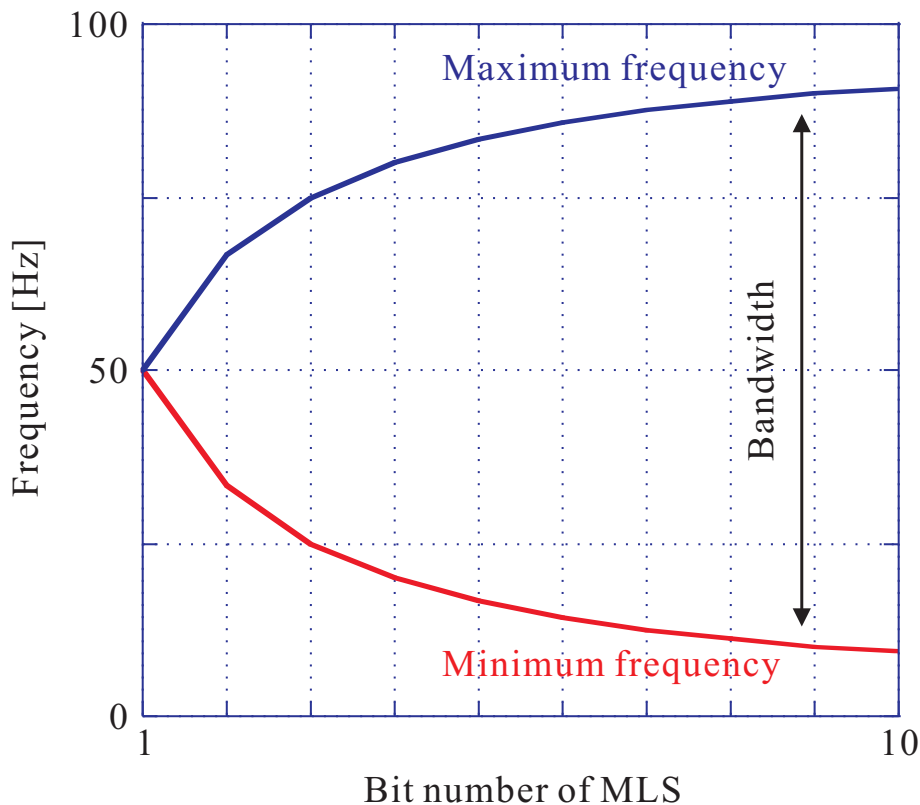


Fig. 4.26 Bandwidth between maximum and minimum frequency by MLS random number

る低周波数領域 (0~200Hz) においてピークが平坦化していることがわかる。これにより、M 系列乱数を皮膚感覚ディスプレイの ON/OFF の制御信号へ参照することにより、振動のピーク周波数にゆらぎを持たせることができた。

#### 4.5.3.6 弁別実験

M 系列乱数を参照した制御方法により皮膚感覚ディスプレイを駆動した結果、得られる振動の周波数にゆらぎを持たせることができた。実際にこの方法を用いて粗さ感覚を提示し、従来の方法と比較して得られる感覚が自然な感覚に近付いたかどうか弁別実験を行った<sup>\*5</sup>。製作したソフトウェアを使用し、従来の方法で粗さを提示する設定としたパネルと M 系列乱数を参照した制御方法により粗さを提示する設定としたパネルを画面上に表示した。被験者にはスタイラスペンを用いてこれら 2 種類のパネル上においてなぞり動作を行ってもらい、どちらのパネルがより自然な感覚であるか 2 件法 (どちらでもない, わからないといった回答は許さない) により選択してもらった。被験者は男女 27 人とした。紙やすりや布地を皮膚感覚

<sup>\*5</sup> 本実験実施時には埼玉大学の倫理規則が施行されておらず、倫理委員会は設置されていなかったが、本実験において特に個人情報記録しておらず、得られた情報は匿名化されていたことを付記する。

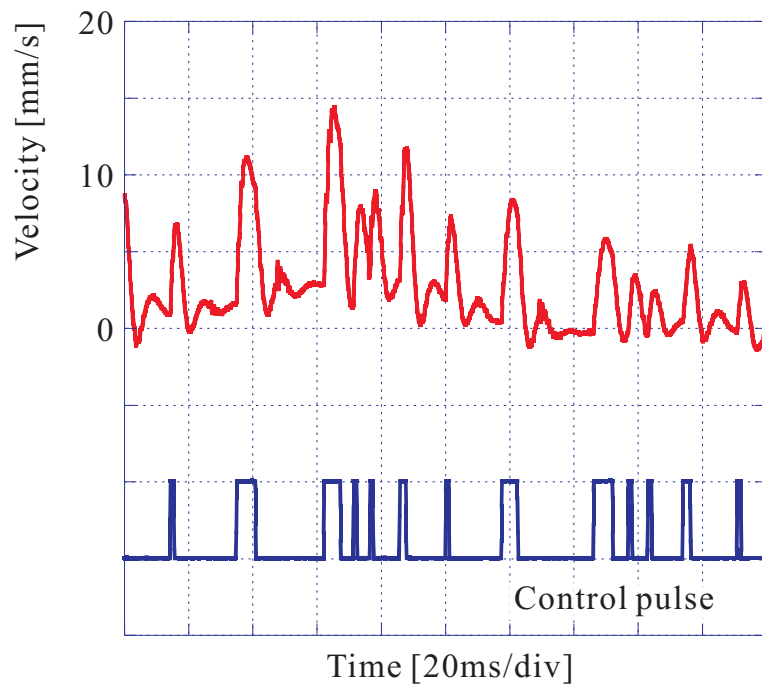


Fig. 4.27 Pen velocity (referring to MLS random number)

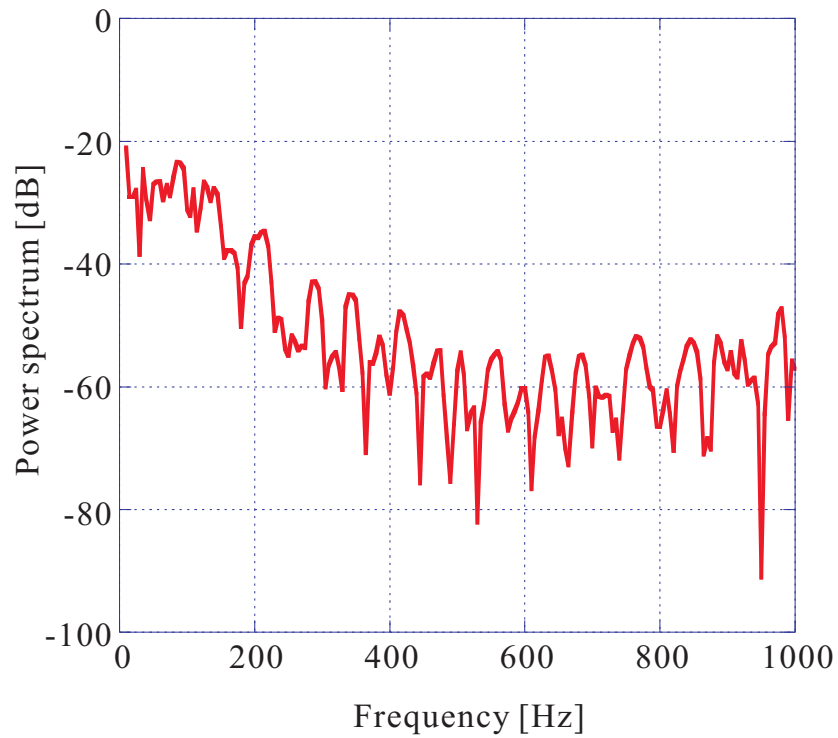


Fig. 4.28 FFT analysis result (referring to MLS random number)

ディスプレイの近くに設置し，自然な感覚の指標とした．実験中は画面上に粗さのパラメータ等は表示せず，被験者はパネルの色の違いのみ認識できる状態とした．パネルの色に対応する粗さのパラメータを 4.10 に示す．被験者の分布を 4.11 に示す．実験の結果，被験者のうち表の (a) に示す被験者 (27 人中 24 人) が，パラメータの違う 2 種類のパネルのうち M 系列を参照した制御方法を適用した方が自然な感覚が得られたと答えた．これにより，弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの制御方法に M 系列乱数を参照することで，従来のなぞり速度に応じた ON/OFF 制御よりも自然な粗さ感覚の提示が可能であることが確認された．

Table 4.10 Parameters of panels (discrimination experiment for control method referring to MLS)

Color	$k_r$ [ $\mu\text{m}$ ]	d [%]	Control method
Green	250	10	ON/OFF control
Red	250	10	ON/OFF control (referring to MLS)

Table 4.11 Distribution of subjects (discrimination experiment for control method referring to MLS)

Age	Male	Female	Total
10	1	2	3
20	18	1	19
30	1	1	2
40	0	1	0
50	2	0	2
Total	22	5	27
(a)	21	3	24

## 4.6 弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの大面積化

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイに使用する弾性表面波振動子には圧電材料である  $\text{LiNbO}_3$  を用いている．これは現実的に入手可能なサイズに制限があり，最大で 4 インチウェハーサイズ (直径 100 mm) となる．そのため，これまでに大面積の振動子を製作する方法として間接励振と呼ばれる方法が提案されていたが，解決すべき問題がいくつか存在した．本研究ではそれらの問題解決を行い，弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの皮膚感覚提示領域の拡大を図った．

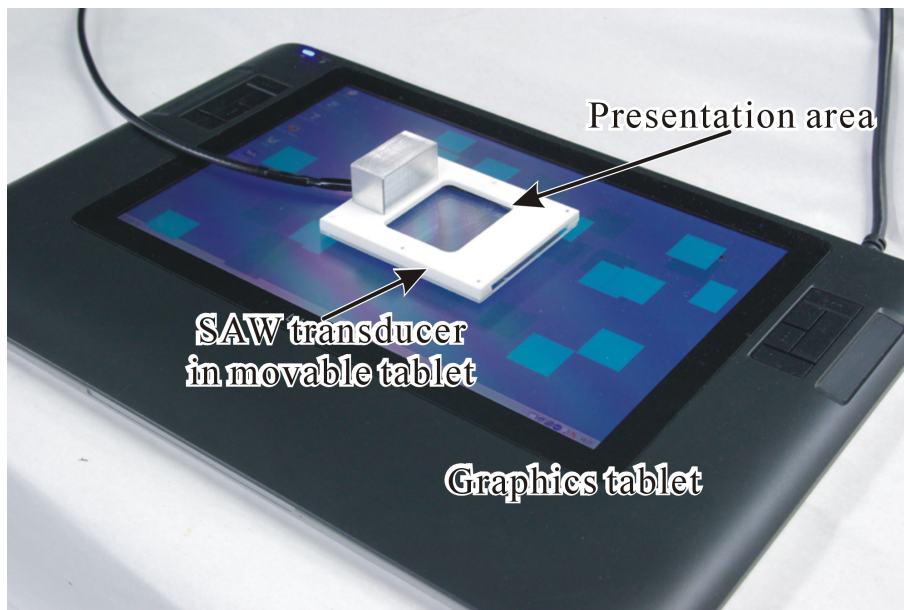


Fig. 4.29 Movable frame on graphics tablet

#### 4.6.1 移動型振動子

4.4.2 にて述べたペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイにおいて，振動子は入手可能な最大のサイズである4インチウェハーから切り出しており，液晶ペンタブレットの視覚情報提示範囲（液晶ディスプレイサイズ）に比べて非常に小さい．弾性表面波振動子は画面上に貼り付けて使用したため，画面内のごく一部のみを用いて皮膚感覚の提示を行っていた．そこで，画面全体での皮膚感覚提示を行う上で，まず振動子を移動可能とした．移動型振動子を Fig. 4.29 に，移動型振動子を使用している様子を Fig. 4.30 に示す．これまで貼り付けて使用していた振動子の外側に枠を取り付け，画面上を移動可能とすることで画面上の任意の位置における感覚提示に対応した．枠はアクリル製であり，上面に付いているアルミ製の突起は取手である．ディスプレイの使用者は振動子を枠ごと任意の位置へ移動し，枠内の振動子をペンでなぞることにより粗さ感覚の提示を行う．

振動子を移動可能としたことで，Fig. 4.31 に示すように振動子の向きや位置によらず粗さの感覚が提示が可能となった．これまで，粗さ感覚の提示はなぞり方向が弾性表面波の伝播方向のときのみ確認されていた．枠ごと90°回転した状態においてなぞり動作を行い，なぞり方向が弾性表面波の伝播方向と直交する際のペンの速度変化を観測した．実験構成を Fig. 4.32 に示す．ペンの速度の測定にはレーザードップラー振動速度計 (PI Polytec OFV-3001 OFV-353) を用いた．得られた結果を Fig. 4.33 に示す．図中の赤線がペンの速度で，青線が弾性表面波の制御信号である．弾性表面波の制御信号が ON のとき，ペンが加速し，OFF に

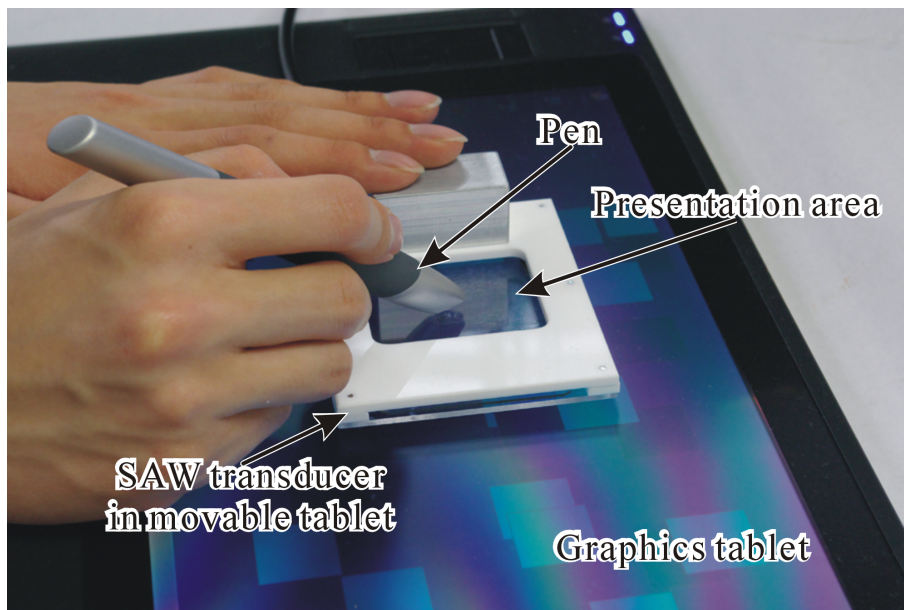


Fig. 4.30 Rubbing motion through movable frame

なるとペンが減速，結果として制御信号の周波数でペンが振動したことがわかる．これにより，なぞり方向が弾性表面波の伝播方向と直交していた場合においても粗さ感覚の提示が可能なが確認できた．

しかしながら，ディスプレイの使用者がなぞり動作を行う際に「振動子を移動し，なぞり動作中は振動子を固定する」動作を行う必要がある．ディスプレイ使用中は両手を使用することとなるため，振動子を固定したときと比べてユーザビリティは劣る．ディスプレイ自体のユーザビリティを向上させる上で，画面全体を覆うことのできる大面積の振動子を実現する必要がある．

#### 4.6.1.1 デモンストレーション用ソフトウェアの改良

皮膚感覚の提示を行うソフトウェアについて，画面中の任意の場所でのなぞり動作が可能ないように改良を行った．ソフトウェアの動作中のコンピュータ画面を Fig. 4.34 に示す．画面上には多数の図形がランダムに表示され，ディスプレイ使用者がこの図形上で振動子越しになぞり動作を行うと粗さ感覚の提示が行われる．図形に応じて粗さのパラメータを変更することも可能である．

また，ペイントソフトを製作し，ペンの書き味の提示を図った．ペイントソフト上で線を描いた際の画面を Fig. 4.35 に示す．ディスプレイの使用者が仮想キャンバス上にペンで線を描くと，あたかも実際に紙の上に鉛筆で線を描いているかのような書き味を提示することができる．



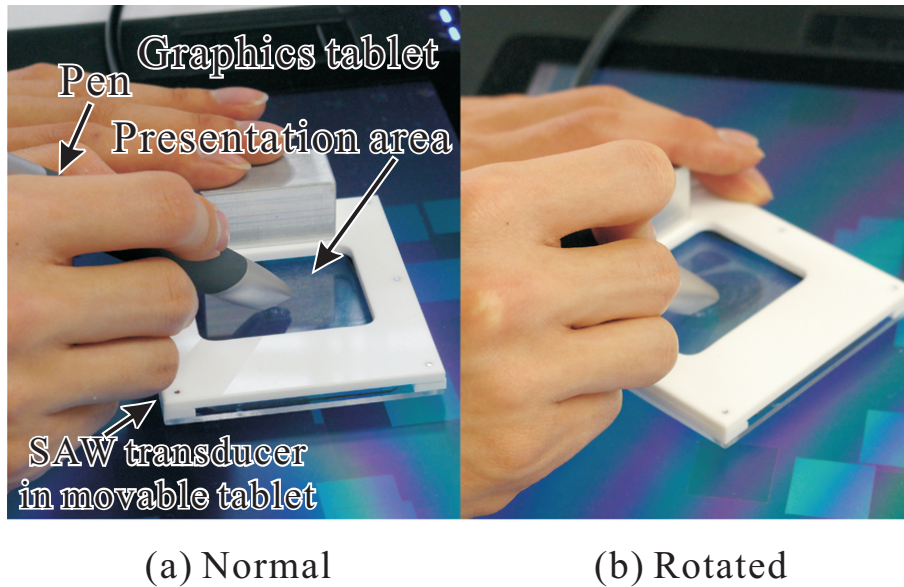


Fig. 4.31 Rubbing motion at rotated SAW transducer

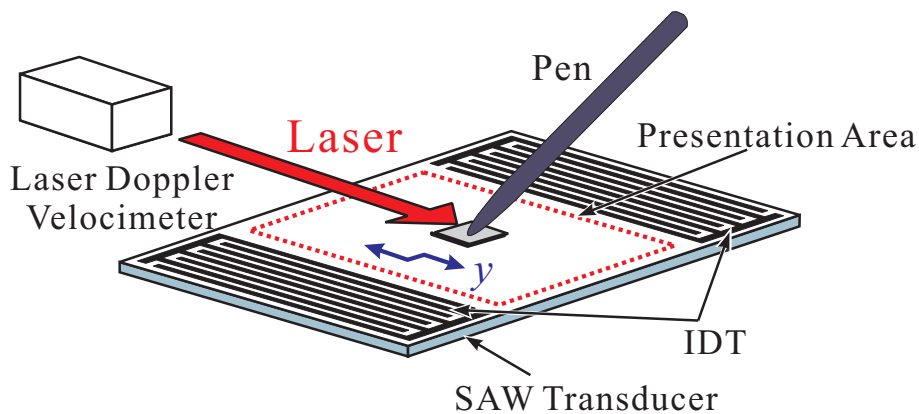


Fig. 4.32 Experimental configuration for measuring pen vibration (rubbing across SAW propagation direction)

#### 4.6.2 間接励振の適用

大面積振動子を製作する上で必要となる間接励振について説明する．これまで間接励振の構成方法としていくつかの方法が提案され，直接励振及びそれぞれの間接励振の利点・欠点について比較がなされている [103]．

##### 直接励振

圧電材料をそのまま用いるため大型化が困難である．

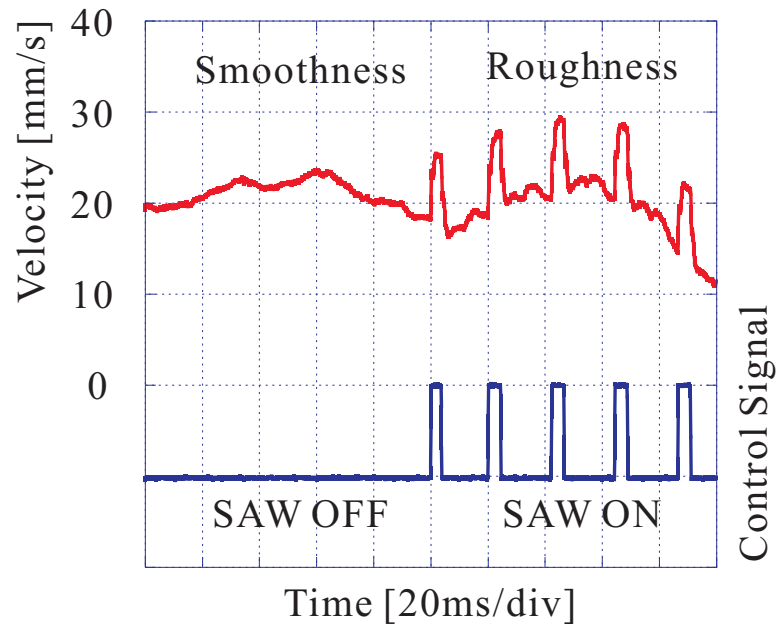


Fig. 4.33 Pen velocity ( $k_r=500\mu\text{m}$ ,  $d=20\%$ , across SAW propagation direction)

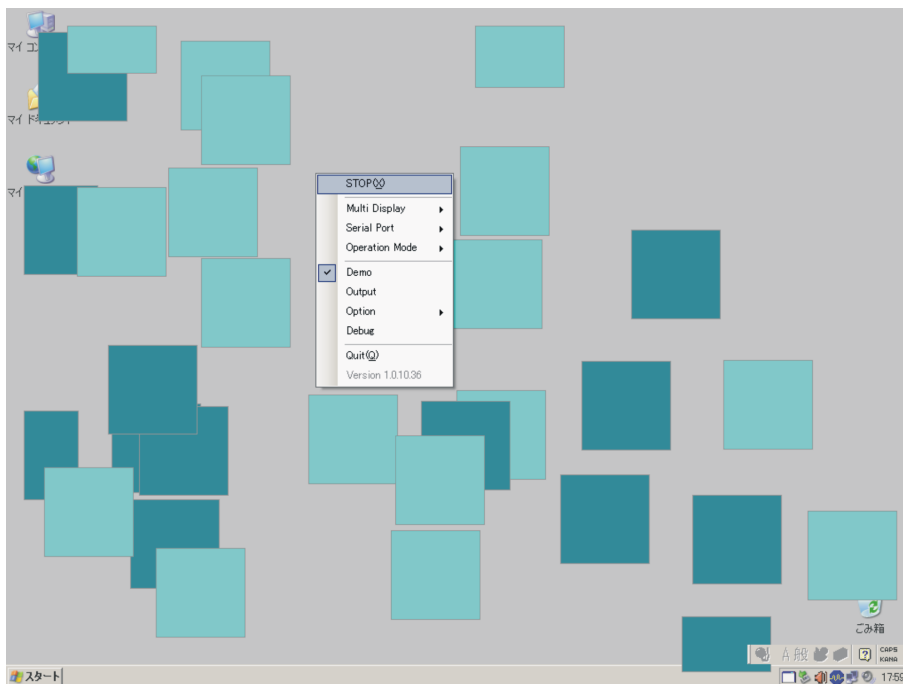


Fig. 4.34 Tactile demonstration software covering whole LCD



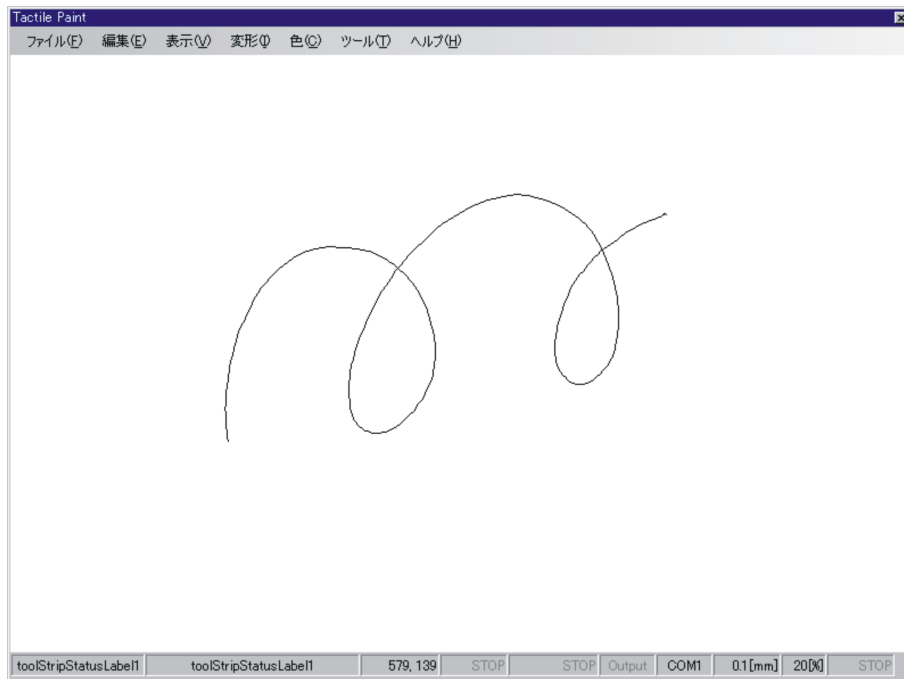


Fig. 4.35 Paint software for generating drawing sensation

#### 間接励振 (Glass-IDT)

ガラス上に IDT を形成し，その上に  $\text{LiNbO}_3$  基板を取り付ける． $\text{LiNbO}_3$  基板は予圧が必要である．

#### 間接励振 (LN-IDT Type A)

IDT を形成した  $\text{LiNbO}_3$  基板をガラス基板に取り付ける．ガラス基板面に  $\text{LiNbO}_3$  基板の IDT 形成面を接触させる． $\text{LiNbO}_3$  基板は予圧が必要である．

#### 間接励振 (LN-IDT Type B)

IDT を形成した  $\text{LiNbO}_3$  基板をガラス基板に取り付ける．ガラス基板面に  $\text{LiNbO}_3$  基板の IDT 形成面の反対面をカップラントを介して接触させる． $\text{LiNbO}_3$  基板は予圧が不要である．

本研究では，最も自由度が高く大型化に向く [103] 方法と考えられる LN-IDT Type B を採用する．ガラス基板には石英ガラス基板 (信越化学工業 SZS8009E10) を用いた．また，カップラントにはシリコンオイル (呉工業 シリコンルブスプレー) を用いた．

#### 4.6.2.1 大面積振動子

振動子を大面積化し，液晶画面全体を覆うことでペンタブレット型をはじめとした視覚情報を同時に提示する構成の皮膚感覚ディスプレイのユーザビリティを向上することができる．こ

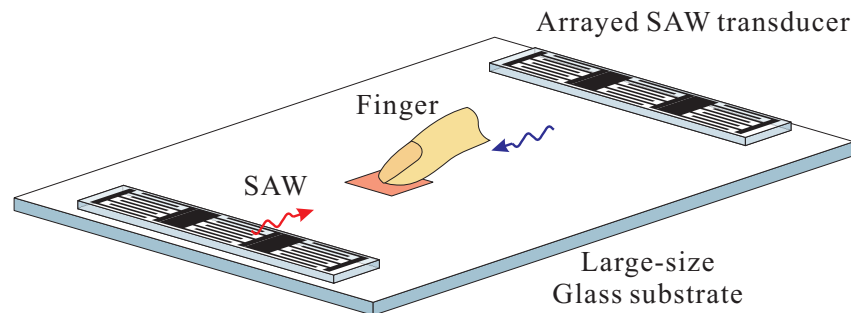


Fig. 4.36 Configuration of large-size tactile display using indirect SAW excitation

れに対し，これまで提案されている非圧電材料に弾性表面波を励振・伝播する間接励振という方法を適用する．この方法により非圧電材料として一般的なガラス板を使用することができるため，振動子のサイズ・形状の制限をなくし，より安価な構成にすることができる．大面積振動子の構成を Fig. 4.36 に示す．大面積のガラス基板上に多数の弾性表面波振動子をアレイ状に対向して配置し，弾性表面波の励振を行う．

製作した大面積振動子を Fig. 4.37 に示す．振動子は移動可能とするため枠を取り付けた．枠上部は加工の容易なベークライト製とし，枠下部は透明にする必要があるためアクリル製とした．ガラス基板上には  $\text{LiNbO}_3$  基板に IDT を形成した振動子をカップラントを介して貼り付けた． $\text{LiNbO}_3$  は石英ガラスと媒質中の音速が近い Y カット Z 伝播のものをを用いた．振動子に形成した IDT の構成を Fig. 4.38 に示す．大面積基板を製作するに当たって，3 つの IDT をアレイ状とすることで，感覚提示領域の拡大を図った．以下，この振動子を「アレイ状振動子」と呼ぶ．3 つの IDT は直列に接続され，またそれぞれが同一基板上に形成されるため位置合わせが容易となる．IDT の共振周波数は 9.60MHz である．2 つのアレイ状振動子をガラス基板上の両端に配置し，それぞれが並列に接続されることでガラス基板表面には弾性表面波の定在波が形成される．反射器は取り付けられていないが，ガラス基板端面にて弾性表面波の反射が期待できる．製作した大面積振動子の皮膚感覚提示領域 (Fig. 4.37 中の「Indication area」) は  $40\text{mm} \times 70\text{mm}$  であり，以前の 4 インチウェハーから切り出して製作した振動子の提示領域  $46\text{mm} \times 43\text{mm}$  と比べて面積比で 1.4 倍とすることができた．

#### 4.6.2.2 振動伝播特性

製作した大面積振動子を用い，正弦波を印加して弾性表面波の励振を行った．このとき，ガラス基板上の振動速度分布を取得し，皮膚感覚提示領域全域にわたって振幅が得られているかどうか確認を行った．実験構成を Fig. 4.39 に示す．振動速度の測定にはレーザードップラー振動計 (小野測器 LV-1710 LV-0160) を用いた．測定範囲はアレイ状振動子端からガラス基板

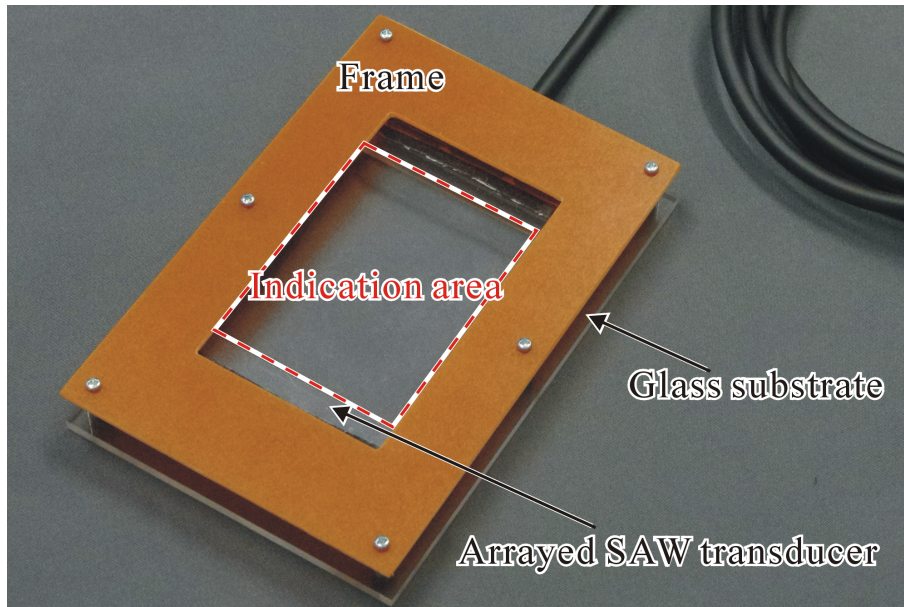


Fig. 4.37 Large-size tactile display using indirect SAW excitation

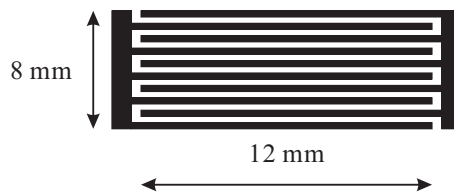


Fig. 4.38 Dimension of transducer

中心までの  $40\text{mm} \times 30\text{mm}$  とした。測定結果を Fig. 4.40 に示す。図より、ほぼ測定範囲の全域にわたって皮膚感覚の提示を行うのに十分な振動速度が得られていることが確認できた。

しかしながら、アレイ状振動子では IDT を複数接続する必要がある。IDT の  $Q$  値は非常に高く、それぞれの IDT の製作度合によっては共振周波数にばらつきが生じるため、全体の共振周波数で駆動すると励振しやすい IDT と励振しにくい IDT が生じてしまう。このため、従来の方法では IDT それぞれを個別駆動する必要があり、駆動には高価な高周波発振器と高周波増幅器を必要とするためシステム全体が高コストとなる問題が指摘されていた。

#### 4.6.3 パルス駆動による弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ

大面積振動子の駆動に対して、第3章において述べたパルス波による駆動方法を適用する。これにより、励振システムを簡易かつ安価にすることができ、将来的に更なる大面積化を行い駆動する振動子が増えたとしても、弾性表面波による皮膚感覚の提示が実現可能となる。本項

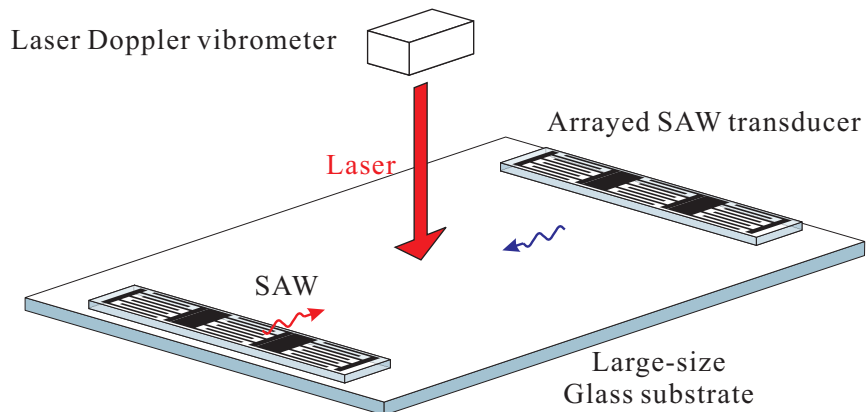


Fig. 4.39 Experimental configuration for measuring vibration velocity distribution of large-size transducer

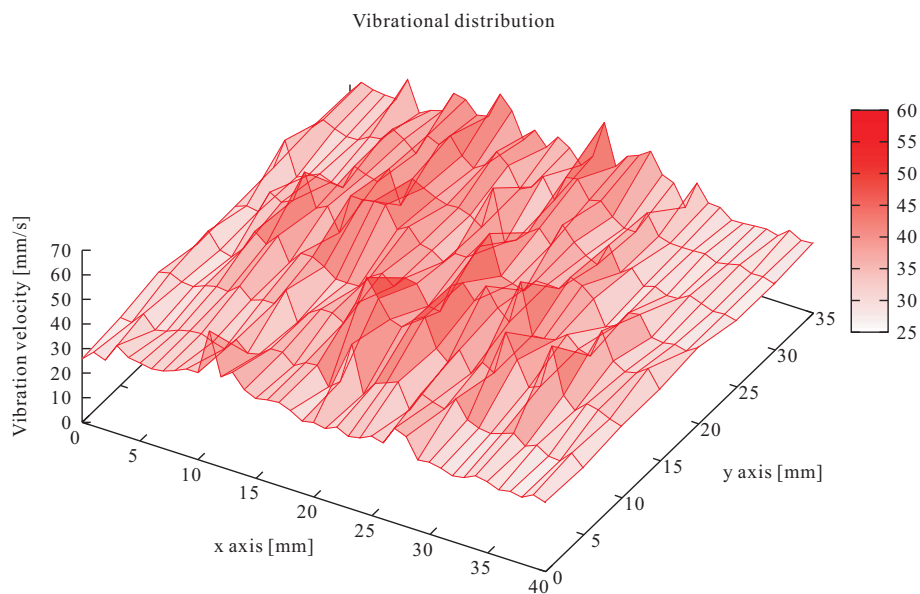


Fig. 4.40 Vibration velocity distribution of large-size transducer driven by sine wave

では、まず予備実験として直接励振の構成をとる皮膚感覚ディスプレイをパルス波により駆動し、皮膚感覚ディスプレイに適用可能かどうかの調査結果について述べる。続いて、大面積の皮膚感覚ディスプレイを構成可能な間接励振の構成としたとき、パルス駆動による弾性表面波の指向性についての調査結果を述べる。そして、間接励振における振動伝播特性および、皮膚感覚ディスプレイとして適用した際のなぞり動作における速度変化について述べる。

#### 4.6.3.1 直接励振の皮膚感覚ディスプレイへのパルス駆動の適用

パルス波により弾性表面波振動子を駆動し、皮膚感覚ディスプレイにおいて粗さ感覚の提示が可能かどうか検討するため、予備実験として、最も単純な直接励振の構成に適用して実験を行った。実験構成を Fig. 4.41 に示す。皮膚感覚ディスプレイの構成は、4.3.2 と同様である。弾性表面波振動子として、1.0mm 厚の  $\text{LiNbO}_3(128^\circ\text{Y-X})$  基板上に IDT を対向して形成したものを使用した。IDT の交差指対数は 20 対とし、共振周波数は 9.60MHz とした。また、パルス波の周波数は (3.1) 式より 246kHz とした。印加電圧は 75V とし、対向する IDT は並列接続されている。皮膚感覚ディスプレイ中央部のなぞり動作を行う領域では、弾性表面波の定在波が形成される。なぞり動作中に弾性表面波の定在波の ON/OFF を行うことで振動が生じ、粗さ感覚として提示される。スライダの速度計測にはレーザードップラー速度計 (Canon P-20Z および Canon S-100Z) を使用した。予備実験では定在波の ON/OFF の制御信号の周波数を 100Hz とし、制御信号のデューティ比を 20% とした。実験結果を Fig. 4.42 に示す。図中の上の線がスライダの速度 (=なぞり速度)、下の線が弾性表面波の ON/OFF の制御信号である。スライダ速度の DC 成分が指でなぞり動作自体の速度、AC 成分がスライダの振動を表している。制御信号が ON になると搬送波として 246kHz のパルス波が IDT に印加され、このパルス波により 9.60MHz の弾性表面波が励振される。このとき基板表面には弾性表面波の定在波が形成され、摩擦力が減少してスライダが加速する。制御信号が OFF になると摩擦力は元に戻り、スライダが減速する。結果としてなぞり動作中に摩擦変化が生じ、粗さ感覚の提示が可能なが確認できた。以上より、従来の弾性表面波皮膚感覚ディスプレイに対してパルス波による励振方法を適用可能なことが示された。

#### 4.6.3.2 間接励振へのパルス駆動の適用と弾性表面波の指向性調査

パルスによる弾性表面波の励振を間接励振に組み合わせる上で、振動子から励振される弾性表面波の指向性を調べた。実験構成を Fig. 4.43 に示す。石英ガラス基板 (信越化学工業 SZS8009E10) 上に弾性表面波振動子を 1 つずつ、対向して配置した。弾性表面波振動子には  $\text{LiNbO}_3(\text{Y-Z})$  を用い、固有振動数は 8.60MHz である。振動子を、それぞれ

- ・ 高周波発振器及び高周波増幅器を用いて振動子を正弦波により駆動した場合
- ・ 製作した回路を用いてパルス波により駆動した場合

において、ガラス基板表面における弾性表面波の定在波の振動速度分布を調べた。定在波を形成するため、(3.1) 式より IDT の固有振動数からパルス波の周波数は 220kHz とした。振動速度の測定にはレーザードップラー振動計 (小野測器 LV-1710 LV-0160) を用いた。測定範囲は振動子端からガラス基板中心までの 40mm×30mm とした。正弦波により駆動した場合の測定結果を Fig. 4.44 に、パルス波により駆動した場合の測定結果を Fig. 4.45 に示す。どち

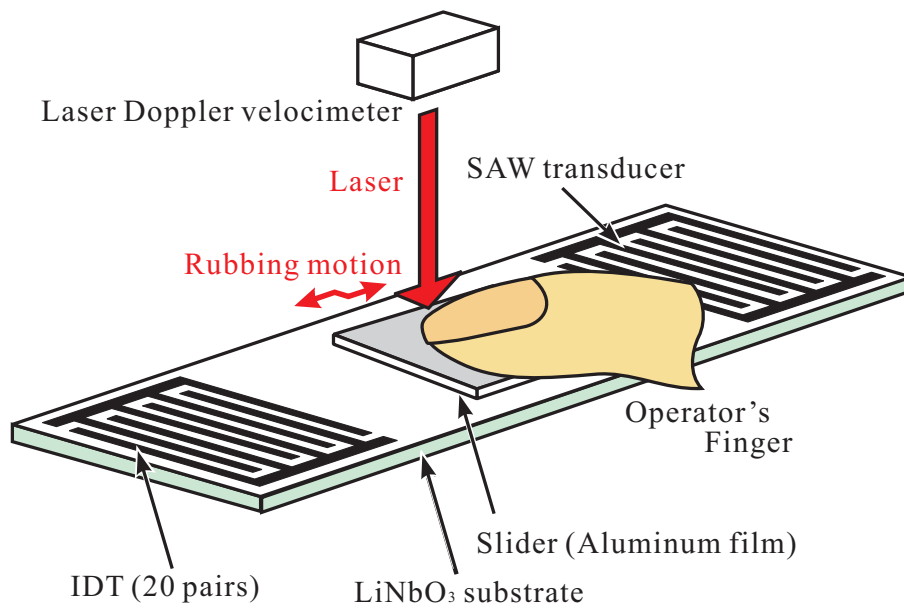


Fig. 4.41 Experimental configuration for measuring slider velocity

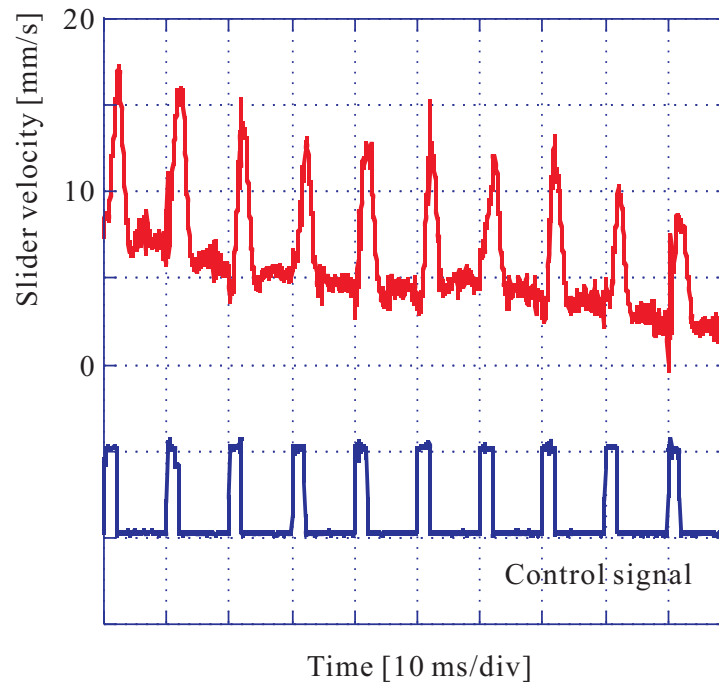


Fig. 4.42 Slider velocity (control signal: 100Hz, duty ratio: 20%, driven by pulse wave)



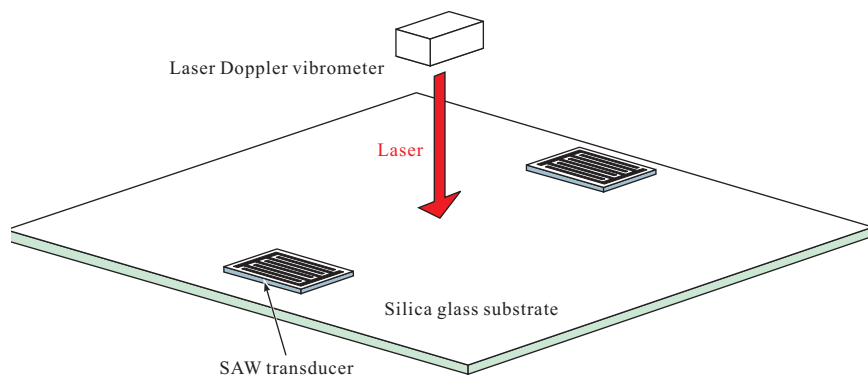


Fig. 4.43 Experimental configuration for measuring vibration velocity distribution

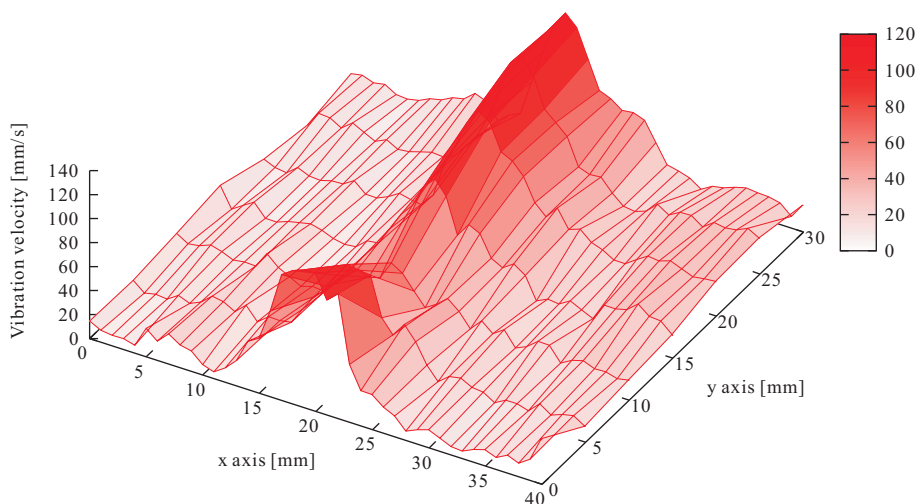


Fig. 4.44 Vibration velocity distribution of SAW excited by sine wave

らも振動子前方に同程度の指向性で振動速度が分布しており、また基板中央においても減衰せずに波が伝播したことがわかる。また、パルス波による駆動結果からガラス表面全域に微小な振動速度を確認することができる。これはパルス波による励振の結果、弾性表面波以外のモードの波が励振されたと考えられる。

#### 4.6.3.3 間接励振の皮膚感覚ディスプレイへのパルス駆動適用時の振動伝播特性

大面積振動子を用い、パルス波によって弾性表面波の励振を行った。このとき、ガラス基板上の振動速度分布を取得し、皮膚感覚提示領域全域にわたって振幅が得られているかどうか確認を行った。実験構成は4.6.3.2と同様である。振動速度の測定にはレーザードップラー振動計(小野測器 LV-1710 LV-0160)を用いた。測定範囲はアレイ状振動子端からガラス基板中心までの40mm×30mmとした。測定結果をFig. 4.46に示す。図より、パルス波による駆動に

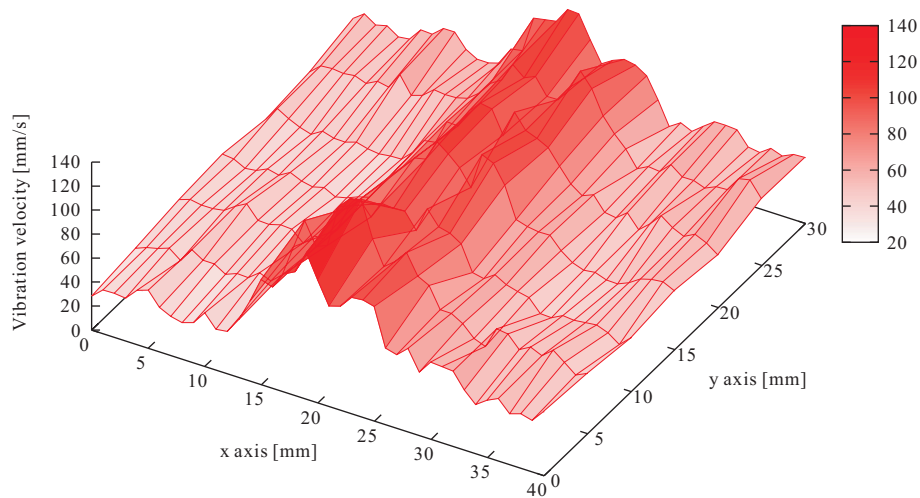


Fig. 4.45 Vibration velocity distribution of SAW excited by pulse wave

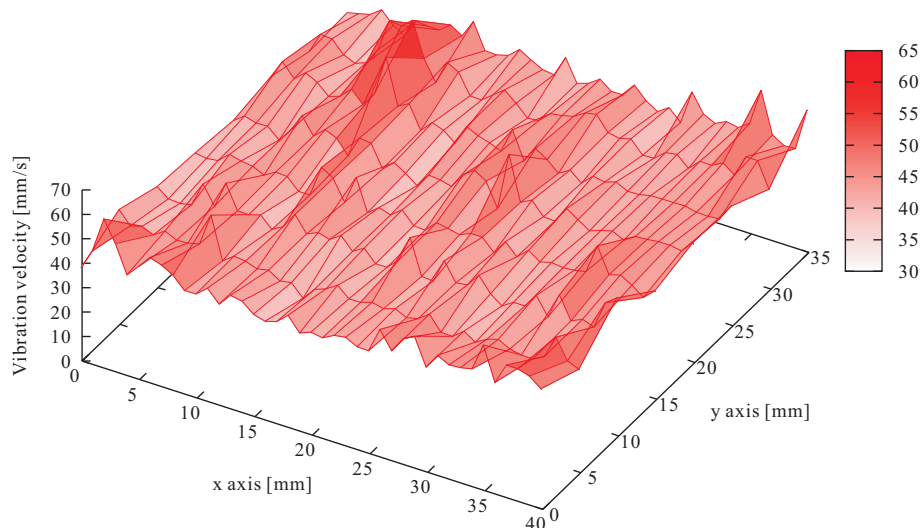


Fig. 4.46 Vibration velocity distribution of large-size transducer driven by pulse wave

において、ほぼ測定範囲の全域にわたって皮膚感覚の提示を行うのに十分な振動速度が得られていることが確認できた。

#### 4.6.3.4 間接励振の皮膚感覚ディスプレイのシステム構成

パルス波を用いて振動子の駆動を行い、皮膚感覚の提示を行う。制御システムを Fig. 4.47 に示す。基本的な制御システムは従来の皮膚感覚ディスプレイと同様のものであるが、高周波発振器をより一般的なパルス発振器に、高周波増幅器をより安価な FET を用いたスイッチング回路に置き換えている。製作したパルスアンプ及び大面積皮膚感覚ディスプレイを Fig. 4.48 に示す。また、パルスアンプの内部構造を Fig. 4.49 に示す。パルスアンプには必要な装



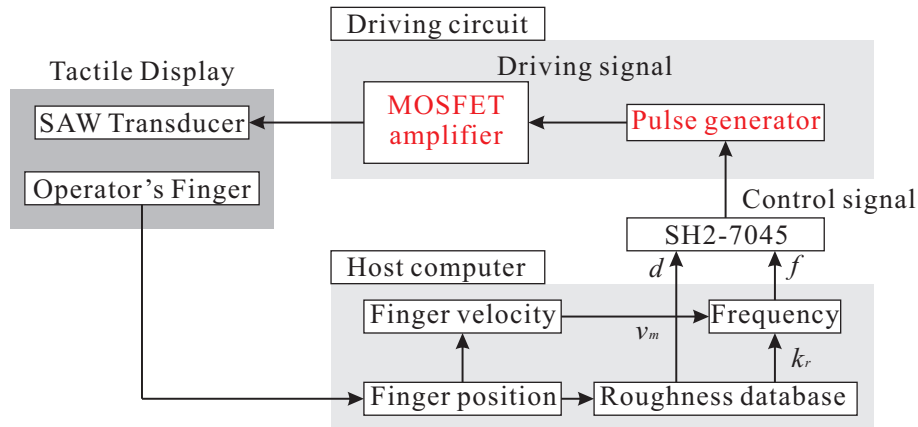


Fig. 4.47 Control system of SAW tactile display using pulse wave driving

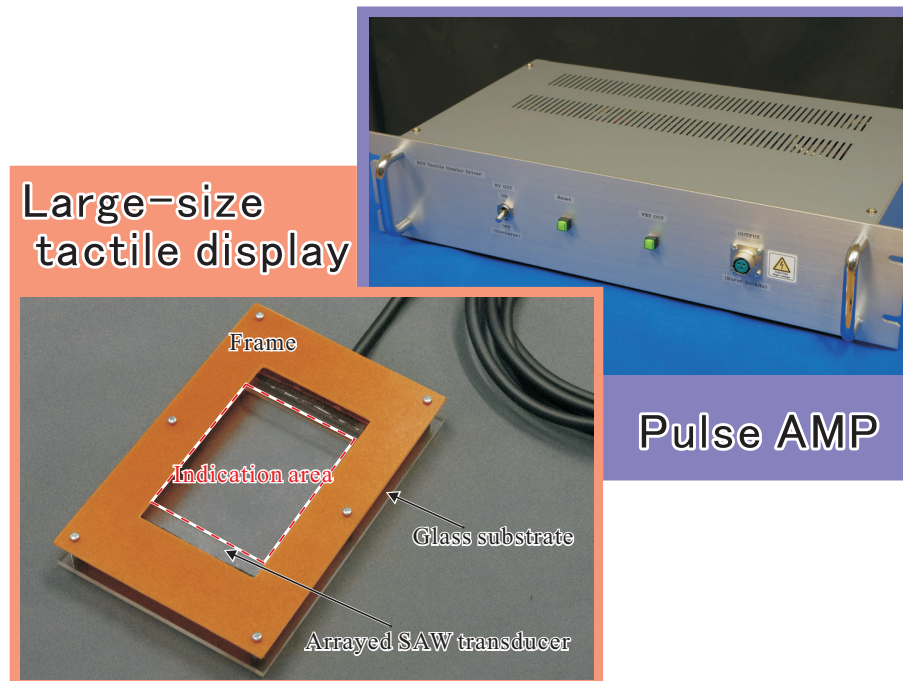


Fig. 4.48 Large-size SAW tactile display and pulse amplifier

置（発振器，FET スイッチングアンプ，高電圧源，マイコン）が全て組み込まれており，外部端子に皮膚感覚ディスプレイを接続することで皮膚感覚提示が可能とした．

#### 4.6.3.5 間接励振の皮膚感覚ディスプレイにおける速度変化の測定

大面積振動子をパルス波によって駆動し，なぞり動作中に弾性表面波の定在波の ON/OFF を行うことで粗さ感覚の提示を行った．実際にデモンストレーションを行い，粗さ感覚が提示可能なことを確認した．指によるなぞり動作及びペンによるなぞり動作どちらに対しても粗

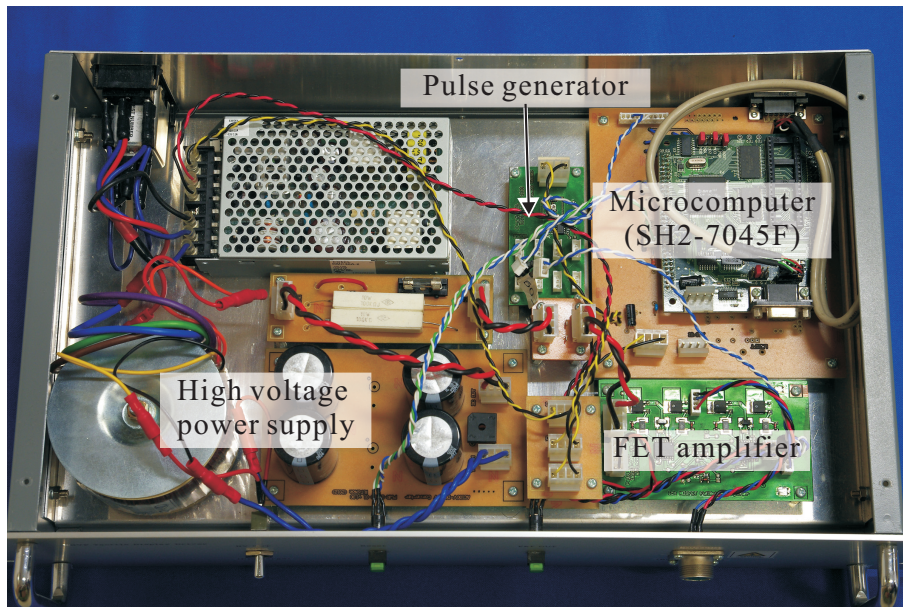


Fig. 4.49 Internal configuration of pulse amplifier

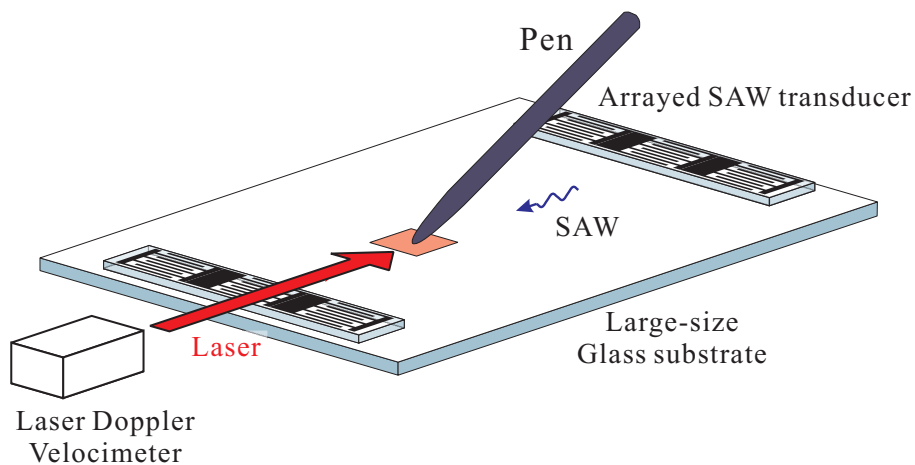


Fig. 4.50 Experimental configuration for measuring pen velocity using large-size tactile display

さ感覚の提示が可能であった。速度変化の測定実験では、実験を容易とするためペンを用い、このときのペンの速度変化を観測した。実験構成を Fig. 4.50 に示す。ペンの速度の測定にはレーザードップラー振動速度計 (PI Polytec OFV-3001 OFV-353) を用いた。得られた結果を Fig. 4.18 に示す。図中の赤線がペンの速度で、青線が弾性表面波の制御信号である。結果より、パルス波を用いて弾性表面波の励振の ON/OFF を行った際にペンが振動し、粗さ感覚の提示が可能であることを確認した。

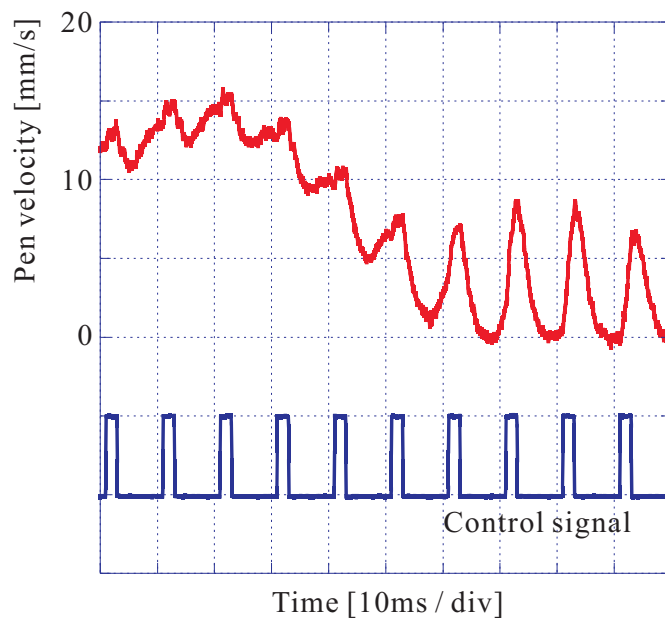


Fig. 4.51 Pen velocity ( $k_r=500\mu\text{m}$ ,  $d=20\%$ , driven by pulse wave)

## 第 5 章

# 皮膚感覚ディスプレイの応用

第 5 章では，皮膚感覚ディスプレイの応用について述べる．まず，皮膚感覚と力覚との融合について説明する．次に，障害者，特に視覚障害者について述べ，皮膚感覚ディスプレイの視覚障害者への応用について述べる．提案した方法について検討を行い，将来の展望について述べる．

### 5.1 皮膚感覚提示と力覚提示の融合

触覚とは，前述のように力覚と皮膚感覚とに大別される．これまで様々な触覚ディスプレイが提案・研究されているが，これらの触覚ディスプレイが提示可能な感覚は触覚のうちの一部の感覚のみに限られる．しかしながら，触覚ディスプレイの産業応用を考えると，感覚を総合的に提示可能なデバイスの需要が大きい．本項では，皮膚感覚と力覚との融合について取り扱う．

#### 5.1.1 力覚提示デバイスを用いた可動範囲の制限

4.4.2 にて述べたペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでは，弾性表面波振動子の基板材料に  $\text{LiNbO}_3$  を用いている．ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを使用する際，振動子基板上でペンを用いてなぞり動作を行う．ここで，特にペンタブレット型の皮膚感覚ディスプレイを使用する場合，以下の事項に注意する必要がある．

- ・  $\text{LiNbO}_3$  は硬脆性材料であり，ペンのような鋭利な物体による衝撃に弱い．
- ・  $\text{LiNbO}_3$  の感覚提示領域を意識的に把握し，なぞり動作を行う必要がある．
- ・ 電極が露出している場合，電極に触れると短絡するおそれがあり危険である．

これらのことから，力覚提示デバイスを用いてペンの動作範囲の制限し，皮膚感覚ディスプレイの欠点を補うことを提案した．

### 5.1.1.1 力覚提示デバイス PHANToM Omni

力覚提示デバイスとして，SensAble Technologies 社の PHANToM Omni[104] を用いた．PHANToM Omni の仕様 (抜粋) を Table 5.1 に示す．スタイラスがリンク機構を介して取り付けられており，デバイスの使用者はこのスタイラスを操作する．リンク機構にはモータが取り付けられており，トルク制御によって使用者に力覚の提示を行う．

Table 5.1 Specification of SensAble PHANToM Omni[104]

3D touch workspace	160×120×70 mm
Force capabilities	3.3 [N]
Communication interface	IEEE1394

### 5.1.1.2 制御システムと装置構成

PHANToM と弾性表面波皮膚感覚ディスプレイとを組み合わせたデバイスの制御システムは Fig. 5.1 のようになる．PHANToM のスタイラス内部のエンコーダ・ジンバルによりスタイラスの位置情報を読み取る．これらの位置情報はホストコンピュータに送られ，コンピュータから PHANToM へフィードバックする力の情報が送られる．PHANToM により力覚提示を行い，スタイラスの動作範囲の制限が行われる．使用者は画面上に表示された 3 次元の仮想空間を見ながらスタイラスの操作を行う．基本的な制御システム及び装置の構成は前述したペンタブレット型の皮膚感覚ディスプレイと同様である．PHANToM のスタイラスをペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイのペンとして扱い，スタイラスに対して粗さ感覚の提示が可能である．スタイラス先端にはスライダを取り付けて使用していたが，ユーザビリティ向上のため一体型とした．PHANToM と皮膚感覚ディスプレイを組み合わせた様子を Fig. 5.2 に，スタイラスの先端を拡大した様子を Fig. 5.3 に示す．

### 5.1.1.3 力覚提示を行う仮想空間

力覚提示デバイス PHANToM と皮膚感覚ディスプレイを組み合わせるためのアプリケーションとして，3 次元仮想空間を表示するソフトウェアの製作を行った．表示される仮想空間を Fig. 5.4 に示す．プログラムは Microsoft Visual C++ により製作し，仮想空間の表示には OpenGL を用いた．空間内においてスタイラスの位置は青い球体のカーソルに対応しており，スタイラスの位置・速度情報を出力できる．カーソルが仮想空間の壁面に接触するとスタイラスに適切な反力が提示される．仮想空間の下部の凹みが弾性表面波振動子の皮膚感覚提示領域に対応している．スタイラスが凹み部分の下部壁面へ接触すると振動子に粗さ感覚が提示

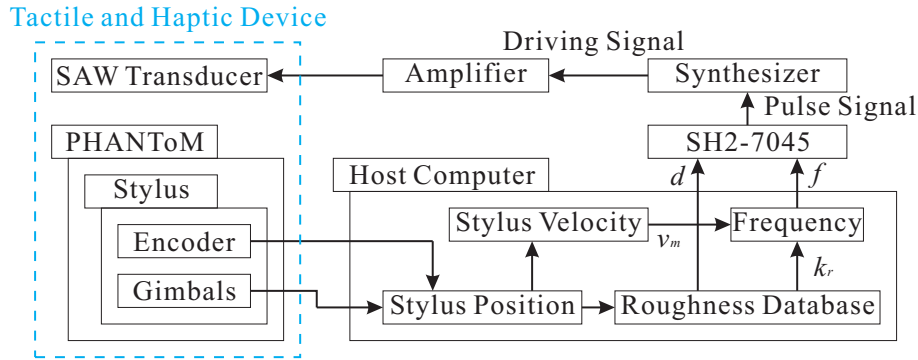


Fig. 5.1 Control system of tactile and haptic device using PHANToM Omni

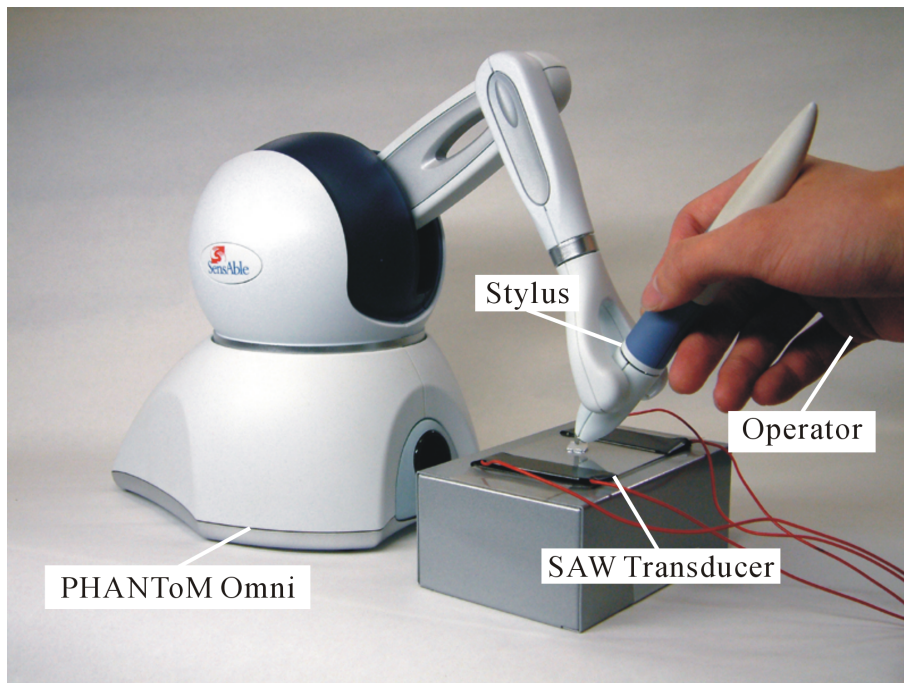


Fig. 5.2 Integration of SAW tactile display and PHANToM Omni

される．スタイラス位置に応じて異なる設定にすることも可能であり，凹みの左右で異なる粗さ設定にすることも可能である (Fig. 5.4) ．

#### 5.1.1.4 デモンストレーションによる有効性確認

実際にデモンストレーションを行い，粗さ感覚が提示可能なことを確認した．PHANToMのスタイラスによるなぞり動作中に弾性表面波の定在波の ON/OFF を行うことで粗さ感覚の提示を行った．このときのスタイラスの速度変化を観測した．実験構成を Fig. 5.6 に示す．ペンの速度の測定にはレーザードップラー振動速度計 (PI Polytec OFV-3001 OFV-353) を



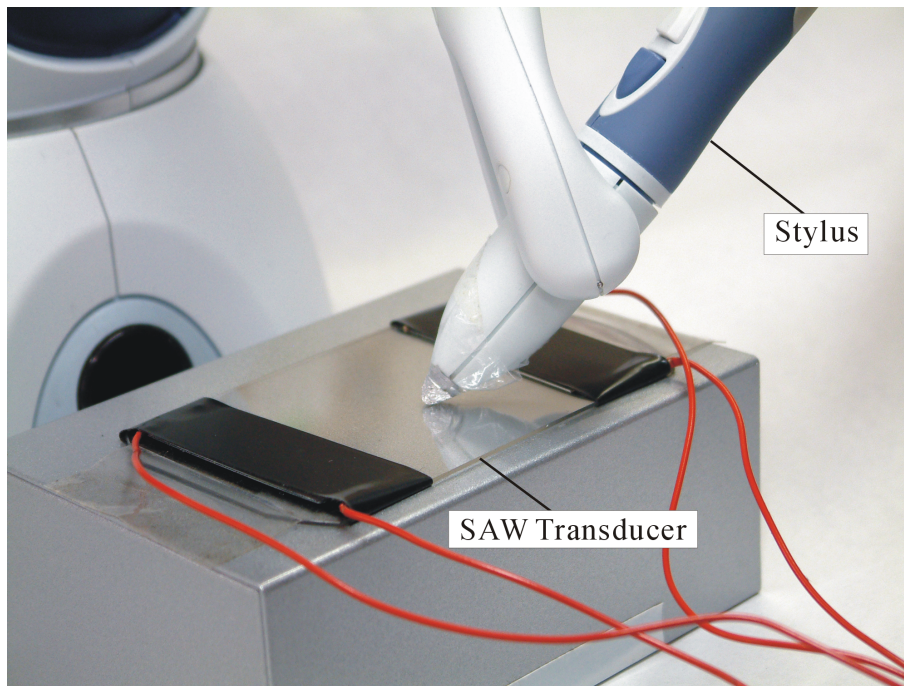


Fig. 5.3 Closeup of stylus and attachment as slider

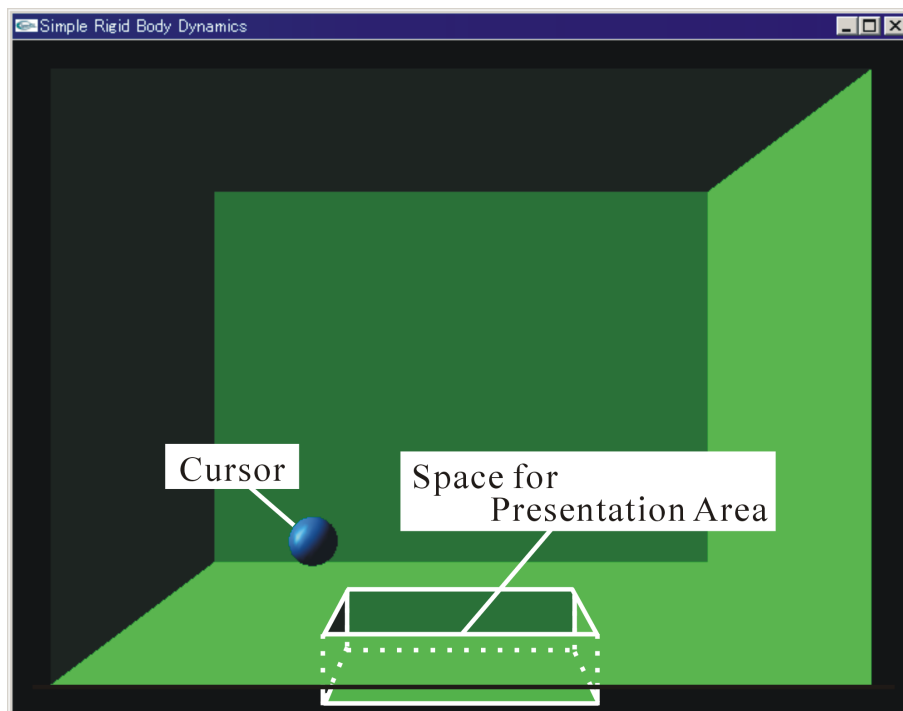


Fig. 5.4 3D virtual space for operating PHANToM

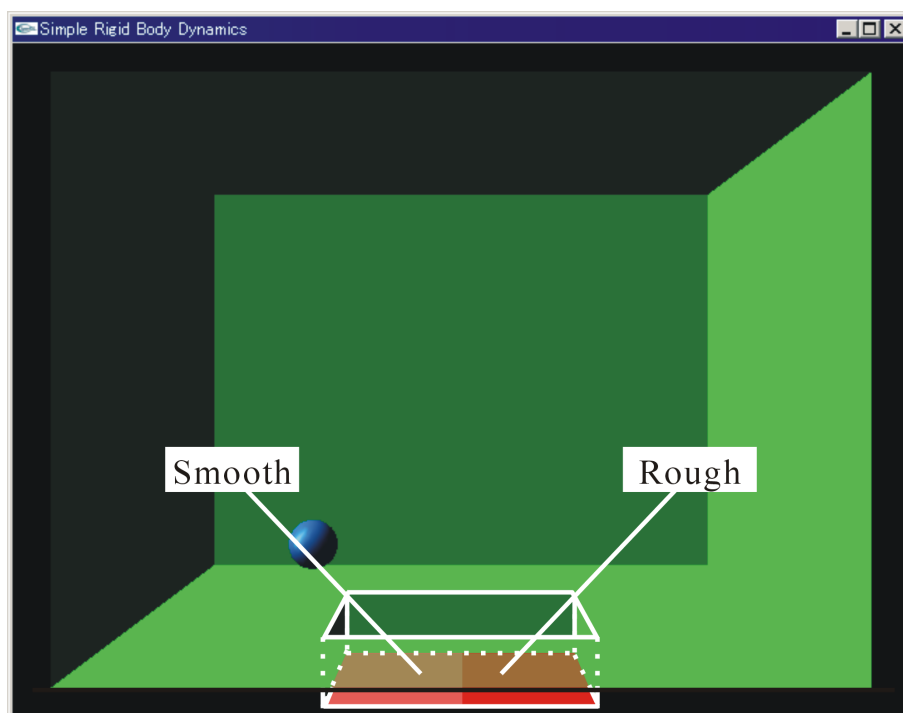


Fig. 5.5 Generating different sensations

用いた．得られた結果を Fig. 5.7 に示す．図中の赤線がスタイラスの速度で，青線が弾性表面波の制御信号である．結果より，弾性表面波の励振の ON/OFF により摩擦変化が生じてペンが振動することで，粗さ感覚の提示が可能であることを確認した．力覚提示によりスタイラスの動作範囲を制限することで，使用者が振動子位置を意識することなく皮膚感覚の提示が可能であった．これにより，皮膚感覚と力覚との融合による有効性が確認できた．

## 5.2 障害者向け補助デバイス

### 5.2.1 視覚障害者

先天的，あるいは後天的理由により，身体機能の一部に障害<sup>\*1</sup>を有する者のことを「身体障害者」という．障害には様々な種類があるが，このうち目が見えない・見にくいといった視覚に障害を持つ者は視覚障害者 (visually-impaired people) と呼ばれる．また，これに対して視覚に障害を持たない者の事を晴眼者 (sighted people) という．現在，全世界において視覚障害者は 2 億 8500 万人いるとの報告がなされている [105]．これら視覚障害者の大半は新興国に

<sup>\*1</sup> 近年，「障害」という表記について「害」という字を避け「障碍」あるいは「障がい」という表記をすべきとの議論があるが，本論文では「法令にて使用されていること」「常用漢字であること」から「障害」の表記としている．



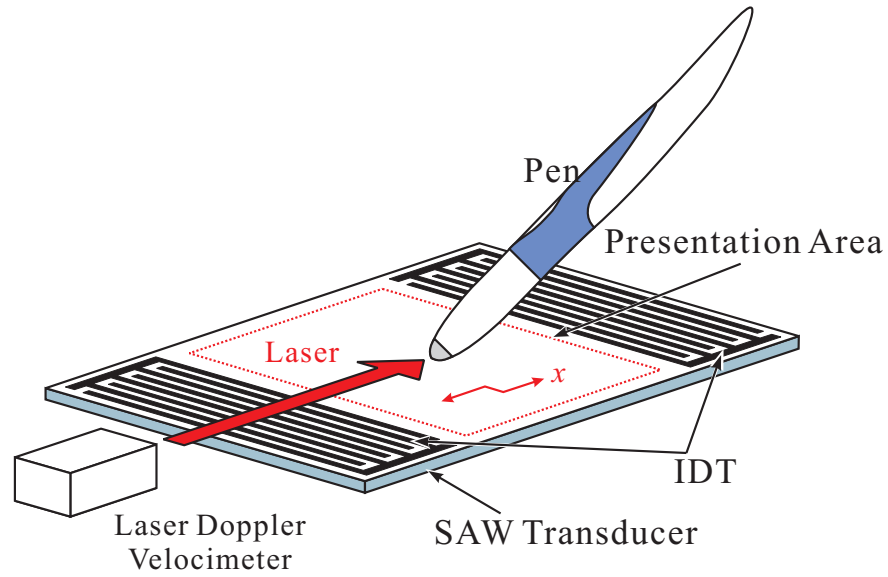


Fig. 5.6 Experimental configuration for measuring stylus velocity

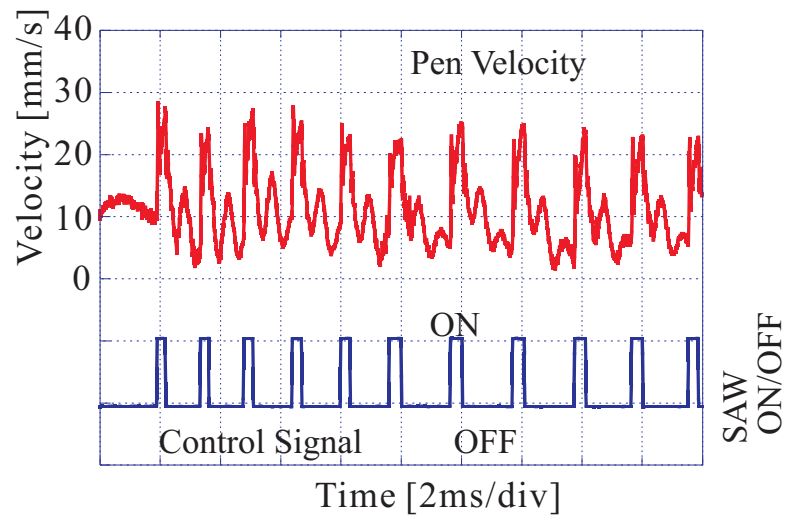


Fig. 5.7 Stylus velocity ( $k_r=200\mu\text{m}$ ,  $d=20\%$ )

において生活しているが、先進国において生活する視覚障害者も少なくない（全視覚障害者の10%）。視覚障害者は残存視覚のある弱視者（low vision）と視覚のない全盲者（blindness）に分けられ、視覚障害者のうち8割以上は弱視者である [105]。現在、日本国内には少なくとも37万人の視覚障害者が生活している [106]。日本国内において、視覚障害者のうち6割以上が弱視者である [106]。世間一般では視覚障害者というと点字を使用する全盲の人を想像することが多いが、一言に視覚障害者といっても様々な視覚障害の程度がある。また、単純な「見える/見えない」といった視力の程度だけではなく、それ以外にも様々な視覚障害が存在する。代表的なものを以下に記す。

#### 夜盲症 (night blindness)

鳥目とも呼ばれ、暗部における視力が著しく劣る疾病である。一般的に人間の視力は暗部では落ちるが、健常者に比べて著しく低下するものをいう。先天性のものは遺伝、後天性のものはビタミン A の欠乏が原因である。

#### 視野狭窄

視野とは目に見える範囲であるが、人間の平均は両目で120°程の視野を持っている。緑内障や網膜剥離、脳梗塞等の疾病を原因として視野が狭まることがあり、これを視野狭窄という。

#### 眼瞼下垂 (Ptosis)

瞼とは眼球を上下から覆う不透明・開閉式の器官である。上瞼の機能に障害が生じ、瞼が開きにくくなる疾病を眼瞼下垂といい、眼筋疾患や加齢、コンタクトレンズ等により生じることがある。

#### 眼振 (眼球振盪, nystagmus)

意思と関係なく眼球が動く現象で、先天性のものが多い。眼や脳、神経系統の疾病を原因とする。

#### 羞明 (photophobia)

強い光を受けたときに不快感や痛みなどを生じる。様々な眼疾患や神経疾患を原因とする。

#### 複視 (Diplopia)

物が2重に見える視覚異常である。視神経や脳疾患などを原因として発症する。

#### 色覚異常 (color blindness)

色覚が正常な範囲から外れている状態をいう。色覚、すなわち色は網膜中心に分布する錐体細胞 (cone cell) と桿体細胞 (rod cell) から認識される。錐体細胞には3種類あり、明所における光の3原色 (RGB) の波長に反応する。桿体細胞は感度が高く暗所において反応するが色覚にはあまり関与しない。色覚異常においてはこのうちの錐体細胞の欠損が原因であり、ほとんどは遺伝性の先天異常であるが、脳の一部を欠損することによ

る後天異常も存在する。

ただし、上記のうち夜盲症と色覚異常は身体障害者福祉法における視覚障害ではない。これらの代表的な視覚障害からもわかるように、先天的な理由だけでなく、晴眼者が疾病や怪我等によって後天的に視覚障害を負うことも少なくない。特に代表的な疾病として、緑内障 (glaucoma) や白内障 (cataract) が挙げられ、これらを原因として視覚に障害を負うものは全世界では 35% であると報告されている [105]。

### 5.2.2 聴覚障害者

耳が聞こえない・聞こえにくいといった聴覚に障害を持つ者は聴覚障害者 (hearing-impaired people) と呼ばれる。これに対し、聴覚に障害を持たない者を健聴者 (hearing people) という。聴覚障害者は、耳がまったく聞こえない聾者と難聴者のほか、中途失聴者と老人性難聴者に分けることができる。軽度の難聴であれば補聴器の使用により改善が認められるが、特定周波数の神経伝達に問題があるような場合、改善しないこともある。原因としては先天性のものと病気等による後天性のものがあるが、先天性の場合は発話障害を伴う場合もある。難聴者の多くは、手話や筆談の他、後述の手書き文字 (手のひら書き) によるコミュニケーションを行うことができる。聴覚障害者のうち、視覚障害を伴う者を盲聾者と呼び、この場合、特に情報障害やコミュニケーション障害等、生活に困難が生じる。本研究においては、より補助の必要性が高いと思われる視覚障害者を対象とした検討を行うが、聴覚障害者に対しても補助の必要性は高く、今後検討する余地が十分にあるものと考えられる。

### 5.2.3 視覚障害者と触覚・聴覚

人間の感覚は体性感覚と特殊感覚に分けられ、視覚や聴覚は感覚器を用いる特殊感覚、触覚は感覚器が表出しない体性感覚に分類される。視覚障害者は視覚に障害を持つため、視覚以外の感覚器を用いて情報を補い生活する。視覚障害者は古くから触覚を代替として情報を得ることが多い。例えば、盲人の職業として古来より有名なものに、指先の感覚が重要である鍼灸や按摩、琵琶法師といった音楽家等の比較的触覚に依存する職業が多く知られている [115]。また、視覚障害者の情報収集手段の一つとして、点字 (Braille) を用いる方法が一般的に広く知られている。点字とは視覚障害者が触覚を用いて読む字であり、開発者の Louis Braille の名が付けられた Braille 点字が一般的である。これは 1 文字を 6 点のドットで表すもので、日本国内においては 50 音が割り当てられ、また数符や外文字を前におくことで数字、アルファベットの表記が可能である。この点字を会話用に簡略化したものとして、両手の人差し指、中指、薬指の計 6 本を点字の 6 点に対応させた「指点字」というものがある [116]。一方、視覚障害者の体表を使用して読む点字があり、これを「体表点字」という [117][118]。この体表点字で

は従来は6点式の点字を6点の振動提示によって再現していたが、これに加えて「3点式体表点字」、「2点式体表点字」、及び「1点式体表点字」というものがあり、6点式の点字が長短の振動提示により再現可能であることが報告されている [119][120]。これらの体表点字について様々な評価・解析がなされており [121][122]、また遠隔地への伝送や携帯端末への搭載等も試みられている [123][124]。また、点字に対し、晴眼者の使用する文字を墨字という。しかしながら、点字の普及率は決して高いとは言えず、点字を読むことができない人も多い [107]。これは特に後天的な視覚障害者に顕著であり、習得の困難さが理由の一つであると考えられる。このため、特に習得にあたり特別な訓練等を要することのない聴覚情報、音声による読み上げを利用する視覚障害者が多い。また、触覚を用いたコミュニケーションの手段として、手書き文字(手のひら書き)を用いる方法がある。これは視覚障害者の手のひらに、指先によって平仮名や片仮名、漢字等を書いて伝える方法であり、音声と同様、特に訓練等を必要としない。この方法は特に聴覚に障害を持つ場合のコミュニケーションに使用されている。

#### 5.2.4 視覚障害者によるコンピュータ利用

近年、コンピュータを用いた情報収集が盛んになっており、障害者にとってコンピュータは社会参加する上で有用なツールとなりうる。これまで、厚生労働省による調査によって、弱視者を含む視覚障害者のうち1割は現在コンピュータを利用しており、また利用していないもののうち1割は今後コンピュータを利用したいと回答している [107]。また、視覚障害者によるコンピュータ利用に関しても調査がなされており、コンピュータを用いた情報収集における様々な問題が指摘されている [108]。一方、総務省による調査では世帯別のコンピュータや携帯情報端末を用いたインターネット利用者率は8割を超えており、インターネットを用いた情報収集は広く普及しており、一般的な方法となっている [109]。しかしながら、GUI環境下で動作するコンピュータはあくまで晴眼者の使用が前提となっており、視覚障害者にとって操作が困難であることから、視覚障害者が“情報弱者”となる可能性があることがわかる。また、後天的な視覚障害者の場合、これまでの環境から一変するため、社会復帰には大変な訓練が必要となる。

#### 5.2.5 視覚障害者向けコンピュータ操作補助

視覚障害者向けのコンピュータ操作補助デバイスとして様々なものが市販されている。代表的なものを以下に記す。

##### 点字ディスプレイ (refreshable Braille display)

点字を表示する電気機械式デバイスであり、平坦な表面に穿たれた穴からドットが上がってくることで点字を表す。1列当たり40文字から80文字の点字を1度に表示する

ことができるものが一般的である。また、小型な携帯型デバイスもある。一般的な点字ディスプレイを Fig. 5.8 に示す [125]。ドットの持ち上げには圧電素子が用いられることが多く、1文字当たり8ドット、それぞれに圧電素子が必要であるため非常に複雑なデバイスである。また、視覚障害者の日常的な使用による磨耗等に耐えるため、信頼性を確保する必要があり高価なデバイスとなっている。点字ディスプレイの制御には後述のスクリーンリーダーが必要であり、ユーザーによっては音声での読み上げと点字の表示を状況に応じて使い分ける。

#### 点字キーボード

点字をダイレクトに入力することができるデバイスである。点字キーボードの一例を Fig. 5.9 に示す [126]。

#### 点字タイプライター (perkins braille)

点字文書を手書きする場合、点字用紙を固定して紙の裏から点字を打ち込む点字器が用いられるのが一般的であるが、これを自動化した点字タイプライターも普及している。一般的な点字タイプライターを Fig. 5.10 に示す [127]。しかしながら、近年は後述の点字プリンタを使用してコンピュータ上で点字文書を作成する方法が主流となっている。

#### 点字プリンタ

コンピュータから出力された点字を点字用紙に打ち出す機械である。墨字を同時に印刷することが可能なものもある。

また、これらの機能を兼ね備えたものも市販されている。これらは主に点字を扱うことのできる全盲者向けであり、前述のように点字普及率が低いいため限定的なデバイスである。また、購入にあたっては自治体からの補助制度等があるものの、デバイス自体は安価なものでも10万円程度と非常に高価なものである。これに対し、弱視者がコンピュータを操作する場合はソフトウェアを用いる方法が一般的であり、OS標準で画面の拡大や配色の変更が可能である [110]。代表的な方法を以下に記す。

#### 画面の拡大

マウスポインタの周辺部分の画面を拡大するソフトウェアがOS標準で用意されている。しかしながら、ドット画像を拡大するため拡大後の画像が粗く、見づらいつといった問題点もある。

#### 配色の変更

画面全体の配色をハイコントラストにする機能がOS標準で用意されている。主に色覚異常の場合に使い易くなることが多い。

#### スクリーンリーダー

コンピュータの画面を音声合成によって読上げるソフトウェアである [128][129]。画面上の情報だけでなく、操作を読み上げる機能もある。GUIのウィンドウやスクロール



Fig. 5.8 Braille display (amedia Braille SENSE OnHand from amedia's website[125])

バーなどのグラフィカルな情報をテキストに変換するため複雑な処理が必要であるが、近年スクリーンリーダーの支援 API が開発されている。また、前述の点字ディスプレイへの出力を行うこともでき、多くの視覚障害者に使用されている。OS 標準で用意されている他、近年では携帯電話への搭載例もある。

これらはソフトウェアでの対応であるため安価な方法であるが、GUI 環境下における操作補助としては不十分である。キーボードを使用したコンピュータ操作が前提となっており、GUI を用いるメリットである直感的な操作・マルチタスクといった恩恵を十分に受けることができない。これらのことが原因となり、視覚障害者によるコンピュータ利用の妨げとなっているとも考えられる。

加えて、これまでに触覚のうち特に力覚提示デバイスを用いた視覚障害者補助デバイスが提案、開発されている。力覚提示デバイスを用いて盲目者に 3 次元の力覚提示を行ったものや [111]、マウスと力覚提示とを組み合わせると一般的なコンピュータ操作を補助するものや [112]、タッチパネルと永久磁石を用いた力覚提示とを組み合わせたインターフェース [113][114] 等が提案されている。しかしながら、これまで研究・開発されてきた力覚提示を行う補助デバイスは、いずれも高価な研究用デバイスや独自デバイスによるものがほとんどであり、実用的ではない。

### 5.2.6 視覚障害者に対する皮膚感覚提示実験

第 4 章にて述べた皮膚感覚ディスプレイを用いて、視覚障害者に実際に体験してもらった。全盲の盲学校職員 2 名を被験者とし、

- ・ペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイ (4.6.1 にて用いた移動型振動子を適用したもの)
- ・4.4.1.3 にて述べたシート状超音波振動子を携帯情報端末 (Apple iPod touch) に適用したもの [89]



Fig. 5.9 Braille keyboard (Knowledge Creation Blekki from Knowledge Creation's website[126])



Fig. 5.10 Perkins brailler (KGS Perkins Brailler from KGS's website[127])

の2点について、使い勝手等の意見を伺った\*2。デモンストレーションには4.6.1.1章におけるソフトウェアを用いた。実際に体験している際の様子を Fig. 5.11 及び Fig. 5.12 に示す。ソフトウェアには様々な形状(四角形や三角形等)を表示したが、粗さ情報の提示によってこれらの形状の認識が可能であることがわかった。しかしながら、シート状超音波振動子を用いたデモンストレーションではソフトウェアの都合上カーソル位置が指の位置と一対一対応していないことから、使いにくいとの感想を得た。

また、デモンストレーションの結果、以下のような意見を伺った。

- (1) 枠にガイドを取り付け、液晶面に拘束したほうが使いやすい
- (2) 枠にクリック用のボタンを取り付け、マウスのように使う
- (3) PDF 文書等のレイアウトを認識できるようにする
- (4) ダイアログのボタン等、予め提示する形状を決めておく

これらの意見について、(1)は枠が自由に動くため導入の段階でどこにあるのか認識することができず、視覚のまったくない全盲の方特有の意見と考えることができる。点字を読む際には

\*2 本実験実施時には埼玉大学の倫理規則が施行されておらず、倫理委員会は設置されていなかったが、本実験において特に個人情報記録しておらず、得られた情報は匿名化されていたことを付記する。

指は横移動に限定されるため、それと同じような動作のほうが慣れる必要がなく使いやすいとのことであった。

また、(2)については、ペン自体がある程度小さく、視覚障害者には使いにくいとのことであった。液晶画面に表示してある情報を直に触れることのできる装置、すなわち触覚コンタクトレンズ [130] のような装置のほうが直感的に使うことができるのではないかと思われる。

### 触覚コンタクトレンズ

触覚コンタクトレンズ [130] とは、触覚刺激を増幅するデバイスである。軍手のメリヤス編みに着想を受けて開発されており、これまで心理物理実験 [131] や有限要素解析による物理現象の解明 [132] が行われている。今後微細な凹凸の検査や技能伝承等に利用が期待されている。

(3)については、現在視覚に障害を持つ人が様々な文書の閲覧をする際には前述の「スクリーンリーダー」が使用されている。しかしながら、コンピュータの環境は様々であり、またソフトウェアの対応状況についても不十分である。近年、レイアウト情報を含むことで様々な閲覧環境において元のレイアウト通りに文書を表示することの可能な PDF (portable document format) ファイルの普及が進んでいる。PDF ファイルの普及は視覚障害者の就労環境についても同様である。この PDF ファイルについてもスクリーンリーダーによって読み上げを行うが、得られる情報は文書情報のみに留まる。このため、レイアウトに意味のある文書や写真等がレイアウトされている場合に構成がわからないことや、読み上げ自体行うことができないこともある。このような問題についても調査が行われているものの、いまだ発展途上である [133]。そのため、レイアウト情報の提示に触覚を利用できるのではないかとのことであった。

(4)については、GUI ベースのコンピュータではダイアログによりコンピュータ ユーザー間の対話が行われる。視覚障害者にとってダイアログの操作は非常に困難である。このダイアログのボタン等に予め形状等を割り当てておき、対応した触覚のフィードバックを行うことで使い勝手がよくなるのではないかとのことであった。

これらのことにより、視覚障害者に対して触覚によるアプローチは非常に有効な手段であり、応用を検討する必要性が十分にあると考えられる。

### 5.2.7 安価な力覚提示デバイスの利用

力覚とは、触覚のうち弾力や抵抗力を認識する感覚である。視覚障害者の補助においては皮膚感覚以上に力覚の重要性も高いと考えられることから、市販の安価な力覚提示デバイスを用いた視覚障害者補助についても検討および実験を行った。本項については力覚についての内容となるため、実験についての詳細は付録として付記する。





Fig. 5.11 Demonstration of pen tablet type SAW tactile display for blind persons



Fig. 5.12 Demonstration of tactile display using sheet-type ultrasonic transducer for blind persons

### 5.2.8 今後の展望

#### 5.2.8.1 皮膚感覚提示デバイスと力覚提示の融合

コンピュータ操作補助デバイスの更なる改善案として、大まかなウィンドウ位置・サイズの情報(現在のシステムをそのまま用い、更にウィンドウ内部の情報(フォルダウィンドウであればアイコン位置、アプリケーションウィンドウであれば表示内容等)を皮膚感覚ディスプレイを併用して提示することが考えられる。皮膚感覚ディスプレイを融合することでより詳細な情報提示も可能であるため、視覚障害者だけでなく晴眼者にとってもユーザビリティの高い、より直感的な操作が可能なデバイスを実現できると思われる。

## 第 6 章

### 結論

#### 6.1 本研究で得られた成果

本研究では，超音波振動を用いた皮膚感覚インターフェースについて，弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイに着目し，現状の弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの抱える諸問題の解決を図った．本論文では以下のことに関して述べた．

- ・ 弾性表面波を応用したデバイスの紹介
- ・ 新たな弾性表面波の励振方法の提案及び励振方法の検証，従来の方法との比較
- ・ ペンを用いた弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの製作と評価，皮膚感覚提示方法の変更によるリアリティの追求，提案した弾性表面波励振方法の実装及び大面積化の実現
- ・ 皮膚感覚と力覚との融合，皮膚感覚提示による視覚障害者に対する補助の提案

第 2 章「弾性表面波」では，弾性表面波について概説し，代表的な弾性表面波デバイスについて述べた．また，弾性表面波振動子の製作方法と弾性表面波の励振・伝播について述べた．

第 3 章「弾性表面波励振システムの簡易化」では，従来 of 弾性表面波励振方法について述べ，問題点であるシステム全体の高コスト化・複雑化について述べた．また，この問題点の解決策としてパルス波の急峻な立ち上がり及び立ち下がりを用いた弾性表面波の励振方法を提案した．提案した励振方法について予備実験を行い，実際に弾性表面波の励振が可能であることを確認した．加えて，パルスの立ち上がり・立ち下がりを繰り返すことで弾性表面波の連続波が励振可能であることを確認した．従来 of 正弦波を用いた励振方法とパルス波を用いた励振方法それぞれについて効率の比較を行い，励振効率はどちらも同程度であることを確認した．ここで，従来 of 励振方法では A 級増幅アンプを用いているが，提案した励振方法では FET による高電圧のスイッチングを用いている．このため増幅効率を視野に入れると，提案した励振方法は非常に効率が高く，今後の応用展開の可能性を秘めている．これにより，初期コスト及び運用コストを低減可能な弾性表面波の励振方法を実現した．

第4章「弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの改善」では、弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイについて述べた。触覚ディスプレイについて簡単に説明し、近年需要の増している触覚再現・提示分野について概説した。また、弾性表面波を用いた皮膚感覚ディスプレイについて、これまでのコンピュータインターフェースへの適用例を記し、このうちペンタブレット型のインターフェースについて詳細な検討を行った。加えて、弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにより提示される感覚について、「不自然さ」の検討を行った。弾性表面波皮膚感覚ディスプレイでは弾性表面波のON/OFFにより皮膚感覚の提示が行われ、「一定の粗さ表面」を再現する場合速度に比例したON/OFF制御がなされていた。本研究では「不自然さ」がこの単純な速度比例のON/OFF制御にあると考え、皮膚感覚により得られた振動の解析を行った。実際の粗さ表面についても同様に振動解析を行い、皮膚感覚ディスプレイとの比較を行った。この結果、「不自然さ」の原因が低周波領域における一定周波数間隔のピークであると考え、このピークの低減のため新たに制御方法の提案を行った。提案した制御方法では周波数ピークの低減を行うため、M系列乱数のON/OFF制御信号への参照を行った。これにより得られる振動の周波数に「ゆらぎ」を持たせることができた。デモンストレーション及び弁別実験より、この「ゆらぎ」を持たせた振動により自然な間隔の提示が可能であることを示した。より「自然」な感覚をユーザーに与えることは皮膚感覚ディスプレイを産業応用する上で重要なファクターを占めると考えられる。また、第3章にて提案したパルス波による弾性表面波の励振方法の皮膚感覚ディスプレイへの実装を行った。高電圧のパルスを生成するためのパルスアンプを製作し、大面積の皮膚感覚ディスプレイを製作した。これらを用いてデモンストレーションを行い、従来と同様に粗さ感覚が提示可能であることを確認した。これにより、皮膚感覚ディスプレイを安価に大面積化する見通しを得ることができた。

第5章「皮膚感覚ディスプレイの応用」では、皮膚感覚ディスプレイの応用例として力覚提示デバイスとの組み合わせを行い、触覚提示の可能性について検討した。力覚提示により皮膚感覚ディスプレイのスタイラス動作範囲を制限し、皮膚感覚ディスプレイの欠点を補うことが可能であることを確認した。また、皮膚感覚提示による視覚障害者補助についても検討を行った。視覚障害者と聞くと全盲者を思い浮かべる人が多いが、残存視力のある弱視者が大半を占めており、また怪我や疾病等により後天的に視力を失う人も多い。本研究では視覚障害者に対し製作した皮膚感覚ディスプレイを用いてデモンストレーションを行い、視覚障害者に対する皮膚感覚提示の有効性を確認した。

第6章「結論」では本論文の結論と今後の課題を述べる。

## 6.2 今後の展望

本研究では、パルス波を用いた弾性表面波の励振を実現し、皮膚感覚提示に十分な振幅を得ることができた。励振効率についても評価を行い、従来の正弦波による励振方法と同程度の励

振効率であることが確認された。この方法では励振システムを安価かつ簡易にすることができることから、以下のようなことが将来的に可能ではないかと考えられる。

- ・ 大面積の振動子の実現
- ・ 画面全体で皮膚感覚提示の可能な大面積の液晶タッチパネル

また、周波数スペクトルに着目した制御方法を皮膚感覚提示に用いることで、より自然な感覚の提示が可能となった。粗さ感覚のベースとしてキャンバス地を目指したため、本研究では低周波領域の周波数にゆらぎを持たせるよう擬似乱数を参照したが、例えば別の対象物を目的とするような場合は、擬似乱数のパラメータを変更する、もしくは別の方法を実装する必要がある。実装が複雑となるが、時間軸に着目した粗さ情報の保存・再生(テレタッチ)と併用することで、より詳細な感覚提示についても可能である。

加えて、皮膚感覚ディスプレイと力覚提示とを応用することで、触覚提示ディスプレイの可能性向上について検討した。3次元のコンピュータインターフェースとして活用することで、これまでにない臨場感や感覚再現につなげることができる。また、視覚障害者の補助としても触覚提示の有効性を示すことができた。更なる完成度の向上により、視覚障害者によるコンピュータ利用を通じた社会への参加へと繋げることが期待できる。

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり，様々な方々にお世話になりました．この場を借りて感謝いたします．

埼玉大学大学院理工学研究科 高崎 正也 教授には指導教員として研究の基礎から多岐にわたり終始熱心に御指導下さいました．特に弾性表面波に関して様々なことを教えていただき，大変お世話になりました．また数多くの相談事にも親身に対応していただきました．深く感謝を申し上げます．

埼玉大学大学院理工学研究科 水野 毅 教授には本研究を行うにあたって数多くの貴重な御指導，御助言を頂きました．制御工学において学んだことはプログラミングにおいても役立っております．心から感謝の意を表します．

埼玉大学総合研究機構 石野 裕二 技師には研究を行うにあたり，プログラミングや貴重な御助言，御助力を頂きました．特に回路設計・製作においては大変お世話になりました．厚く御礼申し上げます．

埼玉大学大学院理工学研究科 山本 浩 教授，同 綿貫 啓一 教授，同 辻 俊明 准教授には本論文の執筆にあたり御指導，御助力を頂きました．謹んで感謝の意を表します．

スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL) Hannes Bleuler 教授をはじめ，EPFL LSRO の皆様には力覚の研究について貴重な御助言を頂きました．心より感謝いたします．  
Le Professeur Hannes Bleuler, *École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, et membre du LSRO, EPFL, merci beaucoup pour vos précieux conseils pour l'interface haptique.

埼玉大学大学院理工学研究科 原 正之 助教には，EPFL をはじめ，様々な場所で貴重な経験をさせていただきました．心より感謝の意を表します．

埼玉大学大学院理工学研究科 山口 大介 助教には，研究について貴重な御助言を頂きました．心より感謝の意を表します．

埼玉県立特別支援学校 埴保己一学園（埼玉県立盲学校）の職員の皆様には実験に協力していただきました．深く感謝いたします．

小谷浩之 博士には，弾性表面波や皮膚感覚ディスプレイについて深くお世話になりました．また，研究を進めるにあたり様々な御助言を頂きました．心より感謝の意を表します．

埼玉大学大学院理工学研究科博士後期課程 加藤貴彰 氏には，学部時代から公私共にたいへ

んお世話になりました。博士後期課程に進学した後も互いの研究について議論し、切磋琢磨することができました。心より感謝の意を表します。

また、研究を進めるにあたって制御工学研究室の皆様には研究の御助力、御助言を頂きました。また、日々の生活においてたいへんお世話になりました。深く御礼申し上げます。

最後に、終始温かく見守り続けてくれた家族に感謝いたします。両親には、自分の進む道に理解を示していただき、また辛抱強く見守っていただきました。幾度となく励まし支えていただいた妻 美穂と、まもなく生まれて来ようとしている我が子に、心から感謝いたします。

## 参考文献

- [1] 児島俊弘：“弾性表面波工学入門 (9),” ニューセラミックス, No.6, pp.79–87, 1994.
- [2] 児島俊弘：“弾性表面波工学入門 (10),” ニューセラミックス, No.8, pp.59–68, 1994.
- [3] 児島俊弘：“弾性表面波工学入門 (11),” ニューセラミックス, No.4, pp.55–64, 1995.
- [4] 児島俊弘：“弾性表面波工学入門 (12),” ニューセラミックス, No.6, pp.59–66, 1995.
- [5] 日本半導体製造装置協会 編：“半導体製造装置用語辞典 第6版,” 日刊工業新聞社, 2006.
- [6] 日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会 編：“弾性波素子技術ハンドブック,” オーム社, 1991.
- [7] 日本学術振興会弾性波素子技術第150委員会 編：“弾性波デバイス技術,” オーム社, 2004.
- [8] 山之内和彦, 佐藤和助, 小田川裕之：“弾性表面波・半導体集積型コンボルバ,” 電子情報通信学会技術研究報告. US, 超音波, Vol.96, No.249, pp.1–6, 1996.
- [9] M. Kurosawa, M. Takahashi, and T. Higuchi：“Friction drive surface acoustic wave motor,” *Ultrasonics*, Vol.34, pp. 243–246, 1996.
- [10] M. Kurosawa, M. Takahashi, and T. Higuchi：“Ultrasonic linear motor using surface acoustic waves,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.43, pp. 901–906, 1996.
- [11] M. K. Kurosawa, M. Itoh, and K. Asai：“Elastic friction drive of surface acoustic wave motor,” *Ultrasonics*, Vol.41, pp. 271–275, 2003.
- [12] Y. Nakamura, M. K. Kurosawa, T. Shigematsu, and K. Asai：“Effects of ceramic thin film coating on friction surfaces for surface acoustic wave linear motor,” *IEEE Symposium on Ultrasonics*, pp. 1766–1769, 2003.
- [13] T. Shigematsu, M. K. Kurosawa, and K. Asai：“Nanometer stepping drives of surface acoustic wave motor,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.50, pp. 376–385, 2003.
- [14] T. Shigematsu and M. K. Kurosawa：“Miniaturized SAW motor with 100 MHz driving frequency,” *17th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 482–485, 2004.



- [15] K. Asai and M. K. Kurosawa : “Surface acoustic wave motor using an energy circulation driving method,” *2001 IEEE Ultrasonic Symposium*, pp. 525–529, 2001.
- [16] K. Asai, M. K. Kurosawa, and T. Higuchi : “Energy circulation methods for surface acoustic wave motor,” *Electronics and Communications in Japan, Part 3, Vol.87, No.2*, pp. 10–19, 2004.
- [17] R. T. Tjeung, M. S. Hughes, L. Y. Yeo, and J. R. Friend : “Arbitrary axis rotating surface acoustic wave micro motor,” *2011 IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, pp. 180–183, 2011.
- [18] M. Kurosawa, T. Watanabe, A. Futami, and T. Higuchi : “Surface acoustic wave atomizer,” *ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.50, pp. 69–74, 1995.
- [19] J.-W. Kim, Y. Yamagata, M. Takasaki, B.-H. Lee, H. Ohmori, and T. Higuchi : “A device for fabricating protein chips by using a surface acoustic wave atomizer and electrostatic deposition,” *ELSEVIER, Sensors and Actuators B: Chemical*, Vol.107, pp. 535–545, 2005.
- [20] J. Ju, Y. Yamagata, H. Ohmori, and T. Higuchi : “High-frequency surface acoustic wave atomizer,” *ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.145–146, pp. 437–441, 2008.
- [21] J. Ju, Y. Yamagata, H. Ohmori, and T. Higuchi : “Standing wave type surface acoustic wave atomizer,” *ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.147, pp. 570–575, 2008.
- [22] A. B. Bhattacharyya, S. Tuli, and S. Majurndar : “SPICE simulation of surface acoustic wave interdigital transducers,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.42, pp. 784–786, 1995.
- [23] J. Munshi and S. Tuli : “A circuit simulation compatible surface acoustic wave interdigital transducer macro-model,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.51, pp. 782–784, 2004.
- [24] 児島俊弘 : “弾性表面波工学入門,” ニューセラミックス , No.7 , pp.61–69 , 1993.
- [25] 児島俊弘 : “弾性表面波工学入門 (3),” ニューセラミックス , No.9 , pp.67–74 , 1993.
- [26] 児島俊弘 : “弾性表面波工学入門 (4),” ニューセラミックス , No.10 , pp.79–86 , 1993.
- [27] T. Kojima and K. Shibayama : “An analysis of an equivalent circuit model for an interdigital surface-acoustic-wave transducer,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.27, pp. 163–165, 1988.
- [28] T. Kojima, H. Obara, and K. Shibayama : “Investigation of impulse response for an interdigital surface-acoustic-wave transducer,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.29, pp. 125–128, 1990.

- [29] 児島俊弘：“弾性表面波工学入門 (5),” ニューセラミックス, No.11, pp.71–78, 1993.
- [30] 小柴正則, 水戸部整一, 鈴木道雄：“金属グレーティング SAW 反射器の等価回路表示の一方法,” 日本学術振興会弾性波素子技術第 150 委員会, 第 7 回研究会資料, 1986.
- [31] M. Koshihara, S. Mitobe, and M. Suzuki：“Equivalent networks for surface acoustic wave metallic gratings,” *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.25, pp. 133–135, 1986.
- [32] 竹内正男：“弾性波表面波デバイス,” 日本音響学会第 59 回技術講演資料, pp.53–67, 1998.
- [33] 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人 編：“触覚認識メカニズムと応用技術 触覚センサ・触覚ディスプレイ,” サイエンス&テクノロジー株式会社, 2010.
- [34] K. Johnson：“Neural basis of haptic perception,” *Steven’s handbook of experimental psychology (third edition)*, Vol.1: Sensation and perception, John Wiley & Sons, pp.537–583, 2002.
- [35] 前野隆司, 小林一三, 山崎信寿：“ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.63, No.607 pp.881–888, 1997.
- [36] 下条誠, 石田朋大, 渡辺哲也：“視覚障害者用 Tactile Display の開発,” 日本バーチャルリアリティ学会第 4 回大会論文集, pp.101–102, 1999.
- [37] 池井寧, 山田真理子：“触覚テクスチャディスプレイ 2 の設計,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.11, No.1, pp.105–114, 2006.
- [38] T. Matsunaga, K. Totsu, M. Esashi, and Y. Haga: “Tactile display for 2-D and 3-D shape expression using SMA micro actuators,” *Proceedings of the 3rd Annual International IEEE/EMBS Special Topic Conference on Microtechnologies in Medicine and Biology*, pp.88–91, 2005.
- [39] Y. Haga, W. Makishi, K. Iwami, K. Totsu, K. Nakamura, and M. Esashi: “Dynamic Braille display using SMA coil actuator and magnetic latch,” *ELSEVIER, Sensors and Actuators A: Physical*, Vol.119, No.2, pp.316–322, 2005.
- [40] Q. Wang, and V. Hayward: “Compact, Portable, Modular, High-performance, Distributed Tactile Transducer Device Based on Lateral Skin Deformation,” *Proceedings of 2006 Symposium on Haptic Interfaces For Virtual Environment And Teleoperator Systems*, pp.67–72, 2006.
- [41] J. Pasquero and V. Hayward: “STReSS: A Practical Tactile Display System with One Millimeter Spatial Resolution and 700 Hz Refresh Rate,” *Proceedings of Eurohaptics 2003*, pp.94–110, 2003.
- [42] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 舘暲：“皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ,” 電子情報通信学会論文誌, J84–D–II, No.1, pp.120–128, 2001.

- [43] 梶本裕之, 稲見昌彦, 川上直樹, 舘暲: “電気触覚を用いた皮膚感覚のオーグメンティドリアリティ,” 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.8, No.3, pp.339–348, 2003.
- [44] H.Kajimoto, M.Inami, N.Kawakami, S.Tachi: “SmartTouch: Electric Skin to Touch the Untouchable,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.24, No.1, pp.36–43, 2004.
- [45] H.Kajimoto, N.Kawakami, S.Tachi: “Electro-Tactile Display with Tactile Primary Color Approach,” *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2004.
- [46] 梶本裕之, 舘暲: “高密度・大面積電気触覚ディスプレイにおける感覚安定化,” 第20回生体・生理工学シンポジウム予稿集, 2005.
- [47] M. Biet, F. Giraud, and B. Lemaire-Semail: “Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate,” *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, Vol.54, No.12, pp. 2678–2688, 2007.
- [48] L. Winfield, J. Glassmire, J. Colgate, and M. Peshkin: “T-PaD: Tactile pattern display through variable friction reduction,” *Proceedings of the Second Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 421–426, 2007.
- [49] N. Marchuk, J. Colgate, and M. Peshkin: “Friction measurements on a large area TPAD,” *Proceedings of the 2010 IEEE Haptics Symposium*, pp. 317–320, 2010.
- [50] Evren Samur, J. Edward Colgate, and Michael A. Peshkin: “Psychophysical Evaluation of a Variable Friction Tactile Interface,” *Human Vision and Electronic Imaging 2009*, Vol.7240, pp.72400J-1–72400J-7, 2009.
- [51] Erik C. Chubb, J. Edward Colgate, and Michael A. Peshkin: “ShiverPaD: A Glass Haptic Surface That Produces Shear Force on a Bare Finger,” *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.3, No.3, pp.189–198, 2010.
- [52] T. Iwamoto, T. Maeda, and H. Shinoda: “Focused ultrasound for tactile feeling display,” *Proceedings of the 11th International Conference on Artificial reality and Telexistence*, Vol.3, No.3, pp.121–126, 2001.
- [53] 星貴之, 岩本貴之, 篠田裕之: “空中超音波フェーズドアレイによる触覚ディスプレイ” 日本バーチャルリアリティ学会第13回大会論文集, 3A2-2, 2008.
- [54] 高橋 将文, 星 貴之, 篠田 裕之: “空中映像との触覚インタラクション,” 第10回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.155–156, 2009.
- [55] 星貴之: “触覚フィードバックのある空中入力システムの開発,” 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.182–183, 2010.
- [56] Masaya Takasaki, Takaaki Nara, Susumu Tachi and Toshiro Higuchi: “A Tactile

- Display Using Surface Acoustic Wave,” *Proceedings of the 2000 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp.364–367, 2000.
- [57] 高崎正也, 奈良高明, 樋口俊郎, 水野毅: “弾性表面波の進行波を用いた皮膚感覚ディスプレイ,” 日本機械学会論文集 (C 編), Vol.72, No.724, pp.3886–3891, 2006.
- [58] 櫻田武朗, 高崎正也, 水野毅: “パッシブ型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの開発,” 第17回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, pp.511–514, 2005.
- [59] Masaya Takasaki, Takeo Sakurada, Hiroyuki Kotani and Takeshi Mizuno: “A Surface Acoustic Wave Tactile Display on Phantom,” *15th International Conference on Artificial Reality and Telexistence*, p.279, 2005.
- [60] T.Nara, M.Takasaki, T.Maeda, T.Higuchi, S.Ando and S.Tachi: “Surface Acoustic Wave Tactile Display,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.21, No.6, pp.56–63, 2001.
- [61] 高崎正也: “弾性表面波のメカトロニクスへの応用に関する研究,” 博士論文, 東京大学, 2000.
- [62] 河村正行: “よくわかるタッチパネル,” 電波新聞社, 2004.
- [63] テクノベインズ株式会社: “タッチパネル (超音波表面弾性波方式),” <http://www.technoveins.co.jp/products/touchpanelled/>.
- [64] Plastic Logic Ltd.: “Flexible touchscreen,” <http://www.plasticlogic.com/>.
- [65] Human media lab. (Queen’s university): “Papertab,” <http://www.humanmedialab.org/papertab>.
- [66] Wacom: “Pen Display,” <http://tablet.wacom.co.jp/>.
- [67] パナソニック株式会社デバイス社: “アコースティックタッチパネル (A-TTP),” <http://panasonic.net/id/>.
- [68] Panasonic Corporation: “Display device,” US Patent 7593159, 2009.
- [69] SMK 株式会社: “タッチパネル (フォースフィードバックタイプ),” [http://www.smk.co.jp/products/touch\\_panels/](http://www.smk.co.jp/products/touch_panels/).
- [70] Tactus Technology: “Tactile Layer,” <http://www.tactustechnogy.com/>.
- [71] Tactus Technology: “User interface system and method,” WO Patent 2012054781, 2012.
- [72] Artificial Muscle, Inc.: “Reflex,” <http://www.artificialmuscle.com/>.
- [73] Artificial Muscle, Inc.: “Electroactive polymer transducers for tactile feedback de-

- vices,” US Patent Application Publication 2011/0128239 A1 , 2011.
- [74] Senseg Ltd. : “E-Sense,”  
<http://senseg.com/>.
- [75] Senseg Ltd. : “Method and apparatus for sensory stimulation,” US Patent 7924144 , 2011.
- [76] 東芝情報システム株式会社 : “新感覚 UI ソリューション,”  
<http://www.tjsys.co.jp/>.
- [77] Apple Inc. : “Multi-touch display screen with localized tactile feedback,” WO Patent 2009085060 , 2009.
- [78] 京セラ株式会社 : “新感覚タッチパネル,”  
<http://www.kyocera.co.jp/>.
- [79] Kyocera Corporation : “Input apparatus and control method of input apparatus,” US Patent 8179378 , 2012.
- [80] H. Nishino, K. Murayama, T. Kagawa, and K. Utsumiya: “A Japanese calligraphy trainer based on skill acquisition through haptization,” *Proceedings of the 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pp. 1225–1232, 2010.
- [81] K.J. Kuchenbecker, J. Fiene, and G. Niemeyer: “Event-based haptics and acceleration matching: Portraying and assessing the realism of contact,” *Proceedings of the First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 381–387, 2005.
- [82] G. Wintergerst, R. Jagodzinski, F. Hemmert, A. Muller, and G. Joost: “Reflective haptics: Enhancing stylus-based interactions on touch screens,” *Proceedings of the Euro Haptics 2010*, pp. 382–388, 2010.
- [83] K. Watanabe and M. Yasumura: “FlexibleBrush: A realistic brush stroke experience with a virtual nib,” *Proceedings of the 20th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 47–48, 2007.
- [84] 吉紅旭, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅 : “弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを用いたペンタブレット型インターフェース,” 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 , pp.506–507 , 2006 .
- [85] M. Takasaki, J. HongXu, H. Kotani and T. Mizuno: “Application of Surface Acoustic Wave Tactile Display for Pen Tablet Interface with Visual Information,” *2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.1024–1028, 2007.
- [86] 須崎道広, 多門良, 高崎正也, 水野毅 : “シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚ディスプレイ 第一報 材料の検討,” 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門

- 講演会, pp.169–170, 2009.
- [87] 須崎道広, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚ディスプレイ 0.2mm 厚石英ガラスの超音波振動子,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 1A2–E06, 2010.
- [88] Michihiro Suzaki, Ryo Tamon, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Tactile Display Using Sheet-Like Ultrasonic Transducer,” *The 14th International Conference on Mechatronics Technology*, pp.102–107, 2010.
- [89] 須崎道広, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚ディスプレイ 第二報 振動子の厚みの検討,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.192–193, 2010.
- [90] JIS R 6010-2000: “研磨布紙用研磨材の粒度,” 日本規格協会, 2000.
- [91] JIS R 6011-1991: “研磨布紙用研磨材の粗粒の粒度試験方法,” 日本規格協会, 1991.
- [92] JIS R 6012-2000: “研磨布紙用研磨材の微粉の粒度試験方法,” 日本規格協会, 2000.
- [93] JIS R 6252-2006: “研磨紙,” 日本規格協会, 2006.
- [94] 藤井陽介, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “AM 変調を用いたアクティブタイプ弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの制御に関する研究,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2P2–B16, 2006.
- [95] Masaya Takasaki, Yousuke Fujii, Hiroyuki Kotani Takeshi Mizuno and Takaaki Nara: “Proposal of Tele-touch Using Active Type SAW Tactile Display,” *Proceedings 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp.1032–1037, 2006.
- [96] 中鉢耕平, 中島壮樹, 水野毅, 高崎正也: “弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと指ダミーを用いたテレタッチの開発,” 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.171–172, 2009.
- [97] 林直治, 中鉢耕平, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと指ダミーを用いたテレタッチ 指ダミー構造の違いに関する考察,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.188–189, 2010.
- [98] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ ペン型スキャナを用いたテレタッチの検討,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1775–1777, 2010.
- [99] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレ

- イ ペン型スキャナを用いたテレタッチの実現 ,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 2P1-O07, 2011.
- [100] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおけるペン型スキャナを用いたテレタッチの実現,” 日本機械学会 2011 年度年次大会, DVD-ROM(S153023), 2011.
- [101] Hiroki Takada, Ryo Tamon, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Proposal of Stylus-based Tele-Touch Using Stylus Type Scanner and Pen Tablet Type Surface Acoustic Wave Tactile Display,” *15th International Conference on Mechatronics Technology*, pp.354–359, 2011.
- [102] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ 複数試料によるテレタッチの評価 ,” 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.2240–2243, 2011.12.
- [103] 小谷浩之: “弾性表面波アクチュエータの高性能化,” 博士論文, 埼玉大学, 2009.
- [104] SensAble Technologies: “PHANToM Omni,”  
<http://www.sensable.com/>.
- [105] World Health Organization: “WHO Fact Sheet No.282,” 2012.
- [106] 厚生労働省編: “平成 22 年度福祉行政報告例,” 2010.
- [107] 厚生労働省編: “平成 18 年身体障害児・者実態調査結果,” 2010.
- [108] 渡辺哲也, 南谷和範, 宮城愛美, 長岡英司: “視覚障害者の携帯電話利用状況調査,” ヒューマンインターフェース学会研究報告集, Vol.9, No.5, pp.125–130, 2007.
- [109] 総務省編: “平成 23 年通信利用動向調査の結果,” 2012.
- [110] マイクロソフト株式会社編: “アクセシビリティガイドブック,” 2009.
- [111] Chetz Colwell, Helen Petrie, Diana Kornbrot, Andrew Hardwick, Stephen Furner: “Haptic Virtual Reality for Blind Computer Users,” *Proceedings of the third international ACM conference on Assistive technologies*, pp.92–99, 1998.
- [112] 福中謙一, 木村朝子, 佐藤宏介, 井口征士: “力覚フィードバックを与えるパッシブ型力覚マウスの試作と性能評価,” ヒューマンインターフェース学会論文誌, Vol.6, No.2, pp.75–82, 2004.
- [113] 小柳健一, 金原正典: “力覚提示タッチパッドの開発 第 1 報: 基本概念と試作,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 1P1-M05, 2009.
- [114] 青木真人, 小柳健一, 本吉達郎, 大島徹: “操作性向上のための力覚提示タッチパッドの改善,” 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.767–770, 2012.
- [115] 藤原自雄, 光岡裕一, 和久田哲司: “杉山和一に関する調査報告 江ノ島道の道標と各地の遺徳顕彰碑など ,” 筑波技術大学テクノレポート, Vol. 16, pp.96–100, 2009.

- [116] Yasuhiro Matsuda, Tsuneshi Isomura: “Finger Braille Teaching System,” *Character Recognition, Sciyo*, pp.173–188, 2010.
- [117] 佐々木信之, 大墳聡, 長谷川貞夫: “振動通知装置:ボディブレイルを用いた感覚代行システム,” 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol.102, No.738, pp.29–34, 2003.
- [118] Satoshi Ohtsuka, Nobuyuki Sasaki, Sadao Hasegawa, Tetsumi Harakawa: “Body-Braille System for Disabled People,” *Computers Helping People with Special Needs, Springer*, Vol.5105, pp.682–685, 2010.
- [119] 渡辺哲也, 南谷和範, 宮城愛美, 長岡英司: “振動を用いる触知覚通信に関する研究 盲聾者が利用できる通信方式の確立を目指して,” 川崎医療福祉学会誌, Vol.18, No.2, pp.465–470, 2009.
- [120] 長谷川貞夫: “人間の新しい文字情報チャンネルとしての2点式体表点字システム,” 障害学会第4回大会, 2007.
- [121] 大墳聡, 佐々木信之, 長谷川貞夫, 原川哲美: “新しい振動方式による体表点字の提案,” 電子情報通信学会技術研究報告 WIT, 福祉情報工学, Vol.107, No.179, pp.7-12, 2007.
- [122] 大墳聡, 佐々木信之, 長谷川貞夫, 原川哲美: “体表点字の実験による読取り特性の検討,” 電子情報通信学会論文誌 D, 情報・システム, Vol.J93-D, No.2, pp.100-108, 2010.
- [123] 大墳聡, 佐々木信之, 長谷川貞夫, 原川哲美: “体表点字を用いた視覚障害者および盲聾者向け新型携帯端末「ビーブル」の開発,” 電子情報通信学会論文誌 WIT, 福祉情報工学, Vol.106, No.408, pp.7-12, 2006.
- [124] 長谷川貞夫, 佐々木信之, 大墳聡, 牛田啓太, 庵悟, 九曜弘次郎: “体表点字によるヘレンケラーホン(盲ろう者電話)とIT時代の新しい点字技術,” 障害学会第7回大会, 2010.
- [125] amedia: “Braille SENSE OnHand,”  
<http://www.amedia.co.jp/product/>.
- [126] Knowledge Creation: “Blekki,”  
<http://www.knowlec.com/>.
- [127] KGS: “Perkins Brailler,”  
<http://www.kgs-jpn.co.jp/>.
- [128] Microsoft Corporation: “Microsoft Narrator,”  
<http://www.microsoft.com/windowsxp/using/accessibility/default.mspx>.
- [129] Apple Inc.: “VoiceOver,”  
<http://www.apple.com/accessibility/voiceover/>.
- [130] 佐野明人, 望山洋, 武居直行, 菊植亮, 恒川国大, 藤本英雄: “触覚コンタクトレンズ基本コンセプト,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004, 1A1–H–10, 2004.



- [131] 武居直行, 佐野明人, 望山洋, 菊植亮, 小澤敦, 藤本英雄: “触覚コンタクトレンズ心理物理実験,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004, 1A1-H-11, 2004.
- [132] 菊植亮, 佐野明人, 望山洋, 武居直行, 恒川国大, 藤本英雄: “触覚コンタクトレンズ有限要素解析,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2004, 1A1-H-12, 2004.
- [133] 渡辺哲也, 指田忠司, 長岡英司, 岡田伸一: “視覚障害者のインターネット利用状況とその課題 ユーザ調査と PDF 文書のアクセシビリティ,” ヒューマンインタフェース学会誌, Vol.6, No.1, 2004.
- [134] Novint Technologies: “Falcon,”  
<http://www.novint.com/>.
- [135] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ ペンの振動の高周波成分への着目,” 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, pp.1334-1336, 2012.
- [136] Microsoft: “MSDN ライブラリ,”  
<http://msdn.microsoft.com/ja-jp/library/default.aspx>.
- [137] R. セジウィック 著, 野下浩平, 星守, 佐藤創, 田口東 訳: “アルゴリズム C 第 3 巻,” 近代科学社, 1996.
- [138] ITU-R Recommendation BT.601-7: “Studio encoding parameters of digital television for standard 4:3 and wide-screen 16:9 aspect ratios,” International Telecommunication Union, 2011.
- [139] ITU-R Recommendation BT.709-5: “Parameter values for the HDTV standards for production and international programme exchange,” International Telecommunication Union, 2002.
- [140] Khronos Group: “OpenGL,”  
<http://www.opengl.org/>.
- [141] Novint Technologies: “HDAL API,”  
<http://www.novint.com/>.
- [142] Nonpolynomial Labs: “libnifalcon,”  
<http://qdot.github.com/libnifalcon/>.
- [143] CHAI3D: “CHAI 3D,”  
<http://www.chai3d.org/>.
- [144] SenseGraphics: “H3D API,”  
<http://www.h3dapi.org/>.
- [145] Java.net: “JTouchToolkit,”  
<http://java.net/projects/jtouchtoolkit/>.
- [146] Microsoft Corporation: “DirectX,”

- <http://www.microsoft.com/japan/directx/default.mspc>.
- [147] Microsoft Corporation : “Microsoft XNA, ”  
<http://create.msdn.com/>.
- [148] NEC Corporation : “Linear feedback shift register,” US Patent 5090035 , 1992.
- [149] Makoto Matsumoto, Takuji Nishimura : “Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator,” ACM Transaction on Modeling and Computer Simulation , Vol.8 , No.1 , pp.3-30 , 1998.
- [150] Matteo Frigo, Steven G. Johnson : “The design and implementation of FFTW3,” Proceedings of the IEEE , Vol.93 , No.2 , pp.216-231 , 2005.
- [151] 福持泰明, 森敏 : “パワー MOS FET と IGBT の動作と特徴,” トランジスタ技術 SPECIAL , No.85 CQ 出版社 , 2004.
- [152] 浅井紳哉 : “パワー・デバイスのスイッチング駆動テクニック,” トランジスタ技術 , Vol.41 , No.3 , CQ 出版社 , 2004.
- [153] 稲葉保 : “ゲート・ドライバの実力と使い方,” トランジスタ技術 , Vol.43 , No.12 , CQ 出版社 , 2006.
- [154] Jonathan Adams 著 , アイアールファースト株式会社 訳 : “コントロール IC 用ブートストラップ回路部品の選定,” International Rectifier DESIGN TIPS , International Rectifier , DT98-2J ,  
<http://www.irf-japan.com/technical-info/designtp/dt98-2j.pdf>.
- [155] International Rectifier : “高耐圧のフローティング MOS ゲート駆動 IC,” Application Note , International Rectifier , AN-978 ,  
<http://www.irf-japan.com/technical-info/appnotes/AN-978.pdf>.

## 関連発表

### 投稿論文

- [1] **Ryo Tamon**, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Generation of Drawing Sensation by Surface Acoustic Wave Tactile Display on Graphics Tablet,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration* , Vol.5, No.4, pp.242–248, 2012.
- [2] **Ryo Tamon**, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Surface Acoustic Wave Excitation Using a Pulse Wave,” *International Journal of Automation Technology* ,Vol.10, No.4, pp.564–573, 2016.
- [3] Hiroki Takada, **Ryo Tamon**, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Stylus-Based Tele-Touch System Using a Surface Acoustic Wave Tactile Display,” *International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics* , Vol.2, No.4, pp.41–57, 2012.

### 講演発表

#### 国際会議 (発表者となっているもの)

- [4] **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Surface Acoustic Wave Excitation Using Pulse Wave,” *Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control*, Hokkaido, Japan, pp.118–119, 2009.8.
- [5] **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Surface Acoustic Wave Excitation by Using Pulse Wave,” *2009 IEEE International Ultrasonics Symposium*, Roma, Italy, 2009.9.
- [6] **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “M-sequence Random Number Based Control for Pen Interface Using Surface Acoustic Wave Tactile Display,” *SICE Annual Conference 2011*, Tokyo, Japan, pp.610–615, 2011.9.

## 国際会議 (共著者となっているもの)

- [7] Masaya Takasaki, **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Takeshi Mizuno: “Pen Tablet Type Surface Acoustic Wave Tactile Display Integrated with Visual Information,” *2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Kagawa, Japan, WC3-2 (1)–(6), 2008.8.
- [8] Masaya Takasaki, **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Takeshi Mizuno: “Pen Tablet Type Surface Acoustic Wave Tactile Display Combined with Phantom,” *2008 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Thailand, pp.671–675, 2009.2.
- [9] Masaya Takasaki, **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Takeshi Mizuno: “Pen Type Surface Acoustic Wave Tactile Display with Movable Tablet,” *The 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Toyama, Japan, pp.454–459, 2009.9–2009.10.
- [10] Masaya Takasaki, **Ryo Tamon**, Hiroyuki Kotani, Takeshi Mizuno: “Tactile Display Using Surface Acoustic Wave,” *12th International Conference on New Actuators*, Bremen, Germany, pp.528–532, 2010.6.
- [11] Michihiro Suzaki, **Ryo Tamon**, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Tactile Display Using Sheet-Like Ultrasonic Transducer,” *The 14th International Conference on Mechatronics Technology*, Osaka, Japan, pp.102–107, 2010.11.
- [12] Hiroki Takada, **Ryo Tamon**, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Proposal of Stylus-based Tele-Touch Using Stylus Type Scanner and Pen Tablet Type Surface Acoustic Wave Tactile Display,” *15th International Conference on Mechatronics Technology*, Melbourne, Australia, pp.354–359, 2011.11–2011.12.
- [13] Hiroki Takada, **Ryo Tamon**, Masaya Takasaki, Takeshi Mizuno: “Control of Stylus Type Surface Acoustic Wave Tactile Display,” *MJIT-JUC Joint Symposium 2012*, Kuala Lumpur, Malaysia, MPE-4-5(CD-ROM), 2012.11.

## 国内学会 (発表者となっているもの)

- [14] 多門良, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “力覚提示デバイスを用いたペントレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ,” 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 広島, pp.23–24, 2007.12.
- [15] 多門良, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “ペントレット型弾性表面波皮膚感覚ディスブ

- レイ 液晶ディスプレイとの統合 ,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 広島, 1A1-H16, 2008.6.
- [16] 多門良, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ 移動型タブレットの導入による全画面への対応 ,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 福岡, 2P1-K01, 2009.5.
- [17] 多門良, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ 移動式振動子の導入と書き味の提示 ,” 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 東京, pp.1699-1700, 2009.12.
- [18] 多門良, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイの制御 M 系列乱数の参照 ,” 第 53 回自動制御連合講演会, 高知, pp.79-80, 2010.11.
- [19] 多門良, 小谷浩之, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ 周波数スペクトルに着目した制御 ,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 仙台, pp.1542-1543, 2010.12.
- [20] 多門良, 高田裕樹, 高崎正也, 水野毅: “パルス波による弾性表面波の励振と皮膚感覚ディスプレイへの応用,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 浜松, 1A1-B05, 2012.5.
- [21] 多門良, 高崎正也, 水野毅, Hannes Bleuler: “力覚フィードバックを用いた視覚障害者に対する GUI 操作補助の提案,” 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 福岡, pp.765-766, 2012.12.
- [22] 多門良, 高崎正也, 水野毅, Hannes Bleuler: “力覚提示を用いた視覚障害者に対するマルチウィンドウ方式 GUI の操作補助,” 日本機械学会 第 13 回「運動と振動の制御」シンポジウム, 福岡, USB 論文集, 2013.8.

### 国内学会 (共著者となっているもの)

- [23] 小谷浩之, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “周回型弾性表面波振動子を用いた触角マウス,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 長野, 1P1-I10, 2008.6.
- [24] 高崎正也, 多門良, 小谷浩之, 水野毅: “弾性表面波を利用した皮膚感覚ディスプレイ,” 日本音響学会 2008 年秋季研究発表会, 福岡, pp.1331-1334, 2008.9.
- [25] 須崎道広, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚ディスプレイ 第一報 材料の検討,” 第 10 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 東京, pp.169-170, 2009.12.
- [26] 須崎道広, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚ディス

- プレイ 0.2mm 厚石英ガラスの超音波振動子 ,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010, 旭川, 1A2-E06, 2010.6.
- [27] 林直治, 中鉢耕平, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “弾性表面波皮膚感覚ディスプレイと指ダミーを用いたテレタッチ 指ダミー構造の違いに関する考察 ,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 仙台, pp.188-189, 2010.12.
- [28] 須崎道広, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “シート状超音波振動子を用いた皮膚感覚ディスプレイ 第二報 振動子の厚みの検討 ,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 仙台, pp.192-193, 2010.12.
- [29] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ ペン型スキャナを用いたテレタッチの検討 ,” 第 11 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 仙台, pp.1775-1777, 2010.12.
- [30] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ ペン型スキャナを用いたテレタッチの実現 ,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011, 岡山, 2P1-O07, 2011.5.
- [31] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおけるペン型スキャナを用いたテレタッチの実現,” 日本機械学会 2011 年度年次大会, 東京, DVD-ROM(S153023), 2011.9.
- [32] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ 複数試料によるテレタッチの評価 ,” 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 京都, pp.2240-2243, 2011.12.
- [33] 高崎正也, 高田裕樹, 多門良, 水野毅: “弾性表面波による触覚フィードバックを備えたディスプレイの開発,” ビジョン技術の実利用ワークショップ ViEW2012, 横浜, OS1-O3 , 2012.12.
- [34] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ ペンの振動の高周波成分への着目 ,” 第 13 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 福岡, pp.1334-1336 , 2012.12.
- [35] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “ペンタレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおけるテレタッチの検討,” 電気学会知覚情報研究会, 埼玉, PI-13-006 , 2013.2.
- [36] 高田裕樹, 多門良, 高崎正也, 水野毅: “弾性表面波皮膚感覚ディスプレイにおける知覚閾値の測定,” ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, つくば, 2A1-A04 , 2013.5.

## 特許

- [37] “超音波発生装置及び超音波発生方法,” 特願 2009-180776, 特開 2011-036049, 特許第 5638777 号.

## 展示会等への出展

- [38] 高崎正也, 小谷浩之, 多門良: “感じるタッチパネル,” TECHTILE 展 2008, 横浜, 2008.11-2008.12.
- [39] TECHNO-FRONTIER2009 第 18 回モーション・エンジニアリング展, 東京, 2009.4.
- [40] “触覚によるコンピュータインターフェース,” イノベーション・ジャパン 2010, 東京, 2010.9-2010.10.
- [41] 触覚体感・交流フォーラム, 横浜, 2010.11.
- [42] コラボさいたま 2012, さいたま, 2012.11.
- [43] 彩の国ビジネスアリーナ 2013, さいたま, 2013.1.

## 本論文で用いている略語一覧

AC	: alternate current	/ 交流
Al	: aluminum	/ アルミニウム
AM	: amplitude modulation	/ 振幅変調
API	: application programming interface	/ プログラミングインターフェース
ATM	: automated teller machine	/ 現金自動預け払い機
CATV	: common antenna television	/ 共同受信テレビジョン
$C_{iss}$	: input-source capacitance	/ ソース入力キャパシタンス
Cr	: chromium	/ クロム
CRT	: cathode ray tube	/ ブラウン管
DC	: direct current	/ 直流
FET	: field effect transistor	/ 電界効果トランジスタ
FFT	: fast Fourier transform	/ 高速フーリエ変換
GUI	: graphical user interface	/ グラフィカルユーザインターフェース
IC	: integrated circuit	/ 集積回路
IDT	: interdigital transducer	/ 交差指電極
IPA	: isopropyl alcohol	/ イソプロピルアルコール
LAN	: local area network	/ ローカルエリアネットワーク
LCD	: liquid crystal display	/ 液晶ディスプレイ
LED	: light-emitting diode	/ 発光ダイオード
$\text{LiNbO}_3$ (LN)	: lithium niobate	/ ニオブ酸リチウム
$\text{LiTaO}_3$ (LT)	: lithium niobate	/ タンタル酸リチウム
MLS	: maximum length sequence	/ 最長系列
MOSFET	: metal-oxide-semiconductor field effect transistor	



		/ 金属-酸化物-半導体接合電界効果トランジスタ
OMSA	: open metal strip array	/ 開放型メタルストリップアレイ
OS	: operating system	/ オペレーティングシステム
PZT	: piezoelectric zirconate titanate (lead zirconate titanate)	/ チタン酸ジルコン酸鉛
RF	: radio frequency	/ 無線周波数
SAW	: surface acoustic wave	/ 弾性表面波
SMA	: shape memory alloy	/ 形状記憶合金
SMSA	: short metal strip array	/ 短絡型メタルストリップアレイ
SSC	: spread spectrum communication	/ スペクトラム拡散通信
$t_f$	: fall time	/ 立ち下がり時間
$t_{off}$	: turn off delay time	/ ターンオフ遅延時間
$t_{on}$	: turn on delay time	/ ターンオン遅延時間
$t_r$	: rise time	/ 立ち上がり時間
USB	: universal serial bus	/ ユニバーサルシリアルバス
$V_{DSS}$	: drain-source surrender voltage	/ ドレイン-ソース間電圧
VGA	: video graphics array	/ ビデオグラフィックスアレイ
VR	: virtual reality	/ 仮想現実

## 付録 A

# プログラム

付録 A では，本研究において製作したプログラムについて述べる．

### A.1 SH-2 マイコンのシリアル通信用プログラム

#### A.1.1 通常の皮膚感覚ディスプレイの制御プログラム

本プログラムは，マイコン (SH2-7045F) 上にアップロードして使用する．また，本プログラムは C 言語により記述される．ホストコンピュータのシリアルポートから出力される信号を読み取り，適切な周波数・デューティ比のパルス信号を出力する．本プログラムでホストコンピュータと通信するデータフォーマットは Fig. A.1 のようになる．ここで，皮膚感覚ディスプレイとの通信プロトコルを皮膚感覚ディスプレイ制御送信プロトコル (Tactile Display Control Transmission Protocol: TDCTP) と呼称し，当フォーマットを用いるものを TDCTP 1.0 とする．TDCTP 1.0 のデータ構成は 4 バイトである．このうち上位の 6 ビットがデータであり，下位 2 ビットによって何番目のデータかの判断を行う．1 番目のデータにはデューティ比が char 型で格納され<sup>\*1</sup>，残り 3 つに分割してパルス出力用のカウントが格納される<sup>\*2</sup>．ホストコンピュータからマイコンへデータ送信する際には，出力パルスの周波数  $f$  とマイコンのクロック  $c_m$  よりクロックカウント  $c$  を算出する．

$$c = \frac{c_m}{f}, \quad (\text{A.1})$$

<sup>\*1</sup> このため，デューティ比の取りうる範囲は 0–64% である．実用上は問題ないが，もし 65% 以上のデューティ比を必要とする場合は反転させるかもう 1 ビットを新たに確保する必要がある．

<sup>\*2</sup> カウントはクロック単位であり，マイコン上で結合された値は unsigned short int 形式 (0–65535) として扱われる．さらにマイコン内部で上限・下限が設定されており，この値はデフォルトで 120–47000 となっている．クロック周波数が 28.6MHz であるため，1 クロック当たりのカウント時間は 34.97ns である．すなわち，設定可能なパルスの周波数は最低 6.08Hz，最高 2.08kHz となる．

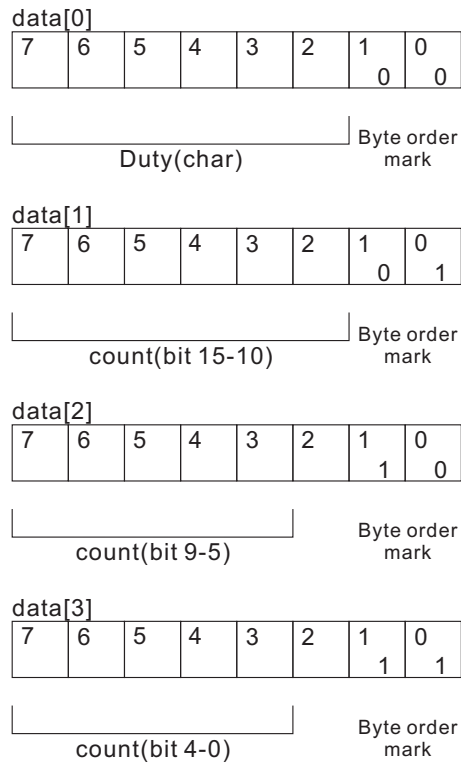


Fig. A.1 Bit stream of TDCTP 1.0

本研究で用いている SH2-7045F マイコンはクロック周波数  $f$  が 28.6MHz である．算出されたカウントがマイコン内部の待機クロックに設定され，これをベースとしてデューティ比の分だけ ON/OFF が行われ，パルス信号が生成される．

### A.1.2 制御信号に乱数を参照するプログラム

制御信号に乱数の参照を行ったプログラムについて以下に示す．基本的なプログラム構成は前述の制御プログラムと同一であり，乱数参照用のスイッチビットの追加，内部のパルス信号生成コードの変更を行った．この乱数参照可否のスイッチビットを追加したものを TDCTP 1.1 とする．TDCTP 1.1 におけるホストコンピュータとの通信データフォーマットを Fig. A.2 に示す．前述の通信プロトコル (TDCTP 1.0) において，2 番目のデータと 3 番目のデータに存在した空きビットを利用している．乱数参照に対応しないホストコンピュータから送信した場合は空きビットは常にゼロであり，また乱数参照に対応しないプログラムに対して送信した場合は当該ビットは無視されるため，互換性を維持した実装が可能である．マイコンプログラムのコード内に予め M 系列乱数 (5bit) が配列として格納されており，パルスの ON/OFF 時にこの配列を参照する．また，比較用に rand 関数による乱数取得を同時に行い，参照が可能となっている．

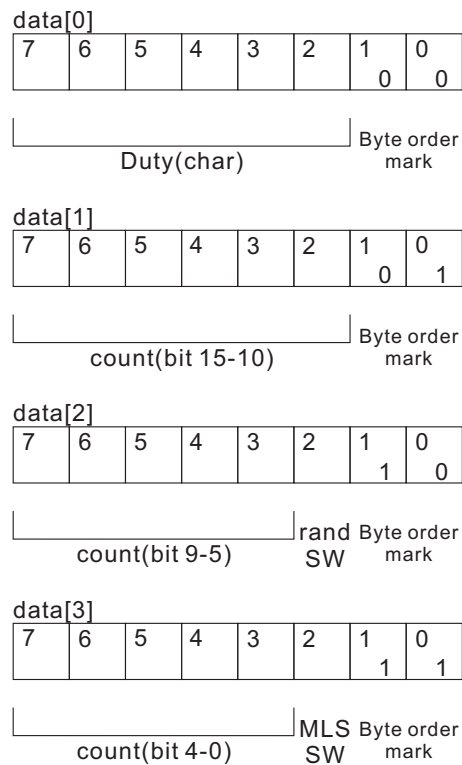


Fig. A.2 Bit stream of TDCTP 1.1 (add randomization switch)

ここで、M 系列乱数を参照した場合、最小周波数を基準とする形となるため、最長ビットと最小ビットの平均をとり、カウント  $c_{msec}$  は以下のように指定する必要がある。

$$c_{msec} = \frac{c}{\frac{1+p}{2}}, \quad (\text{A.2})$$

ここで、 $p$  は M 系列乱数におけるビット数である。内部において上式を適用することで、ホストコンピュータより送信されたカウントをそのまま使用することができる。

### A.1.3 今後のプロトコル改良にあたって

本プロトコルを用いることで皮膚感覚ディスプレイの制御を比較的容易に行うことができる。本プロトコルにおいて現在確認されている問題点を以下に示す。

- ・ デューティ比の設定が 0–64% である
- ・ 出力パルスの周波数が 6.08Hz–2.08kHz である (クロック 28.6MHz の場合)
- ・ 送信可能な情報が少なく、拡張性に乏しい

現在高周波領域における皮膚感覚提示について検証が行われており [135]、より幅広い周波数の出力が必要である。これについてはマイコンのクロック自体をより高速なものに変更するこ

とでも実現可能であるが、システムをそのまま使用する場合デューティ比を 10% 毎の変更に  
する等でより高速に動作させることができる。また、送信可能な情報についてであるが、1 度  
に送信するデータが 4 バイトであるためこれ以上の情報送信にはビット数の増加・送信バイト  
の増加は避けられないと思われる。1 度に送信可能なバイト数を増やすことで、M 系列乱数の  
ビット数設定や AM 変調の ON/OFF 等が可能となる。また、大面積振動子を駆動する上で  
振動子の選択情報等を送信する必要が生じると考えられる。

## A.2 皮膚感覚提示デモ用ソフトウェア

皮膚感覚ディスプレイのデモンストレーションに用いる Windows 用ソフトウェアについて  
説明する。また、iPod 用に製作したソフトウェアについても本項にて説明する。

### A.2.1 パネルを 3 つ表示し、異なる粗さを提示するソフトウェア

#### A.2.1.1 概要

Windows 用のソフトウェアにおいて、シリアル通信によりマイコンに情報を送信する。ソ  
フトウェアのウィンドウ内にはパネルを表示し、パネル上をカーソルが移動したときに皮膚  
感覚提示用パラメータをマイコンに送信する。ソフトウェアの動作画面を Fig. A.3 に示す。  
ウィンドウ内でのカーソル移動を監視し、一定周期ごとにカーソル位置を記録、差分から単位  
時間当たりのカーソル速度 (pixel/s) を算出する。ここで、ペンタブレットを使用したカーソ  
ル移動の場合、ペンの位置とカーソルの位置とは一対一対応する。予め指定した画面の画素  
ピッチ (mm/pixel) より実画面上のペンの位置およびペンの速度を算出し、皮膚感覚提示に用  
いるパラメータとする。加えて予め決定しておいた粗さ情報をマイコンへ送信する。

ソフトウェアの動作フローを Fig. A.4 に示す。

#### A.2.1.2 開発環境

Windows OS を使用し、Visual Studio 2005 にて主に .NET Framework 2.0 及び Windows  
API を利用して開発を行った。言語は C++/CLI を使用した。このプログラムのコンパイル  
に必要なライブラリについて以下に示す。

user32.lib

MessageBox 関数等の呼び出しに使用<sup>\*3</sup>。

winmm.lib

マルチメディアタイマの呼び出しに使用。

---

<sup>\*3</sup> Visual Studio 2005 の Express Edition では手動で参照させる必要がある。

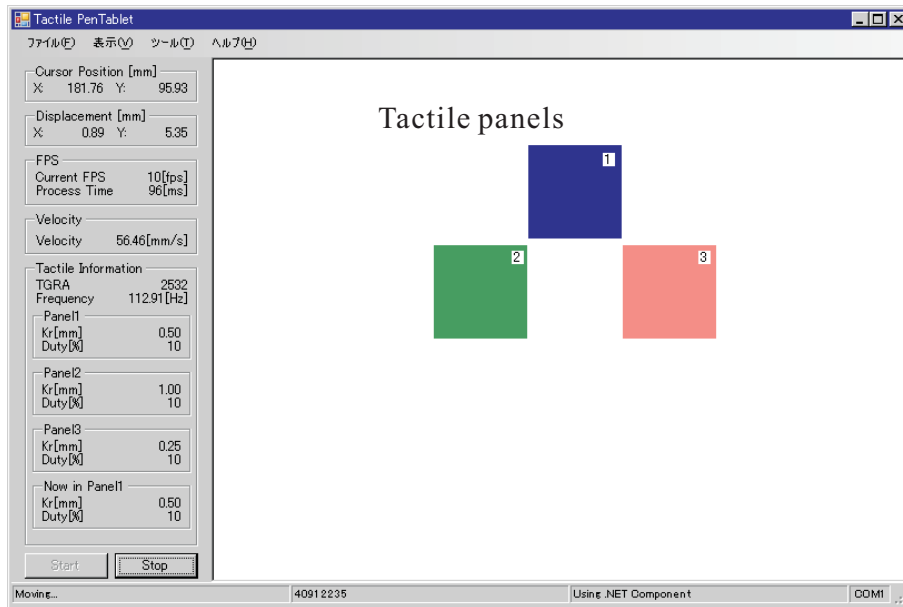


Fig. A.3 Demonstration software for tactile display

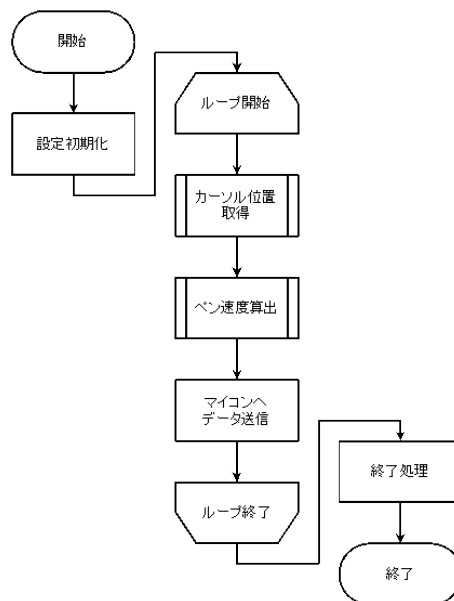


Fig. A.4 Flowchart of demonstration software

このプログラムのコンパイルに必要なヘッダ<sup>\*4</sup>について以下に示す。

windows.h

<sup>\*4</sup> なお、C++ 言語の仕様において、C++ 言語の標準ヘッダは “.h” を取り、更に C 言語の標準ヘッダは頭に c を付加するが、通常コンパイラの互換性が確保されているためコンパイルは可能である。

Windows API(32 ビット用 Win32 API) 呼び出しに使用 .

tchar.h

TCHAR 型<sup>\*5</sup>を使用するのに必要 .

mmsystem.h

マルチメディアタイマの呼び出しに使用 .

valarray

数値計算用配列である valarray 変数を使用するのに必要 .

cmath

sqrt 関数や pow 関数等の数学関数の呼び出しに使用 .

iostream

C++ 言語の標準入出力ストリームを使用するのに必要 .

fstream

C++ 言語のファイルストリームを使用するのに必要 .

CommmPort.h

シリアルポートの通信用ライブラリ<sup>\*6</sup> .

また , ソースコード中で使用している関数及びクラスについての説明 [136] を以下に示す .

timeGetDevCaps 関数

タイマデバイスの分解能を取得する .

```
MMRESULT timeGetDevCaps(  
LPTIMECAPS ptc,  
UINT cbtc  
);
```

第 1 引数 ptc に指定されたアドレスの TIMECAPS 構造体に対し , タイマデバイスの分解能情報を格納する . 第 2 引数 cbtc には TIMECAPS 構造体のサイズ ( バイト単位 ) を指定する . 通常 , sizeof(TIMECAPS) を指定する . 使用するには “mmsystem.h” 及び “winmm.lib” が必要である .

timeBeginPeriod 関数

アプリケーション及びデバイスドライバの最小タイマ分解能を設定する .

```
MMRESULT timeBeginPeriod(  

```

---

<sup>\*5</sup> C 言語では char 型を使用するが , char 型では文字コードは ASCII である . (ただし , C# 言語では char 型は後述の Unicode である .) これに対し , 現在主流となっている NT 系の Windows 環境では Unicode を使用している . C/C++ 言語において Unicode を使用する場合 wchar\_t 型が用いられ , Visual C++ 言語では WCHAR 型を使用する . TCHAR 型はコンパイル時に Unicode を使用する設定にすると Unicode で , Unicode を使用しない設定にすると ASCII でコンパイルすることのできるデータ型である .

<sup>\*6</sup> 後に .NET Framework の SerialPort コンポーネントを使用 .

```
UINT uPeriod
);
```

引数 `uPeriod` には最小タイマ分解能をミリ秒単位で指定する。 `timeGetDevCaps` 関数との組み合わせでタイマ性能を最大限にすることができる。また、タイマの使用を終える際には後述する `timeEndPeriod` 関数を呼び出す必要がある。使用するには “`mmsystem.h`” 及び “`winmm.lib`” が必要である。

#### System::IO::Ports::SerialPort::GetPortNames メソッド

シリアルポート名の配列 (String 型<sup>\*7</sup>) を取得する。このメソッドを使用することで、有効なシリアルポートのリストを取得することができる。使用するには .NET Framework 2.0 以降が必要である。

```
public:
static array<String^>^ GetPortNames ()
```

#### MessageBox 関数

メッセージボックスを表示する。

```
int MessageBox(
HWND hWnd,
LPCTSTR lpText,
LPCTSTR lpCaption,
UINT uType
);
```

第 1 引数にはオーナーとなるウィンドウのハンドルを指定する。“NULL” を指定するとオーナーウィンドウを持たないメッセージボックスが表示される。第 2 引数には表示するメッセージを指定<sup>\*8</sup>する。第 3 引数にはメッセージボックスのタイトルを指定する。第 4 引数にはメッセージボックスのスタイルを指定する。スタイルにはフラググループの指定が可能である。代表的なフラググループについて以下に示す。

MB\_OK

メッセージボックスに “OK” ボタンを表示する。

MB\_OKCANCEL

<sup>\*7</sup> C++/CLI では、メモリの管理にガベージコレクション (garbage collection: GC) を用いる。従来の C 言語ではポインタ参照には “\* (アスタリスク)” を用いたが、C++/CLI のオブジェクトは GC によりメモリアドレスが変わるためポインタを使用することができない。C++/CLI ではポインタ “\*” に替わりトラッキングハンドル “^ (ハット)” を使用する。また、C++/CLI においてインスタンスの作成には “gcnew” を用いる。

<sup>\*8</sup> 文字列には Unicode 文字を指定する必要がある。直に入力する場合、ダブルクォーテーションで囲んだ文字列の手前に “L (L マクロ)” を入力することで Unicode として展開される。また、“\_T (\_T マクロ)” 等もある。



メッセージボックスに “OK” ボタンと “Cancel” ボタンを表示する .

MB\_YESNO

メッセージボックスに “はい” ボタンと “いいえ” ボタンを表示する .

また、戻り値にはメッセージボックスがどのように閉じられたかが返される . 使用するには “windows.h” ヘッダと “user32.lib” ライブラリが必要である . また、.NET Framework 環境では “System::Windows::MessageBox::Show” メソッドを使用することで同様の機能の実装が可能である .

Console::WriteLine メソッド

標準出力に指定したデータを書き込み、行終端記号を書き込む . 指定するデータ型に対していくつかのオーバーロードがある . ここでは例として Object 型を指定する際のメソッドを示す .

```
public:
static void WriteLine (
Object^ value
)
```

引数に書き込むデータを指定する . このメソッドを “System::IO::IOException クラス\*9” とともに用いることで、例外がスローされたときに当該情報を標準出力へ表示させることができる .

Control::PointToScreen メソッド

クライアントのポイント座標からスクリーン座標を算出する .

```
public:
Point PointToScreen (
Point p
)
```

引数にポイント座標を指定することで、スクリーン上におけるポイント座標を返す . 使用するには .NET Framework 2.0 が必要である .

GetCursorPos 関数

マウスカーソルの現在位置を取得する .

```
BOOL GetCursorPos(
LPPPOINT lpPoint
);
```

引数に指定したポインタのポイント構造体に対し、カーソル位置のスクリーン座標を返す . 使用するには “windows.h” ヘッダと “user32.lib” ライブラリが必要である .

---

\*9 ストリーム、ファイル、及びディレクトリを使用して情報にアクセスするときにスローされる例外の基本クラス .

**timeGetTime 関数**

システム時刻\*10をミリ秒単位で取得する。

```
DWORD timeGetTime(VOID);
```

使用するには“mmsystem.h”及び“winmm.lib”が必要である。

**timeEndPeriod 関数**

以前にセットされた最小タイマ分解能をクリアする。

```
MMRESULT timeEndPeriod(  
    UINT uPeriod  
);
```

使用するには“mmsystem.h”及び“winmm.lib”が必要である。

**GetLocalTime 関数**

現在のローカル日時を取得する。

```
VOID GetLocalTime(  
    LPSYSTEMTIME lpSystemTime  
);
```

引数に指定した SYSTEMTIME 構造体に対し、ローカル日時を格納する。使用するには“windows.h”ヘッダと“kernel32.lib”ライブラリが必要である。

**Form::ShowDialog メソッド**

現在のアクティブウィンドウをオーナーフォームとするモーダルダイアログボックスとしてフォームを表示する。

```
public:  
    DialogResult ShowDialog ()
```

モーダルウィンドウとしてフォームを表示すると、以降に続くコードをフォームを閉じるまで中断する。表示したフォームを閉じた場合、状況に応じたプロパティが DialogResult プロパティに設定される。使用するには .NET Framework 2.0 が必要である。

**Environment::GetFolderPath メソッド**

システムフォルダへのパスを取得する。

```
public:  
    static String^ GetFolderPath (  
        SpecialFolder folder  
    )
```

---

\*10 Windows が起動してから経過した時間

SpecialFolder 列挙定数には Environment::SpecialFolder のメンバを指定する。メンバの例を以下に示す。

System

System ディレクトリが格納される。

MyDocuments

MyDocuments ディレクトリが格納される。

ProgramFiles

ProgramFiles ディレクトリが格納される。

使用するには .NET Framework 2.0 が必要である。

Process::Start メソッド

プロセスリソースを起動する。いくつかのオーバーロードがある。ここでは例として String 型を指定する際のメソッドを示す。

```
public:
static Process^ Start (
String^ fileName
)
```

引数に指定したファイルの名前を指定してプロセスリソースを起動する。プロセスが既に起動されている場合は再利用される。また、任意のファイル (.txt 等) を指定した場合、関連付けられたアプリケーションが起動される。使用するには .NET Framework 2.0 が必要である。

TextWriter::WriteLine メソッド

ファイルへ指定したデータを書き込み、行終端記号を書き込む。指定するデータ型に対していくつかのオーバーロードがある。ここでは例として String 型を指定する際のメソッドを示す。

```
public:
virtual void WriteLine (
String^ value
)
```

引数に書き込むデータを指定する。予め StreamWriter クラスのインスタンスを作成し、その時指定したファイルに対して書き込みを行う。書き込みが終了したら StreamWriter::Close メソッドにより作成したストリームを閉じる必要がある。使用するには .NET Framework 2.0 が必要である。

### A.2.1.3 動作環境

#### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降 (NT 系 OS, 要管理者権限)

2000, XP, Vista, 7 において動作確認済み

#### 必須フォント

MS UI Gothic (日本語フォント以外は非対応)

#### 必須ランタイム

Microsoft .NET Framework 2.0

### A.2.1.4 インストール・アンインストール方法

セットアッププログラム (setup.exe) を実行し, ウィザードに従ってインストールする. Microsoft .NET Framework 2.0 がインストールされていない場合, 同時にインストールされる. (Ver. 1.0.0 以前のバージョンを使用する場合, 上書きインストールには未対応のため, 予め手動でアンインストールする必要がある.)

アンインストールは「コントロールパネル」の「プログラムの追加と削除」より「Tactile PenTablet」を選択, アンインストールする.

### A.2.1.5 使用方法

- [1] 予めマイコンへ.bin ファイルをアップロードする. (シリアルポートはアップロード後閉じておく)
- [2] 本ソフトウェアを起動すると, Fig. A.3 のようなウィンドウが起動する.
- [3] 画素ピッチを使用している液晶ディスプレイの値に変更する.
- [4] シリアルポートが使用可能かテストする. 使用不可なら他にポートを使用しているソフトウェアを終了してから再テストする, もしくは出力する必要がなければデバッグモードを有効にする.
- [5] シリアルポートを有効化し, カーソル位置検出を開始する.

## A.2.2 パネルを任意の数だけ表示し, 異なる粗さを提示するソフトウェア

### A.2.2.1 概要

具体的な動作概要は前項のソフトウェアと同様である. 前項のソフトウェアでは使用する振動子が固定であったため, パネル表示数及びパネル位置が固定されていた. しかしながら, 振動子を移動可能としたため, また将来的に大型化を考慮するため, ソフトウェアの改良を行っ

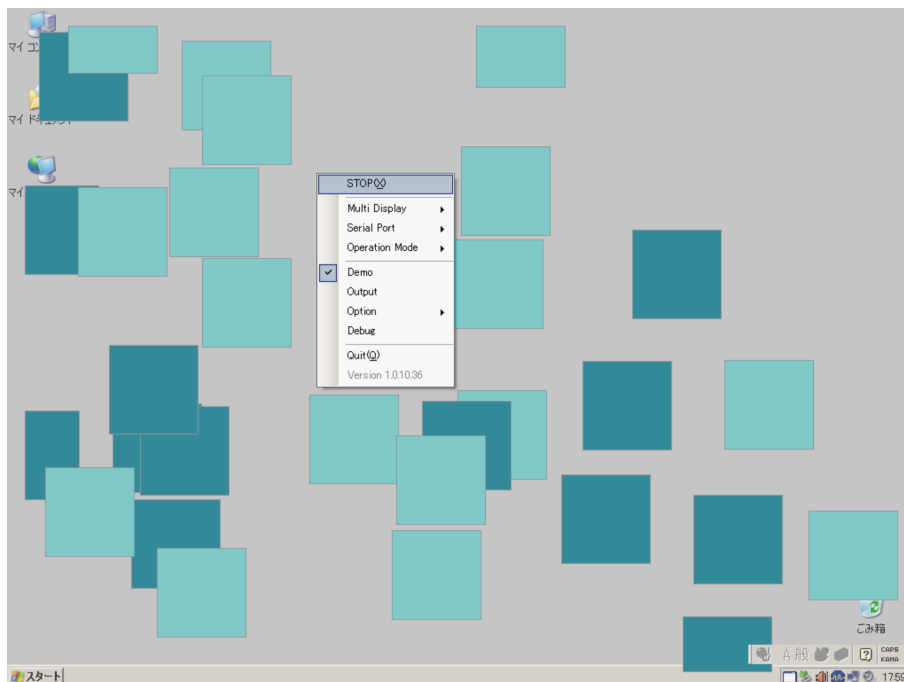


Fig. A.5 Tactile demonstration software covering whole LCD

た．ソフトウェアにはウィンドウはなく，デスクトップ画面上に多数のパネルを表示する．パネルの位置はランダムとし，また形状の指定も可能である．ソフトウェアが動作している様子を Fig. A.5 に示す．パネル上をカーソルが移動したときに皮膚感覚提示用パラメータをマイコンに送信する．デスクトップ上でのカーソル移動を監視し，一定周期ごとにカーソル位置を記録，差分から単位時間当たりのカーソル速度 (pixel/s) を算出する．予め指定した画面の画素ピッチ (mm/pixel) より実画面上のペンの位置およびペンの速度を算出し，皮膚感覚提示に用いるパラメータとする．加えて予め決定しておいた粗さ情報をマイコンへ送信する．

#### A.2.2.2 開発環境

Windows OS を使用し，Visual Studio 2010 を用いて.NET Framework 4.0 及び Windows API を利用して開発を行った．ソースコードについては可読性についても考慮し，極力.NET ベースに統一して記述を行った．言語は C++/CLI を使用した．このプログラムのコンパイルに必要なライブラリについて以下に示す．

windows.h

Windows API(32 ビット用 Win32 API) 呼び出しに使用．

commctrl.h

ツールバー等のCOMMONCONTROL呼び出しに使用．

cmath

sqrt 関数や pow 関数等の数学関数の呼び出しに使用 .

次項にて、本ソフトウェアで使った関数及びクラスについての説明 [136] を示す .

### A.2.2.3 XML を用いた設定保存

従来からの改良点として XML ( Extensible Markup Language: 拡張可能なマーク付け言語 ) ファイルを用いた設定の保存<sup>\*11</sup>を行っている . 設定手順及び読み込み/書き込み手順を以下に示す .

#### 定義ファイル

XML クラスを定義したヘッダファイルを別に用意するのが簡単である . ヘッダファイル ( 要素定義のみ抜粋 ) を以下に示す . System::Xml::Serialization 名前空間を使用する .

```
[System::Xml::Serialization::XmlRoot("App Configuration")]
public ref class ApplicationConfig
{
public:
[System::Xml::Serialization::XmlElement("foo")]
int foo;
};
```

ここで、設定する項目の要素数だけ XmlElement のメンバを増やすことができる .<sup>\*12</sup> ファイルの読み書きには System::IO 名前空間を使用する .

```
public ref class Config
{
public:
ApplicationConfig^ Load(String^ FileName){
XmlSerializer^ serializer = gcnew XmlSerializer(ApplicationConfig::typeid);
FileStream^ fs = gcnew FileStream(FileName, FileMode::Open);
ApplicationConfig^ ConfigData = (ApplicationConfig^)serializer->Deserialize(fs);
fs->Close();
return ConfigData;
}
```

<sup>\*11</sup> これまでは簡単な設定の保存方法として .ini ファイルを用いることが多かったが、これは単純なテキストファイルであった . より高度な方法としてレジストリを用いる方法もあるが、レジストリファイルは Windows のシステムに単一のファイルとして存在する . ユーザプログラム毎にレジストリ項目を生成するとシステムの肥大化に繋がるため、なるべく避けるべきである . これに対し、XML ファイルはレジストリ同様に様々な情報を格納でき、プログラム単一の設定ファイルとすることができる . このため、近年 XML ファイルを用いて設定を格納するのがトレンドとなっている .

<sup>\*12</sup> 上記においては変数 foo は int 型としているが、char 型の変数 bar であっても String^ 型の変数 foobar であってもよい .

```
}  
void Save(String^ FileName, ApplicationConfig^ ConfigData){  
    XmlSerializer^ serializer = gcnew XmlSerializer(ApplicationConfig::typeid);  
    FileStream^ fs = gcnew FileStream(FileName, FileMode::Create);  
    serializer->Serialize(fs, ConfigData);  
    fs->Close();  
}  
};
```

上記において、Load メソッドによりファイルの読み込みを、Save メソッドによりファイルの書き込みを行う。それぞれ、変数 FileName には XML ファイルのパスが格納される。Load メソッドにおいて、まず XmlSerializer オブジェクトを生成する。続いて、FileStream により XML ファイルをオープンする。XML ファイルよりデータを読み込み、Deserialize により逆シリアル化しデータを格納する。最後にファイルをクローズする。Save メソッドについても同様の流れで、データを Serialize によりシリアル化して XML ファイルとして保存する。

#### 呼び出し

本体のソースファイル中にて呼び出す際のコードの一例を以下に示す。

```
setting = gcnew ApplicationConfig();  
ConfigFile = Path::Combine(AppPath, L"config.xml");  
config = gcnew Config();  
setting = config->Load(ConfigFile);  
setting->foo = baz;  
config->Save(ConfigFile, setting);
```

設定の呼び出し及び保存は上記のように行うことができる。変数 AppPath には予めアプリケーションファイルのパスが格納されており、XML 設定ファイル “config.xml” は実行ファイルと同じフォルダ内に生成される。

#### A.2.2.4 GDI を用いたパネル描画

パネルの描画には Windows の GDI (Graphics Device Interface) を使用している。GDI は Windows のコンポーネントの一つであり、直線や曲線の描画・フォントレンダリング等が可能である<sup>\*13</sup>。本ソフトウェアでは .NET Framework の System::Drawing 名前空間にて用意される GDI+ のライブラリを使用している。GDI の使用手順 (抜粋) を以下に示す。

<sup>\*13</sup> GDI ではアニメーションやフレームバッファ等の対応が困難であり、また Windows Vista 以降ではハードウェアアクセラレーションがないため処理に時間がかかることがある。このため、高速動作や詳細なグラフィック処理を要するプログラムでは DirectX や OpenGL が用いられることが多い。

### 初期設定 (ダブルバッファ)

初期設定時に使用したコードを以下に示す。

```
hDC = GetDC(NULL);
hCDC = CreateCompatibleDC(hDC);
hCBitmap = CreateCompatibleBitmap(hDC, ResolutionX, ResolutionY);
hOldCBitmap = (HBITMAP)SelectObject(hCDC, hCBitmap);
```

まず GetDC 関数を用いて、デバイスコンテキストを取得する。ここで、デバイスコンテキストとは描画対象を抽象化した存在であり、何に対して描画処理を行うか指定する際にはこのデバイスコンテキストを用いて指示を行う。上記コードのように GetDC 関数の引数に NULL を指定すると、画面全体のデバイスコンテキストが取得される。本ソフトウェアでは画面全体を使用し、画面上にパネルを描画するためこのような指定を行っている。次に CreateCompatibleDC 関数を用いているが、これは引数に受け渡したデバイスコンテキストと互換性のあるメモリデバイスコンテキストを生成する関数である。メモリデバイスコンテキストとはメモリ内のみ存在するデバイスコンテキストであり、本ソフトウェアではダブルバッファ処理<sup>\*14</sup>を行うために使用している。ダブルバッファを使用せずにデバイスコンテキストを取得する場合、GetDC 関数のみで処理が可能である。メモリデバイスコンテキストは大きさが  $1 \text{ times } 1 \text{ pixel}$  であるため、次の行にて CreateCompatibleBitmap 関数を用いて予め取得した画面全体の大きさからビットマップを生成し、ハンドルを取得する。最後に生成したビットマップをメモリデバイスコンテキストに設定する。以降は描画をメモリデバイスコンテキストに対して行い、これを画面のデバイスコンテキストへ表示することでダブルバッファが可能となる。

### Graphics::FromHdc メソッド

各種オブジェクトを描画するためには Graphics を生成する必要がある。Graphics の生成には Graphics::FromHdc メソッドを使用した。構文を以下に示す。

```
public:
static Graphics^ FromHdc (
    IntPtr hdc
)
```

引数 hdc には上述したダブルバッファ用のメモリデバイスコンテキストを指定する。

### Pen コンストラクタ

直線及び曲線の描画には、Pen が必要である。

---

<sup>\*14</sup> 描画処理と表示とを同時に行うと、描画中の画面が表示されてしまい「ちらつき」が発生する。これを解決するために行う処理が「ダブルバッファ」である。表示画面の裏側に描画画面を用意しておき、裏側で描画処理を行う。描画が全て完了してから表に表示することで「ちらつき」を抑えた画面更新が可能である。



```
public:
Pen(
Color color,
float width
)
```

color にはカラー構造体 (ARGB: アルファ, 赤, 緑, 青) を指定する。width にはペンの幅を指定する。

#### SolidBrush コンストラクタ

オブジェクトの描画 (塗り潰し) には, SolidBrush が必要である。

```
public:
SolidBrush (
Color color
)
```

color にはカラー構造体 (ARGB: アルファ, 赤, 緑, 青) を指定する。

#### Font コンストラクタ

文字の描画には, Font が必要である。

```
public:
Font (
String^ familyName,
float emSize
)
```

familyName には FontFamily の文字列を指定する。emSize にはフォントの em サイズ (ポイント数) を指定する。

#### Color::FromArgb メソッドによる Color 構造体の作成

4 つの ARGB コンポーネント (アルファ, 赤, 緑, 青) 値から Color 構造体を作成する。

```
public:
static Color FromArgb (
int alpha,
int red,
int green,
int blue
)
```

それぞれの引数には 32 ビット値のコンポーネントを渡すことができる<sup>\*15</sup>。

#### DrawPolygon メソッド及び FillPolygon メソッドによる多角形描画

多角形オブジェクトの描画には DrawPolygon メソッド及び FillPolygon メソッドを使

---

<sup>\*15</sup> ただし, 各コンポーネントの値は 8 ビットに制限される。

用した . DrawPolygon メソッド及び FillPolygon メソッドの構文を以下に示す .

```
public:
void DrawPolygon (
Pen^ pen,
array<Point>^ points
)
```

```
public:
void FillPolygon (
Brush^ brush,
array<Point>^ points
)
```

DrawPolygon メソッドでは , ポリゴンのワイヤースケッチの描画を行う . Point を要素として持つ Array クラスの配列によって描画するワイヤースケッチの頂点座標を指定する . また , Pen によってワイヤースケッチの色 , 幅 , スタイルを指定する . FillPolygon メソッドでは , 同様にポリゴンの塗り潰し描画を行う . Pen ではなく Brush によって塗り潰す色やテクスチャを指定する<sup>\*16</sup> . 本ソフトウェアでは , はじめに FillPolygon メソッドにより塗り潰し描画を行い , 重なり合ったときに境界線をわかりやすくするため DrawPolygon メソッドによりワイヤースケッチの描画を行った . また , オブジェクトの位置及び頂点座標の指定について以下に示す .

- [1] オブジェクトの “表示数” , “大きさ” を指定する .
- [2] オブジェクトの中心位置 ( 重心位置 ) を “表示数” 分ランダムに生成する .
- [3] 中心位置から “大きさ” 分の半径の円に内接する正多角形オブジェクトを生成する .

DrawEllipse メソッド及び FillEllipse メソッドによる円描画

円の表示には DrawEllipse メソッド及び FillEllipse メソッドを用いた . DrawEllipse メソッド及び FillEllipse メソッドの構文の一例を以下に示す .

```
public:
void DrawEllipse (
Pen^ pen,
int x,
int y,
int width,
int height
)
```

---

<sup>\*16</sup> Brush として SolidBrush を用いることで単一色の塗り潰しを , TextureBrush を用いることでイメージを使用した塗り潰しを行うことができる .

```
public:
void FillEllipse (
Brush^ brush,
int x,
int y,
int width,
int height
)
```

DrawEllipse メソッドでは、円のワイヤーフレーム描画を行う。X, Y 座標及び幅, 高さからなる四角形に内接する円を描画する<sup>\*17</sup>。位置指定の X, Y 座標は外接四角形の左上座標となる。Pen によってワイヤーフレームの色, 幅, スタイルを指定する。FillEllipse メソッドでは、同様に円の塗り潰し描画を行う。Brush によって塗り潰す色やテクスチャを指定する。本ソフトウェアでは、前述の多角形描画と同様にはじめに FillEllipse メソッドにより塗り潰し描画を行い、重なり合ったときに境界線をわかりやすくするため DrawEllipse メソッドによりワイヤーフレームの描画を行った。

DrawRectangle メソッド及び FillRectangle メソッドによる四角形描画

四角形のみ表示については、DrawPolygon メソッド及び FillPolygon メソッドではなく、DrawRectangle メソッド及び FillRectangle メソッドを用いた。DrawRectangle メソッド及び FillRectangle メソッドの構文の一例を以下に示す。

```
public:
void DrawRectangle (
Pen^ pen,
int x,
int y,
int width,
int height
)
```

```
public:
void FillRectangle (
Brush^ brush,
int x,
int y,
int width,
int height
)
```

---

<sup>\*17</sup> 本ソフトウェアでは正円のみを使用しているが、メソッドの定義からわかるように描画可能な円には楕円も含まれる。

構文は前述の DrawEllipse メソッド及び FillEllipse メソッドと同じである。DrawRectangle メソッドでは、四角形のワイヤースタイル描画を行う。X, Y 座標及び幅, 高さからなる四角形を描画する。位置指定の X, Y 座標は外接四角形の左上座標となる。Pen によってワイヤースタイルの色, 幅, スタイルを指定する。FillRectangle メソッドでは、同様に四角形の塗り潰し描画を行う。Brush によって塗り潰す色やテクスチャを指定する。本ソフトウェアでは、前述の多角形描画及び円描画と同様にはじめに FillRectangle メソッドにより塗り潰し描画を行い、重なり合ったときに境界線をわかりやすくするため DrawRectangle メソッドによりワイヤースタイルの描画を行った。

#### DrawString メソッドによる文字列描画

文字列の描画には DrawString メソッドを用いた。DrawString メソッドの構文を以下に示す。

```
public:
void DrawString (
String^ s,
Font^ font,
Brush^ brush,
float x,
float y
)
```

s に描画する文字列を指定し、font には文字列のフォントを、brush には色とテクスチャを指定した Brush を指定する。X 及び Y は描画位置の左上座標を指定する。本ソフトウェアでは後述する弁別モードのみに使用している。

#### TransparentBlt 関数によるビットブロック転送

ダブルバッファを行うため、メモリデバイスコンテキストに対し描画したデータを画面に表示させる。本ソフトウェアではビットブロック転送を行う関数である TransparentBlt 関数を使用している。ビットブロック転送を行う標準的な関数に BitBlt 関数があるが、本プログラムでは描画時に背景色を設定し、最終的に背景色を透過させることでオブジェクトのみを表示する構成としている。TransparentBlt 関数を以下に示す。

```
BOOL TransparentBlt(
HDC hdcDest,
int nXOriginDest,
int nYOriginDest,
int nWidthDest,
int nHeightDest,
HDC hdcSrc,
int nXOriginSrc,
```

```
int nYOriginSrc,  
int nWidthSrc,  
int nHeightSrc,  
UINT crTransparent  
);
```

第 1 引数には送信先のデバイスコンテキストのハンドルを指定する。本ソフトウェアでは画面のデバイスコンテキストとなる。第 2~5 引数には送信先の座標情報を指定する。第 6 引数には送信元のデバイスコンテキストを指定する。本ソフトウェアでは各種オブジェクトの描画を行ったメモリデバイスコンテキストを指定する。第 7~10 引数には送信元の座標情報を指定する。第 11 引数には透過処理する RGB カラーを指定する。本ソフトウェアでは描画範囲を画面全体としているが、送信元ビットマップと送信先ビットマップの大きさが異なる場合には送信先の矩形サイズに合わせた拡大・縮小が行われる。また、TransparentBlt 関数及び標準の BitBlt 関数では基本的に原点移動のみを指定可能であるが、StretchBlt 関数を用いることでビットマップの拡大・縮小も可能である。

#### 終了設定

終了時に呼び出すコードを以下に示す。

```
delete g;  
delete pen;  
delete brush;  
delete font;  
  
SelectObject(hCDC, hOldCBitmap);  
DeleteObject(hCBitmap);  
DeleteObject(hOldCBitmap);  
DeleteDC(hCDC);  
ReleaseDC(hDeskWnd, hDC);
```

まず、使用したオブジェクトの破棄を行う。Graphics の破棄には delete を用いる。また、Pen、SolidBrush、Font が生成されている場合、それぞれ delete によって破棄する。破棄には DeleteObject 関数を使用し、引数にはオブジェクトのハンドルを指定する。次に、生成したメモリデバイスコンテキストを DeleteDC 関数により破棄する。最後に取得した画面のデバイスコンテキストを開放し、メモリを開放する。

#### A.2.2.5 包含判定アルゴリズム

本研究で使用した包含判定アルゴリズムについて説明する。表示した多角形オブジェクト（円を含む）に対し、カーソルとの包含判定を行うことでオブジェクト上（オブジェクト内部）

にカーソルが存在するかどうかを判定することができる。カーソルはディスプレイ上の1点を表すため、包含判定を行う上では点として考えることができる。この点とオブジェクトとの包含判定について、本ソフトウェアでは以下のようなアルゴリズム [137] を用いた。

#### 点と円との包含判定

Fig. A.6 に示すような点 A と中心座標 O の円があるときを考える。点 A と円の中心 O との距離  $d$  と円の半径  $r$  との差分から内包しているかどうかの判定が可能である。点及び円の中心の各々の X 座標及び Y 座標の差分からピタゴラスの定理を用いて距離が算出可能である。しかしながら、距離を求めるためには二乗した後に平方根を求めるが、毎回行う処理としては計算が非常に困難となってしまう。そこで、点と円の中心との距離を二乗したものを処理に用いる。これと円の半径を二乗したものを比較する。距離の二乗が半径の二乗よりも大きい場合、カーソルは円の外側にあり、等しい場合は境界に、小さい場合は内側にあると判定できる。

#### 線分と線分との交差判定

点と多角形との包含判定を行う上で、基本となるものが線分と線分との交差判定である。Fig. A.7 に示すような線分 AB と線分 CD を考える。線分同士の交差判定は、外積を用いることで判定することができる。それぞれの両端座標をポイント構造体として  $a, b, c, d$  としたとき、判定アルゴリズムを関数化したものは以下ようになる。

```
double DetermineIntersect(Point a, Point b, Point c, Point d){
double x;
x = ((a.X - b.X) * (c.Y - a.Y) + (a.Y - b.Y) * (a.X - c.X))
  * ((a.X - b.X) * (d.Y - a.Y) + (a.Y - b.Y) * (a.X - d.X));
return x;
}
```

このアルゴリズムでは、交差していれば戻り値は負になり、接触していれば戻り値は 0、交差していなければ正となる。

#### 点と三角形との包含判定

三角形の包含判定をする上で、まず Fig. A.8 に示すような三角形 ABC と点 P を考え、三角形 ABC の重心を O とする。前述の交差判定を使用し、点 P と三角形の重心位置 O とを結んだ線分 PO と、三角形の 3 辺との交差判定を行う。全てが交差しない場合は点 P は三角形の内側にあり、交差する場合は点 P は三角形の外側にある。しかしながら、この方法では三角形の重心位置 O を求める必要があるため、通常は以下の三角形の頂点座標を用いた方法を用いる。

三角形の 1 辺と、残りの 1 頂点及び点 P とを結んだ線分とで交差判定を行う。Fig. A.9 に示すように線分 AB と PC の交差判定を行い、残りの 2 線分についても同様に行う。3 つの組み合わせそれぞれにおいて、全てが交差しない場合は点 P は三角形の内側にあ

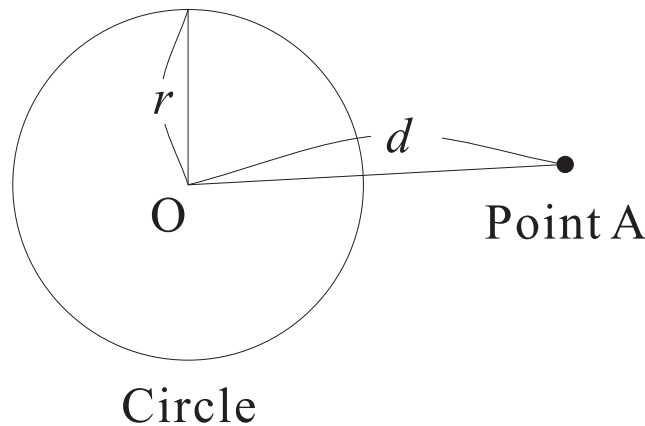


Fig. A.6 Algorithm to determine if a circle contains a point

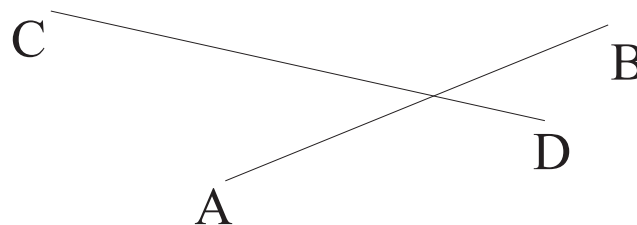


Fig. A.7 Algorithm to determine if a line intersect with second line

り、交差する場合は点は三角形の外側にある。

#### 点と多角形との包含判定

多角形 ABCDEFGH と点 P との包含判定を行う上で、Fig. A.10 に示すように多角形を三角形の集合体として扱う。すなわち、多角形 ABCDEFGH を頂点 A を基準として三角形 ABC、三角形 ACD、三角形 ADE、三角形 AEF、三角形 AFG、三角形 AGH に分割し、それぞれの三角形に対する点の包含判定を行う<sup>\*18</sup>。これにより、上述の点と三角形との包含判定を繰り返すことで点と多角形との包含判定を行うことができる。本ソフトウェアでは表示する画像を円に内接する正多角形に限定しているため、頂点 1 点を基準として各頂点に対角線を引き多角形を三角形に分割している。このアルゴリズムの場合、星型多角形のような内角が  $180^\circ$  を超えた角を持つ多角形には適用することができない。このような場合、別の分割アルゴリズムを使用する必要がある。

\*18 もちろん、どの頂点を基準としても問題ない。

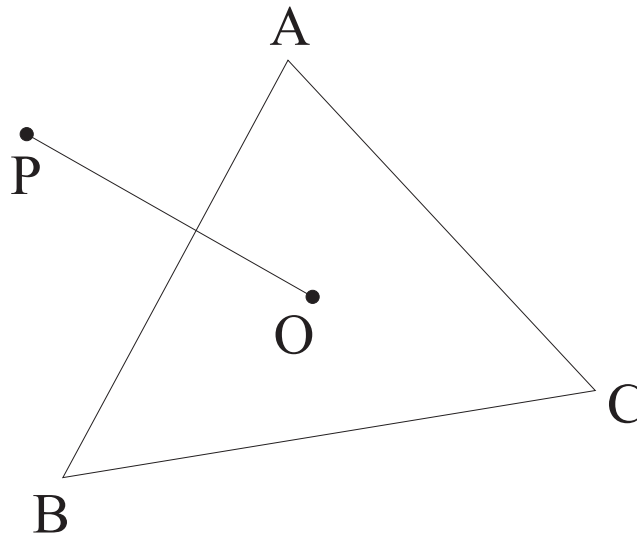


Fig. A.8 Algorithm to determine if a triangle contains a point

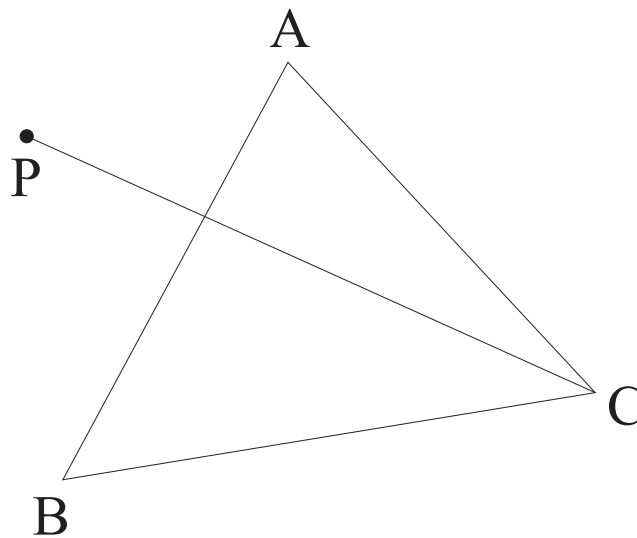


Fig. A.9 Modified algorithm to determine if a triangle contains a point

#### A.2.2.6 ルックアップテーブルの導入による効率的な処理

本ソフトウェアにおいて、カーソルの位置に応じて感覚の提示を行うため、カーソルがオブジェクト上に存在しているかどうかを判定する必要がある。この判定には前項の包含判定のアルゴリズムを用いているが、ソフトウェアの動作中、カーソルが移動する度に毎秒数フレームでこの判定処理を行うのは効率的ではない。そこで、本ソフトウェアではルックアップテーブルを用いて効率的な処理を行っている。

ルックアップテーブル (lookup table: LUT) とはメモ化ともいい、予め複雑な計算処理の



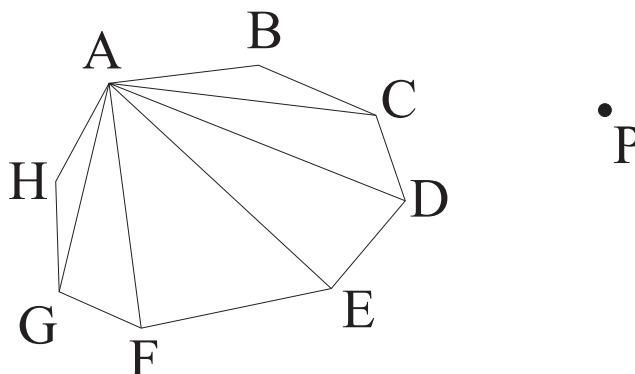


Fig. A.10 Algorithm to determine if a polygon contains a point

実行結果を配列データとして格納しておき，その処理が必要な場面で格納した配列データを参照させるような構造のことをいう<sup>\*19</sup>．本ソフトウェアにおいては，包含判定の他，マイコンへの出力判定等これまで if 文を使用していた箇所に使用しており，これによって処理の効率化を図っている<sup>\*20</sup>．

包含判定の LUT の具体的な方法を一例として以下に示す．

- [1] 画面全体のピクセルを int 型 2 次元配列として用意する．
- [2] 画面に表示したオブジェクトとの包含判定を各々のピクセル位置に対して実行する．
- [3] 包含判定が真なら “1”，もしくは偽なら “0” を対応した配列要素に格納する．
- [4] カーソル移動に伴う判定処理において，これらの結果をカーソル移動時に参照する．

#### A.2.2.7 動作モード

本ソフトウェアでは，以下のモードに切り替えて使用することができる．

##### 周波数固定モード

マイコンへの送信データを固定にし，ON/OFF 切り替え周波数を固定するモード．画面内にオブジェクトは表示されず，カーソル動作中は常に感覚提示が行われる．

##### 弁別モード

Fig. A.11 に示すように画面を縦に 2 分割するようオブジェクトを表示し，それぞれのオブジェクトに異なる粗さ感覚を設定可能なモード．オブジェクト上のカーソル動作に

<sup>\*19</sup> この手法は数表等コンピュータ誕生以前から使用されており，計算を簡略化させる方法として一般的なものである．

<sup>\*20</sup> 本来 LUT はあくまで複雑な計算の簡略化・効率化のために使用され，例えば正弦関数の呼び出しの置き換え，グレースケール変換やコントラスト・ガンマ補正等の画像処理に使用されることが多い．本ソフトウェアにおける if 文の代替は応用的な方法である．

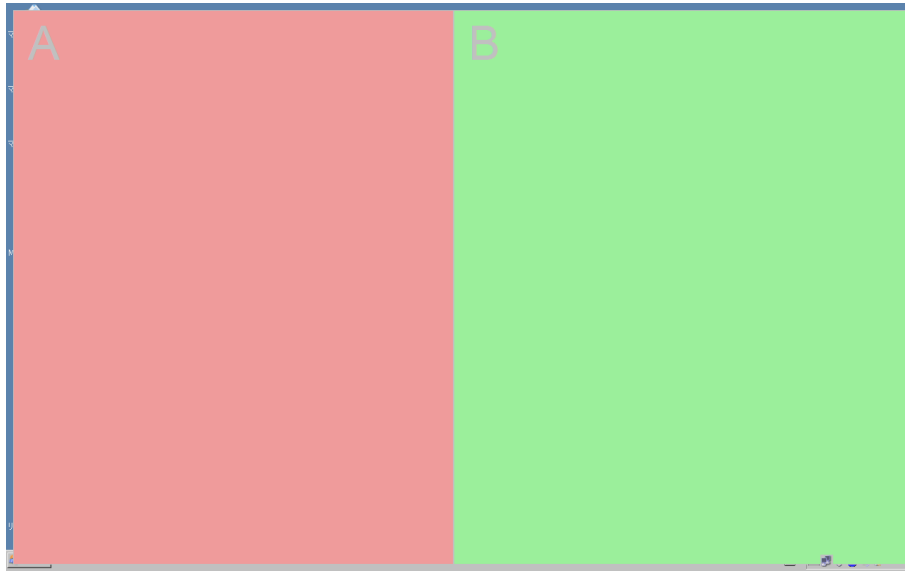


Fig. A.11 Tactile demonstration software running on determination mode

対して感覚提示が行われる。

#### ランダム表示モード（デフォルト設定）

Fig. A.5 に示すように画面内にオブジェクトを複数表示し，オブジェクト上のカーソル動作に対して感覚提示を行うモード．オブジェクトの形状は円・多角形・ランダムから選択可能であり，大きさも任意に設定可能である．初回起動時にはこのモードが選択される．

#### A.2.2.8 動作環境

##### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降（NT 系 OS，要管理者権限）  
2000，XP，Vista，7 において動作確認済み

##### 必須フォント

MS UI Gothic（日本語フォント以外は非対応）

##### 必須ランタイム

Microsoft .NET Framework 4.0

#### A.2.2.9 インストール・アンインストール方法

セットアッププログラム（setup.exe）を実行し，ウィザードに従ってインストールする．  
Microsoft .NET Framework 4.0 がインストールされていない場合，予めインストールする．

アンインストールは「コントロールパネル」の「プログラムの追加と削除」より「NTP Demo」を選択，アンインストールする．

#### A.2.2.10 使用方法

以下に，本ソフトウェアをインストール後の初期設定で使用する際の手順を示す．

- [1] 予めマイコンへ.bin ファイルをアップロードする．(シリアルポートはアップロード後閉じておく)
- [2] 本ソフトウェアを起動すると，画面全体が白っぽくなり，図のようにタスクバーの通知エリアにアイコンが表示される．(マウスクリック等は全て無効化される)
- [3] 画面上を右クリックし，表示されるメニューから「Output」をクリックし，シリアルポートを有効化する．
- [4] 再度画面上を右クリックし，「START」をクリックする．
- [5] Fig. A.5 のように画面上にオブジェクトが表示される．
- [6] オブジェクト上でカーソルを動作させると感覚提示が行われる．
- [7] (停止する場合)画面上を右クリックし，「STOP」をクリックする．
- [8] (終了する場合)画面上を右クリックし，「Quit」をクリックする．

基本的な操作は，画面上を右クリックした際に表示されるメニューより行う．モード変更やオブジェクト設定，シリアルポート設定，粗さ設定等の各種設定変更は右クリックメニューより「Setup」をクリックすると開かれる設定ウィンドウより行う．

### A.2.3 ペイントソフトに粗さ感覚提示を付加したソフトウェア

#### A.2.3.1 概要

具体的な動作概要は前項のソフトウェアと同様である．前項のソフトウェアには様々な機能を付加したが，あくまで粗さ感覚の有無を比較するようなデモンストレーションへの使用を前提としていた．本ソフトウェアは Windows OS で標準で付属するペイントソフト“Microsoft Paint”を簡易的に模倣したペイントソフトウェアであり，同様にウィンドウ内のキャンバスに対して線を描くことができる．Fig. A.12 に示すようにソフトウェアのウィンドウやメニュー，設定等はほとんどが“Microsoft Paint”と同一となっており，これらに加えてマイコンとの通信機能や後述の画像表示が可能である．キャンバス上で線を描いたときに皮膚感覚提示用パラメータをマイコンに送信する．キャンバス上でのカーソル移動を監視し，線の描画と同時にカーソル位置を記録，差分から単位時間当たりのカーソル速度 (pixel/s) を算出する．予め指定した画面の画素ピッチ (mm/pixel) より実画面上のペンの速度を算出し，皮膚感覚提示に用いるパラメータとする．加えて予め決定しておいた粗さ情報をマイコンへ送信する．こ

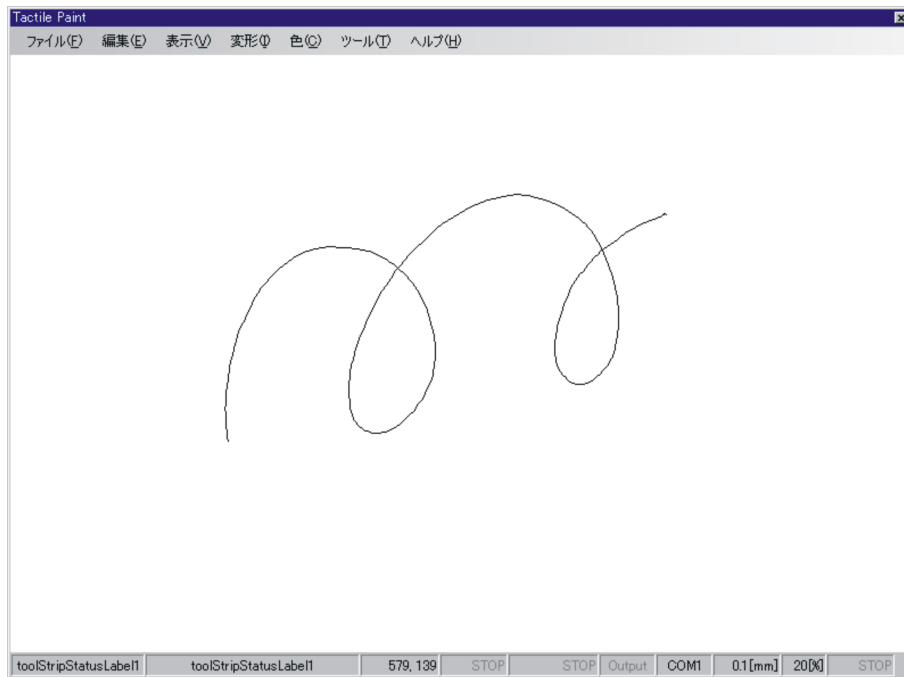


Fig. A.12 Paint software for generating drawing sensation

れにより，実際にキャンバスに線を描いているかのような感覚を知覚させる．

### A.2.3.2 開発環境

Windows OS を使用し，Visual Studio 2005 を用いて.NET Framework 2.0 及び Windows API を利用して開発を行った．ソースコードについては可読性についても考慮し，極力.NET ベースに統一して記述を行った．言語は C++/CLI を使用した．このプログラムのコンパイルに必要なライブラリについて以下に示す．

windows.h

Windows API(32 ビット用 Win32 API) 呼び出しに使用．

cmath

sqrt 関数や pow 関数等の数学関数の呼び出しに使用．

### A.2.3.3 テクスチャ画像の表示によるリアルな感覚提示

本ソフトウェアの特徴の一つに，任意のテクスチャ画像をキャンバスに貼り付け可能なことが挙げられる．通常のペイントソフトは Fig. A.12 に示すように真っ白な画面だが，本ソフトウェアではキャンバス地等の任意のテクスチャ画像を貼り付けることができる．キャンバス地のテクスチャ画像を貼り付けた際の様子を Fig. A.13 に示す．これにより，視覚情報と合わせ

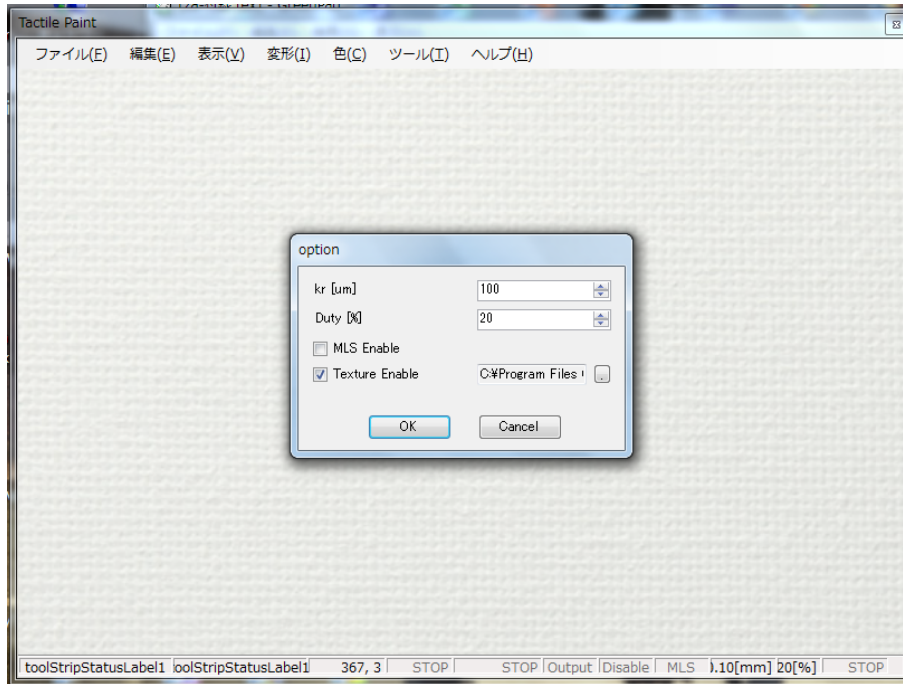


Fig. A.13 Paint software for generating drawing sensation with texture image

たよりリアルな粗さ感覚の提示が可能である。

ここで、リアルな感覚を提示するために、皮膚感覚提示用パラメータのうち粗さ情報（突起間隔） $k_r$  を適切に設定する必要がある。本ソフトウェアでは Fig. A.14 のように表示されたテクスチャ画像の凹凸が 10 回繰り返すように 2 点をプロットすることで粗さ情報の自動設定が可能となっている。

#### A.2.3.4 動作環境

##### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降（NT 系 OS，要管理者権限）

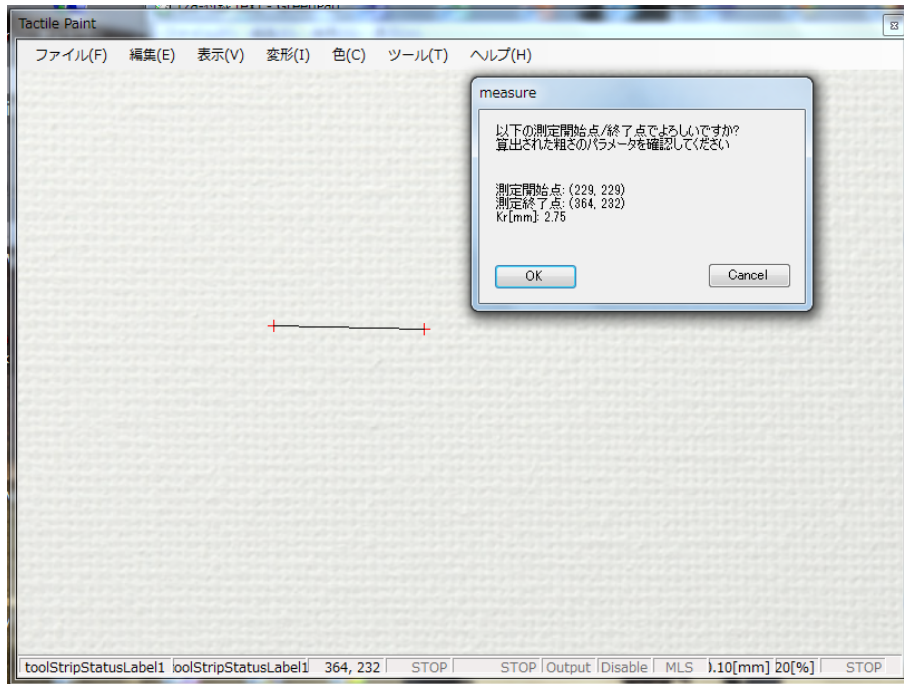
2000，XP，Vista，7 において動作確認済み

##### 必須フォント

MS UI Gothic（日本語フォント以外は非対応）

##### 必須ランタイム

Microsoft .NET Framework 2.0

Fig. A.14 Measurement of roughness  $k_r$  on the texture image

#### A.2.3.5 インストール・アンインストール方法

セットアッププログラム (setup.exe) を実行し、ウィザードに従ってインストールする。Microsoft .NET Framework 2.0 がインストールされていない場合、予めインストールする。

アンインストールは「コントロールパネル」の「プログラムの追加と削除」より「Tactile Paint」を選択、アンインストールする。

#### A.2.3.6 使用方法

- [1] 予めマイコンへ.bin ファイルをアップロードする。(シリアルポートはアップロード後閉じておく)
- [2] 本ソフトウェアを起動すると、Fig. A.12 に示す真っ白なウィンドウが表示される。
- [3] ソフトウェアのメニューバーより「ツール」をクリックし、表示されるメニューから「マイコン出力」をクリックし、シリアルポートを有効化する。
- [4] ウィンドウ内にドラッグ動作を行うことで、線の描画と同時に感覚提示が行われる。
- [5] (停止する場合)「ツール」「マイコン出力」をクリックし、チェックを外す。

基本的な操作は、メニューバーより行う。粗さ設定変更は「ツール」より「パラメータ変更」をクリックすると開かれる設定ウィンドウより行う。この設定ウィンドウにおいて、テク

スチャ画像の貼り付けが可能である。また、描画した線の削除には「変形」より「すべてクリア」をクリックする。

## A.2.4 画像の輝度情報に応じて粗さ感覚を提示するソフトウェア

### A.2.4.1 概要

具体的な動作概要は前項のソフトウェアと同様である。本ソフトウェアでは写真やイラスト等の画像ファイルを表示する。カーソル位置における画像ファイルのピクセル毎の輝度値（二値化したモノクロデータもしくは RGB のいずれかの輝度値に閾値を適用）に応じて、皮膚感覚提示用パラメータをマイコンに送信する。画像ファイル上でのカーソル移動を監視し、記録したカーソル位置の差分から単位時間当たりのカーソル速度 (pixel/s) を算出する。予め指定した画面の画素ピッチ (mm/pixel) より実画面上のペンの速度を算出し、皮膚感覚提示に用いるパラメータとする。加えて予め決定しておいた粗さ情報をマイコンへ送信する。二値化したピクセルの内、黒いピクセル上をなぞったときのみ粗さ感覚の提示を行う。これにより、視覚障害者に対して写真やイラストの形状・内容認識に応用できるのではないかと考えられる。

### A.2.4.2 開発環境

Windows OS を使用し、Visual Studio 2005 を用いて .NET Framework 2.0 及び Windows API を利用して開発を行った。ソースコードについては可読性についても考慮し、極力 .NET ベースに統一して記述を行った。このプログラムのコンパイルには .NET Framework 2.0 のみ必要である。

### A.2.4.3 二値化とグレースケール化

二値化 (Binalization) とは、ある値において閾値 (Threshold) 以下であれば “0”，超えていれば “1” とする処理である。画像処理においては画像の輝度値を閾値以上の場合に白、未満の場合に黒に変換する処理であり、欠陥検出や領域分割・抽出、処理のマスク等に応用される。Fig. A.15 に二値化した画像の例を示す。本ソフトウェアは上記の応用例のうち領域分割・抽出に該当するものとして行うことができる。本ソフトウェアではカラー情報を持つ画像の輝度値に対して二値化を行う。この際直接二値化することは好ましくないため、まず画像をグレースケール化する。

グレースケール化とは RGB のカラー情報を白黒の輝度 Y の諧調<sup>\*21</sup>に変換する方法である。グレースケール化には様々な方法がある。以下に代表的なものを示す。

<sup>\*21</sup> 輝度を Y とするのは CIE 表色系において XYZ 座標としたときの Y 軸が輝度となるためである。CIE とは国際照明委員会 (Commision internationale de l'éclairage) であり、光や照明、色空間等を規定する団体である。



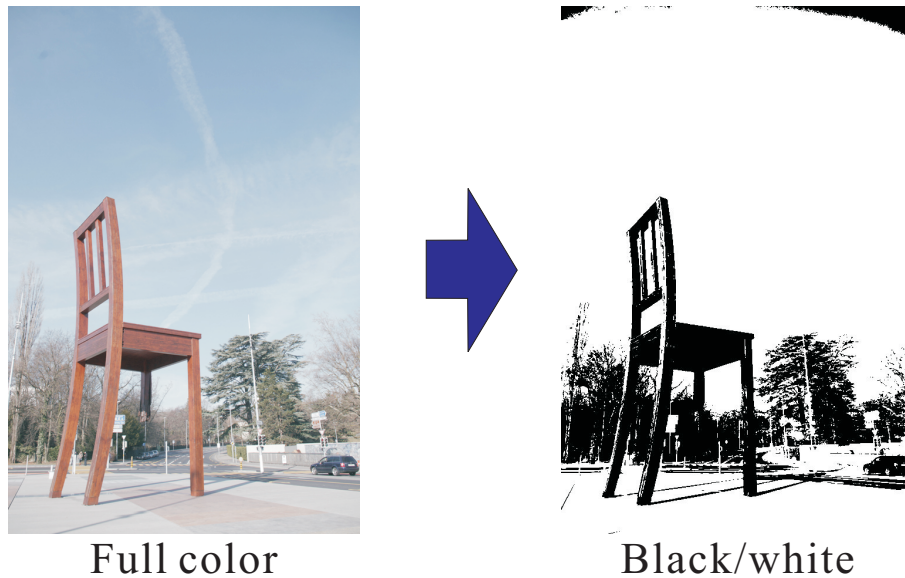


Fig. A.15 Binalization of full-color image

#### 単純平均法 (mean value method)

RGB の平均値を取り，用いる方法である．この方法では色の違いをなくすため，人間の感じる色の違い・明るさの違いを無視するという問題を持つ．

#### 中間値法 (middle value method)

RGB のそれぞれの最大値と最小値との中間値を用いる．この方法も単純平均法同様に色の違いをなくすため，人間の感じる色の違い・明るさの違いを無視するという問題を持つ．

#### NTSC 係数による加重平均法 (NTSC coefficients method)

RGB のそれぞれの値に重み付けをし，平均を取る方法である．重み付けの係数 (NTSC 係数) は NTSC 方式のテレビジョン放送で利用されている輝度信号の分離方法と同じものを用いる [138]．変換式を以下に示す．

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (\text{A.3})$$

ここで， $Y$  はグレースケールの輝度値， $R$ ， $G$ ， $B$  はそれぞれ RGB の輝度値である．この方法では心理物理量を考慮した加重平均がなされているので，より自然なグレースケール化が可能である．

#### HDTV 係数による加重平均と補正 (ITU coefficients method)

NTSC 係数同様，RGB のそれぞれの値に重み付けをし，平均を取る方法である．重み付けの係数 (HDTV 係数) は HDTV 方式のテレビジョン放送で利用されている輝度信号の分離方法を用いる [139]．この方法ではガンマ補正が含まれる．変換式を以下に



示す．

$$\begin{aligned}R' &= 0.222R^\gamma \\G' &= 0.707G^\gamma \\B' &= 0.071B^\gamma \\Y &= (R' + G' + B')^{\frac{1}{\gamma}}\end{aligned}\tag{A.4}$$

ここで、 $Y$  はグレースケールの輝度値、 $R, G, B$  はそれぞれ RGB の輝度値である。 $\gamma$  はガンマ値であり、画像の諧調の応答性を示すパラメータである。 $\gamma$  は通常 2.2 程の値である。この方法では NTSC 係数同様に心理物理量を考慮した加重平均がなされているので、より自然なグレースケール化が可能である。また、ガンマ補正を行うため環境に合わせた最適化が可能である。しかしながら、ガンマ補正の分処理が複雑になり、またガンマ補正により中間色の諧調が失われる可能性がある。

本ソフトウェアではこれらのうち、簡易に自然なグレースケール化が可能な NTSC 係数による加重平均法を採用した。このグレースケール化した輝度情報を元に、二値化を行い白（輝度 255）・黒（輝度 0）のピクセルのみとした。

#### A.2.4.4 動作環境

##### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降（NT 系 OS，要管理者権限）

2000，XP，Vista，7 において動作確認済み

##### 必須フォント

MS UI Gothic（日本語フォント以外は非対応）

##### 必須ランタイム

Microsoft .NET Framework 2.0

#### A.2.4.5 インストール・アンインストール方法

セットアッププログラム（setup.exe）を実行し、ウィザードに従ってインストールする。Microsoft .NET Framework 2.0 がインストールされていない場合、予めインストールする。

アンインストールは「コントロールパネル」の「プログラムの追加と削除」より「Tactile Photo」を選択、アンインストールする。

#### A.2.4.6 使用方法

- [1] 予めマイコンへ.bin ファイルをアップロードする。(シリアルポートはアップロード後閉じておく)
- [2] 本ソフトウェアを起動すると、空白のウィンドウが表示される。
- [3] ソフトウェアのメニューバーより「ファイル」から「開く」をクリックし、任意の画像ファイルを開く。
- [4] メニューバーの「フィルタ」から「二値化」をクリックし、閾値を決め二値化を行う。
- [5] メニューバーの「ツール」から「オプション」をクリックし、設定ウィンドウからシリアルポートを有効化する。
- [6] 二値化した画像上でドラッグ動作を行うことで、黒のピクセル上のみ感覚提示が行われる。
- [7] (停止する場合)「ツール」「オプション」をクリックし、シリアルポートを無効化する。

基本的な操作は、メニューバーより行う。粗さ設定変更は「ツール」より「オプション」をクリックすると開かれる設定ウィンドウより行う。この設定ウィンドウにおいて、感覚提示を行う輝度値の閾値変更が可能である。カラー画像上でドラッグ動作を行った場合、設定した閾値を元に感覚の提示が行われる。また、「ファイル」「名前を付けて保存」より二値化した画像の保存が可能である。

### A.2.5 iPod を用いて粗さ感覚を提示するソフトウェア

#### A.2.5.1 概要

具体的な動作概要は前項のパネルを3つ表示し粗さを提示するソフトウェアと同様である。本ソフトウェアではカーソル位置に応じて、皮膚感覚提示用信号を外部に送信する。画面上でのカーソル移動を監視し、記録したカーソル位置の差分から単位時間当たりのカーソル速度 (pixel/s) を算出する。予め指定した画面の画素ピッチ (mm/pixel) より実画面上のペンの速度を算出し、皮膚感覚提示に用いるパラメータとする。加えて予め決定しておいた粗さ情報を外部へ送信する。表示されたパネル上をなぞったときのみ粗さ感覚の提示を行う。これにより、スマートフォン・タブレットにおける応用を行う<sup>\*22</sup>。

<sup>\*22</sup> 最も一般的であったため iPod への応用を検討したが、現在ではスマートフォン・タブレットはより一般的なデバイスとなっている。特に現在 Android OS が外部通信・連携に対して応用性が高く、このような応用に向いていると考えられる。また、複雑になりある程度の専門知識は必要となるものの WiFi や Bluetooth 等の無線通信についても今後の課題である。

#### A.2.5.2 開発環境

MacOS X を使用し，XCode を用いて Objective-C により開発を行った．このプログラムのコンパイルには XCode 及び iPhone SDK が必要である．

#### A.2.5.3 音声による情報送信

iPod を用いた外部との通信を行う上で，外部通信用コネクタ（Dock コネクタ）をソフトウェアから用いることは困難である．そこで，より簡易に開発するため本ソフトウェアでは音声出力を検討した．iPod からは ON/OFF 切り替え信号を音声情報（正弦波）として出力し，外部でコンパレータにより整流して発振器のトリガ信号として使用する．これにより，マイコンを使うことなく粗さ感覚提示が可能である．

#### A.2.5.4 動作環境

Operating System

iPhone OS

必須ランタイム

iPhone SDK

### A.3 力覚提示デモ用プログラム

以下では，力覚提示用の Windows ソフトウェアについて説明する．本研究では，PHANToM を用いたスタイラス動作範囲の制限，Falcon を用いた視覚障害者向け補助ソフトウェアの開発を行った．

#### A.3.1 仮想空間を生成し PHANToM を用いて力覚提示を行うソフトウェア

##### A.3.1.1 概要

本ソフトウェアでは PHANToM を用いた力覚提示により，スタイラスの動作範囲の制限を行う．仮想空間を製作し，カーソル位置に応じてスタイラスへ力覚提示を行う．また，カーソル位置に応じて皮膚感覚提示用パラメータをマイコンへ送信し，皮膚感覚ディスプレイとの連携を行う．仮想空間内でのカーソル移動を監視し，記録したカーソル位置の差分から単位時間当たりのカーソル速度 (pixel/s) を算出する．仮想空間と画面との座標変換よりペンの速度を算出し，皮膚感覚提示に用いるパラメータとする．加えて予め決定しておいた粗さ情報を外部へ送信する．仮想空間の壁面をなぞったときのみ粗さ感覚の提示を行う．これにより，粗さ

感覚の提示と力覚提示を同時に行い、スタイラスが振動子に衝突しないようにする。

#### A.3.1.2 開発環境

Microsoft Visual C++ 6.0 を使用し、OpenGL による仮想空間描画を行った。また、OpenHaptics Toolkit 及び 3DTouch SDK により PHANToM の力覚提示を行った。このプログラムのコンパイルには OpenGL 及び OpenHaptics toolkit, 3DTouch SDK が必要である。

#### A.3.1.3 OpenGL による仮想空間の描画

本ソフトウェアでは、仮想空間の描画に OpenGL (Open Graphics Library) [140] を使用した。OpenGL とはグラフィクス API であり、オープン仕様で公開されており様々な処理に対応していることから広く普及している。また、クロスプラットフォームであり様々な言語を用いて開発することができる。

本ソフトウェアでは、OpenGL を用いて直方体の仮想空間を作成し、その底面に窪みを形成した。作成した仮想空間を図に示す。この窪みの底面が皮膚感覚ディスプレイの振動子に対応しており、窪みの底面でなぞり動作を行った際にマイコンへ粗さ情報の送信を行う。

#### A.3.1.4 OpenHaptics Toolkit による力覚提示

本ソフトウェアでは、PHANToM による力覚提示を行う上で OpenHaptics Toolkit 及び 3DTouch API を使用した。この API は OpenGL との親和性が高く、組み合わせが用意になるよう設計されている。OpenHaptics は HDAPI (Haptic Device API) 及び HLAPI (Haptic Library API) からなる。HDAPI はデバイスの状態の取得に、HLAPI は OpenGL との連携を行う。

本ソフトウェアでは、PHANToM のスタイラスの位置を仮想空間内のカーソルに反映させた。また、立方体の壁面にカーソルが衝突したときに反力の提示を行い、立方体の内側にスタイラスの動作範囲の制限を行った。

#### A.3.1.5 動作環境

##### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降 (NT 系 OS, 要管理者権限)

2000, XP において動作確認済み

##### 必須ランタイム

Microsoft Visual C++ 6.0 Runtime

## A.3.2 Falcon を用いて力覚提示を行いカーソルを制御するソフトウェア

### A.3.2.1 概要

本ソフトウェアでは Falcon のグリップ部分を操作することにより GUI のカーソル操作を行う。GUI のデスクトップ画面と一対一に対応する 3 次元の仮想空間を製作し、仮想空間内をカーソルは動作する。まず、デスクトップ画面上に表示しているウィンドウのハンドルを取得する。このとき、仮想空間の表示を行う本ソフトウェアのウィンドウはあくまで確認用であるため、自分自身のハンドルは除外する。取得したハンドルからウィンドウの位置と大きさを座標変換し、仮想空間内の対応する位置へ直方体として表示する。ここで、奥行きについてはウィンドウの順番から指定する。また、ハンドルからはウィンドウの情報（タイトル等）の取得も行う。カーソルが直方体に接触した際に力覚提示を行う。これにより、視覚障害者による GUI 環境下におけるコンピュータ操作を目的とする。

### A.3.2.2 開発環境

Microsoft Visual Studio 2008 を使用し、DirectX(Direct3D) による仮想空間描画を行った。また、Falcon の力覚提示には HDAL SDK を使用した。言語は C++/CLI を使用した。このプログラムのコンパイルには .NET Framework 3.5 及び DirectX, HDAL SDK が必要である。

### A.3.2.3 Falcon API

Falcon の力覚提示の開発を支援する API として様々なものが開発されている。以下に代表的なオープンソース API を示す。

#### HDAL SDK[141]

C++ 言語を用い、32bit の Windows 環境をプラットフォームとするローレベルな API である。

#### libnifalcon[142]

C++ 言語を用い、32bit の Windows 環境をプラットフォームとするローレベルな API である（64bit の Windows や MacOS X, Linux 環境も試験的に提供）。

#### CHAI3D[143]

C++ 言語を用い、32bit の Windows 環境をプラットフォームとするローレベルな API である（64bit の Windows や MacOS X, Linux 環境も試験的に提供）。libnifalcon 及び libpng を統合した環境である。

#### H3DAPI[144]

C++ 言語を用い、32bit の Windows 環境をプラットフォームとするハイレベルな API である。

JTouchToolkit[145]

言語として Java を用い、32bit の Windows 環境をプラットフォームとするローレベルな API である。HDAL のラッパー API である。

本ソフトウェアでは C++ を使用するため、HDAL を用いて Falcon の力覚提示の開発を行った。

#### A.3.2.4 Direct3D による仮想空間の描画

本ソフトウェアでは、仮想空間の描画に DirectX(Direct3D)[146] を使用した。DirectX とはゲーム及びマルチメディア API の集合体の総称であり、本ソフトウェアではこのうち 3 次元グラフィックス API である Direct3D を使用した。クロスプラットフォームである OpenGL に比べ、DirectX は Windows 環境での動作に特化している。しかしながら、本ソフトウェアで使用した Managed DirectX は .NET Framework との親和性が高く、記述が簡単である\*<sup>23</sup>。また、DirectX(Direct3D) は本来ゲームやマルチメディアに使用されることから、ビデオカード等のハードウェアレベルでの対応が OpenGL に比べて得やすいという利点を持つ\*<sup>24</sup>。本ソフトウェアでは使用していないものの、サウンド (Direct Sound) やジョイスティック (Direct Input) の使用等 OpenGL では対応していない機能を使用することも可能である。

本ソフトウェアでは、Direct3D を用いて直方体の仮想空間を作成した。作成した仮想空間を図に示す。この仮想空間がデスクトップ画面と一対一に対応する。デスクトップ画面上のウィンドウは、仮想空間内では直方体として表示される。仮想空間には奥行きが存在するが、これはデスクトップ画面におけるウィンドウの重なり表現に使用した。

#### A.3.2.5 HDAL による力覚提示

本ソフトウェアでは、Falcon による力覚提示を行う上で HDAL API を使用した。この API は OpenGL との連携を前提に設計されている。Direct3D と連携して使用する上で注意する点として、座標軸の違いがあげられる。OpenGL では右手座標系 (Fig. A.16(a)) を使用しているのに対し、DirectX では左手座標系 (Fig. A.16(b)) を使用している。このため、各種 API の軸方向には常に気を付ける必要がある。また、Falcon の位置の取得にも HDAL を使用している。

本ソフトウェアでは、Falcon のグリップ位置を仮想空間内のカーソルに反映させた。また、仮想空間の直方体壁面にカーソルが衝突したときに反力の提示を行った。

\*<sup>23</sup> 現在は開発終了となっており、よりゲーム向けに特化した Microsoft XNA[147] へと開発がシフトしている。

\*<sup>24</sup> Windows Vista 以降の Windows では OpenGL は Direct 3D のラッパーとして機能している場合がある。

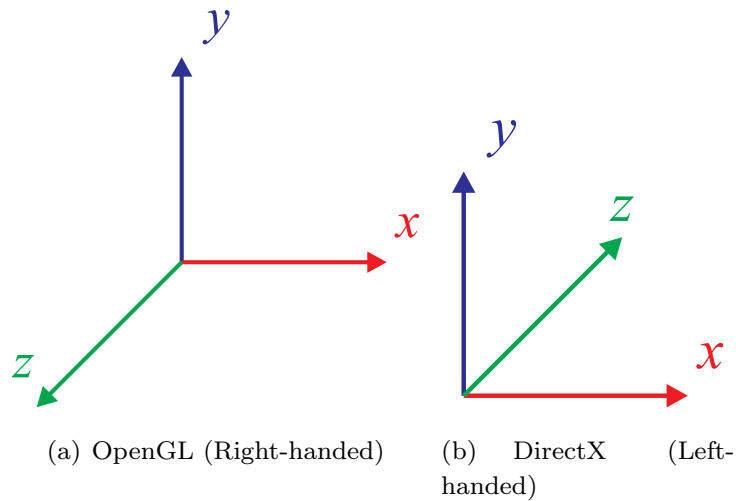


Fig. A.16 Coordinate system for graphics APIs

#### A.3.2.6 正確なタイマ関数を用いた画面更新

これまで開発したソフトウェアでは作成したフォーム内でタイマ関数を呼び出すことで画面の描画更新を行っていた。しかしながら、この方法ではウィンドウの作成及び実行を `Application::Run` メソッドによって自動的に行っていたため、更新時間は正確ではなかった。そこで、本ソフトウェアでは以下のように画面描画部分にタイマを実装することで正確な画面更新を実現した。処理に時間が掛かった場合等にはフレームスキップを行った。

```
Form1^ frm = gcnew Form1();
//イニシャライズ
frm->init();
//ウィンドウ作成
frm->Show();

//タイマ変数
LARGE_INTEGER q_start, q_end, q_freq, q_count, q_diff;
//現在のカウンタ取得
QueryPerformanceCounter(&q_start);
//カウンタ周波数取得
QueryPerformanceFrequency(&q_freq);
//1 フレームあたりのカウント数算出
q_count.QuadPart = q_freq.QuadPart / frm->FPS;

while(frm->Created){
//メインループ
frm->mainloop();
```

```
//Windows イベント処理
Application::DoEvents();

//現在のカウンタ取得
QueryPerformanceCounter(&q_end);
q_diff.QuadPart = q_end.QuadPart - q_start.QuadPart;
//簡易フレームスキップ
if(q_diff.QuadPart > q_count.QuadPart){
//ウェイト
while(q_diff.QuadPart < q_count.QuadPart * 2){
QueryPerformanceCounter(&q_end);
q_diff.QuadPart = q_end.QuadPart - q_start.QuadPart;
}
}
//通常処理
else{
//ウェイト
while(q_diff.QuadPart < q_count.QuadPart){
QueryPerformanceCounter(&q_end);
q_diff.QuadPart = q_end.QuadPart - q_start.QuadPart;
}
}
//FPS 算出
frm->s_fps = ((double)q_freq.QuadPart / q_diff.QuadPart).ToString("F");
//カウンタ更新
q_start.QuadPart = q_end.QuadPart;
}
return 0;
```

#### A.3.2.7 動作環境

##### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降 (NT 系 OS, 要管理者権限)

2000, XP, Vista, 7 において動作確認済み

##### 必須フォント

MS UI Gothic (日本語フォント以外は非対応)

##### 必須ランタイム

Microsoft .NET Framework 3.5



## A.4 研究を行う上で開発したツール

以下では、その他開発を行ったソフトウェアについて説明する。

### A.4.1 M 系列乱数を生成するソフトウェア

#### A.4.1.1 概要

マイコンで使用している M 系列乱数について、マイコン内部で生成すると処理時間を要する。このため、M 系列乱数を生成するソフトウェアを開発した。

#### A.4.1.2 開発環境

Microsoft Visual Studio 2005 を使用し、C++/CLI 言語によるコンソールアプリケーションとした。このプログラムのコンパイルには .NET Framework 2.0 が必要である。

#### A.4.1.3 M 系列の生成

M 系列とは、次のガロア体の漸化式により生成される数列である。

$$x_n = x_{n-p} \vee x_{n-q} (p > q) \quad (\text{A.5})$$

上式において、 $x$  の値は 1 ビット (0 もしくは 1) である。 $n$  は整数であり、 $n$  番目の項を表す。 $\vee$  は排他的論理和 (Exclusive OR: XOR) を表す。すなわち、 $n$  番目の項は  $n-p$  番目の項と  $n-q$  番目の項の排他的論理和からなる。ここで、M 系列の周期は  $p^{n-1}$  である。例えば 10 ビットの M 系列の場合、 $2^{10} - 1 = 1023$  の数列となる。M 系列の生成を実装する場合には全て零以外の初期値が  $p$  個必要である。この M 系列を用いた擬似乱数生成法として、線形帰還シフトレジスタ [148] やメルセンヌ・ツイスタ [149] 等がある。

### A.4.2 FFT 解析を行うソフトウェア

#### A.4.2.1 概要

取得したデータの FFT 解析を行うためのソフトウェアとして、ライブラリに FFTW を使用したソフトウェアを開発した。

#### A.4.2.2 FFTW による FFT 解析

FFTW (Fastest Fourier Transform in the West) とは、マサチューセッツ工科大学 (MIT) にて開発されたフーリエ変換ライブラリである [150]。このライブラリは高速な演算を特徴としており、MATLAB の FFT エンジンにも使用されている。

## A.4.2.3 窓関数

一般的なフーリエ変換の定義では、変換する関数は無限区間かつ連続である。これに対し、離散データをフーリエ変換する場合 DFT (離散フーリエ変換: Discrete Fourier Transform) を用いる。FFT とはこの DFT を計算機により高速に計算するためのものであるが、一般的にデータは有限である。このようなデータをフーリエ変換するとき、有限区間で変換を行い、区間外は無視する。この区間外を零にするための関数を窓関数 (window function) といい、窓関数との積をフーリエ変換する。最も簡単な窓関数は矩形窓で、これは有限区間内は 1、それ以外は零となる関数である。しかしながら、矩形窓では区間の両端において不連続であるため解析結果に影響が生じる。これを解消するため、両端が連続かつ滑らかになるような様々な窓関数がこれまで提案されている。一般的な窓関数を以下に示す。(区間を  $[0,1]$  とし、最大値を 1 としたものである。)

## 矩形窓 (rectangular window)

有限長のデータに何も手を加えないときに使用している関数である。区間内では 1、それ以外は 0 となる関数である。元のデータに手を加えないため、周波数分解能は最もいい。このため、インパルス波形等の過渡応答を見るために用いられることが多い。

$$w(x) = 1 \quad (\text{A.6})$$

## ハン窓 (hann window)

Julius von Hann が考案したものであり<sup>\*25</sup>、最もよく使用される窓関数の一つである。後述のハミング窓から「ハニング窓 (hanning window)」と呼ぶこともある。

$$w(x) = 0.5 - 0.5\cos 2\pi x \quad (\text{A.7})$$

## ハミング窓 (hamming window)

Richard Wesley Hamming が考案した窓関数であり<sup>\*26</sup>、ハン窓の改良版である。周波数分解能がハン窓よりもよく、ダイナミックレンジが狭い。区間の両端は不連続である。

$$w(x) = 0.54 - 0.46\cos 2\pi x \quad (\text{A.8})$$

## ブラックマン窓 (Blackman window)

Ralph Beebe Blackman が考案した窓関数である。周波数分解能がハン窓やハミング窓よりも悪いが、ダイナミックレンジが広いいためよく用いられる。

$$w(x) = 0.42 - 0.5\cos 2\pi x + 0.08\cos 4\pi x \quad (\text{A.9})$$

\*25 人物名が由来だが、関数名は慣例的に小文字で書く

\*26 人物名が由来だが、関数名は慣例的に小文字で書く

ここで、得られる解析結果は窓関数との積を変換したものであるため、本来の関数のものとは異なる。得られる解析結果のスペクトルはピークが低下（周波数分解能が低下）し、ノイズが増加（ダイナミックレンジが低下）する。また、適切な窓関数は使用者の意図（解析目的）に応じて選択する必要がある。

#### A.4.2.4 周波数分解能

FFT 解析により得られる結果は周波数の離散値であり、分解能は元のデータのサンプリング周期及びデータ点数より以下の式から決定される。

$$f_r = \frac{1}{T_s \times N} \quad (\text{A.10})$$

ここで、 $f_r$  は周波数分解能、 $T_s$  はサンプリング周期、 $N$  はデータ点数である。

#### A.4.2.5 動作モード

本ソフトウェアの動作モードを以下に示す。

##### 1次元 FFT 解析モード

ファイルを読み込み、時系列データを FFT 解析する。

##### 正弦波発振器モード

任意のパラメータを持つ正弦波の時系列離散データをファイルに書き込む。

#### A.4.2.6 開発環境

Microsoft Visual Studio 2005 を使用し、C++/CLI 言語により記述を行った。このプログラムのコンパイルには .NET Framework 2.0 が必要である。

#### A.4.2.7 動作環境

##### Operating System

Microsoft Windows 2000 以降（NT 系 OS、要管理者権限）

2000、XP、Vista、7 において動作確認済み

##### 必須フォント

MS UI Gothic（日本語フォント以外は非対応）

##### 必須ランタイム

Microsoft .NET Framework 2.0

## A.4.2.8 インストール・アンインストール方法

セットアッププログラム (setup.exe) を実行し、ウィザードに従ってインストールする。Microsoft .NET Framework 2.0 がインストールされていない場合、予めインストールする。

アンインストールは「コントロールパネル」の「プログラムの追加と削除」より「FFTW3 Test」を選択、アンインストールする。

## A.4.2.9 使用方法

- [1] 変換するファイルを読み込む。
- [2] 読み込んだファイルの内容のうち、時間軸と変換するデータ列を選択する。
- [3] 窓関数を選択する。
- [4] 変換データの出力先を指定する。
- [5] 変換を実行する。

基本的な操作は単一のウィンドウ内にて行う。また、任意の正弦波データを出力し、保存することが可能である。

## 付録 B

### 皮膚感覚提示デモンストレーション

付録 B では、皮膚感覚ディスプレイの使用方法について述べる。

#### B.1 ガラス基板を用いた間接励振弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ

##### B.1.1 機器の準備と接続

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを使用するにあたり、必要な機器を以下に示す。

- ・ ガラス基板を用いた皮膚感覚ディスプレイ装置本体
- ・ アルミ箔（スライダとして使用）
- ・ デモ用マイコン（専用品，BNC 出力コネクタ付き）
- ・ マイコン用電源（5V）
- ・ 高周波発振器（Agilent 33250A）
- ・ 高周波アンプ（Thamway T145-5546E）
- ・ BNC ケーブル（上記機器接続だけであれば 3 本）

このほか、動作確認に適宜オシロスコープ等を使用する。

次に、機器の接続構成を Fig. B.1 に示す。機器の接続を以下に示す。

- [1] 装置本体の Dsub ケーブルをデモ用マイコンに接続する。
- [2] デモ用マイコンに付属の BNC 変換コネクタに BNC ケーブルを接続し、発振器背面の Ext.Trig 端子に接続する。
- [3] 発振器の出力端子からアンプの入力端子へ BNC ケーブルを接続する。
- [4] アンプの出力端子から装置本体へ BNC ケーブルを接続する。

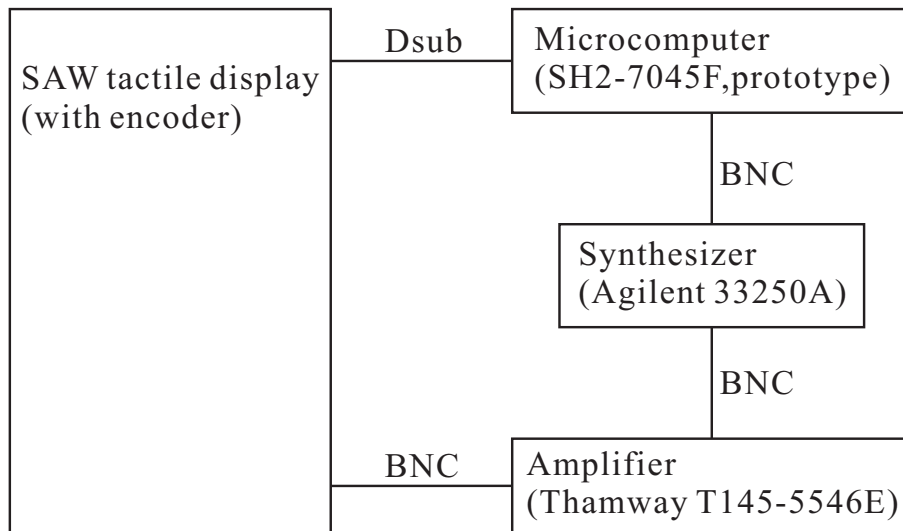


Fig. B.1 Connection diagram of SAW tactile display using glass substrate

### B.1.2 使用方法

以下に機器の使用方法を示す。

- [1] 装置本体の BNC 端子にインピーダンスアナライザーを接続し、振動子の共振周波数を確認する\*<sup>1</sup>。
- [2] 前項の通りに機器の接続を行う。
- [3] デモ用マイコンに電源（5V）を供給する\*<sup>2</sup>。
- [4] 発振器の電源を投入し、以下のように設定を行う。
  - ・モード: 正弦波（Gated Burst）
  - ・周波数: 先に確認した共振周波数
  - ・振幅:  $100mV_{p-p}$  くらい
- [5] 再度接続及び設定の確認を行い、発振器の出力を ON にする。
- [6] アンプの電源を投入し、アンプ出力を ON にする。
- [7] 装置本体のガラス面上にアルミ箔を乗せ、なぞり動作を行う。

## B.2 ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイ

### B.2.1 機器の準備と接続

ペンタブレット型弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを使用するにあたり、必要な機器を以下に示す。

- ・弾性表面波振動子（移動型振動子）
- ・デモ用マイコン（SH-2，BNC 出力コネクタ付き）
- ・マイコン用電源（5V，マイコンボックスは AC 電源内蔵）
- ・高周波発振器（Agilent 33250A）
- ・高周波アンプ（Thamway T145-5546E）
- ・BNC ケーブル（上記機器接続だけであれば 3 本）
- ・液晶ペンタブレット（本体，中継ボックス，DVI ケーブルもしくは VGA ケーブル，USB ケーブル）

---

\*<sup>1</sup> ニオブ酸リチウム（Y-Z）の場合はおおよそ 8.60MHz である。展示会等で持ち出す場合には会場で確認できないため、事前に確認しておく。ただし、温度等によりある程度変動するため注意。電流プローブによる確認も有効である。

\*<sup>2</sup> 正常であれば装置本体の液晶ディスプレイにデモ用のパターンが表示される。

- ・ 液晶ペンタブレット用マーカーペン（交換用スライダニブ含む）
- ・ コンピュータ（MacBook Pro）
- ・ USB-RS232C 変換アダプタ・RS232C ケーブル

このほか、動作確認に適宜オシロスコープ等を使用する。

次に、機器の接続構成を Fig. B.2 に示す。機器の接続を以下に示す。

- [1] 液晶ペンタブレットと中継ボックスを専用ケーブルで接続する。
- [2] 中継ボックスからコンピュータへ DVI（もしくは VGA）ケーブルと USB ケーブルを接続する\*3。
- [3] コンピュータからデモ用マイコンへ RS232C ケーブルを接続する。
- [4] デモ用マイコンに付属の BNC 変換コネクタに BNC ケーブルを接続し、発振器背面の Ext.Trig 端子に接続する。
- [5] 発振器の出力端子からアンプの入力端子へ BNC ケーブルを接続する。
- [6] アンプの出力端子から振動子へ BNC ケーブルを接続する。

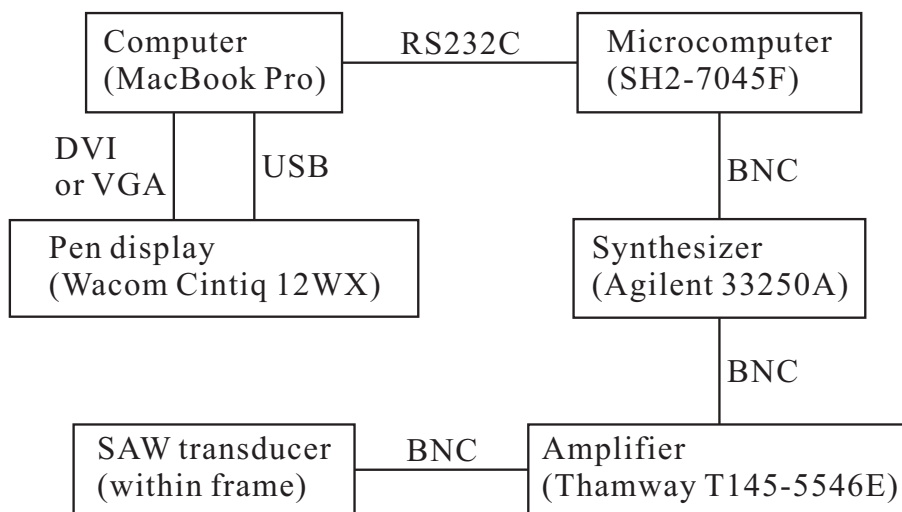


Fig. B.2 Connection diagram of pen tablet type SAW tactile display

## B.2.2 使用方法

以下に機器の使用方法を示す。

\*3 DVI ケーブル（もしくは VGA ケーブル）は液晶ディスプレイの表示用であり，USB ケーブルはペンタブレット機能用である。



- [1] 振動子の BNC 端子にインピーダンスアナライザーを接続し、振動子の共振周波数を確認する\*4。
- [2] 前項の通りに機器の接続を行う。
- [3] コンピュータの電源を投入する (MacBook Pro を使用する場合は VirtualBox を起動し、Windows の仮想環境を起動する。).
- [4] シリアル通信ソフト (TeraTerm 等) を起動する\*5。
- [5] デモ用マイコンに電源 (5V) を供給する (マイコンボックスを使用する場合は AC 電源のスイッチを ON にする)。
- [6] 端末上にメッセージが表示される\*6ので、アップロードモードに切り替えて\*7プログラムをアップロードする\*8。
- [7] アップロードが終了したらプログラムを実行し\*9、端末の接続を切断する。
- [8] 「NTPD」を起動する\*10。
- [9] 「NTPD」を出力設定にし\*11、画面上にパターンを表示させる\*12。
- [10] 発振器の電源を投入し、以下のように設定を行う。
  - ・モード: 正弦波 (Gated Burst)
  - ・周波数: 先に確認した共振周波数
  - ・振幅:  $100mV_{p-p}$  くらい
- [11] 再度接続及び設定の確認を行い、発振器の出力を ON にする。
- [12] アンプの電源を投入し、アンプ出力を ON にする。
- [13] 振動子を液晶画面上に配置し、枠の内部をマーカーペンをういてなぞり動作を行う。

## B.3 保守

弾性表面波皮膚感覚ディスプレイを継続して使用する上で必要な保守管理について記述する。

---

\*4 ニオブ酸リチウム (128°Y-X) の場合はおおよそ 15.15MHz である。展示会等で持ち出す場合には会場で確認できないため、事前に確認しておく。ただし、温度等によりある程度変動するため注意。電流プローブによる確認も有効である。

\*5 マイコンとの通信はボーレート 38400 で行う。

\*6 表示されない場合、マイコンのリセットを行う。

\*7 カウントダウン中に「G」キーを押すことでアップロードモードへの切り替える

\*8 通常アップロードするファイルは「TactileDisplayram.bin」であり、乱数の参照を行う場合は「TactileDisplayram\_Multi」である。

\*9 「スペースキー」を押すことでプログラムが実行される。

\*10 起動すると画面が淡くなる。

\*11 画面上を右クリックし、メニューから「Output」をクリックする。

\*12 画面上を右クリックし、メニューから「START」をクリックする。

### B.3.1 振動子の清掃

展示会やポスターセッションにおけるデモンストレーション，および日々の実験等で振動子が汚れることが多い．特に指の皮脂による汚れは吸音材として働き，弾性表面波の伝播を阻害して振動子の性能を劣化させる．このため，適宜 IPA をベンコットに含ませ振動子の表面を拭き，汚れを取り除く．

### B.3.2 マーカーペン用スライダニブの製作

スライダは消耗品であり，アルミ箔が破れたら取り替える必要がある．デモンストレーションを繰り返すと，スライダのアルミ箔が磨耗等で破れ得られる感覚が劣化する．指でなぞる皮膚感覚ディスプレイでは，スライダはアルミ箔のみである．このため，交換は容易であり，事前に大きなアルミ箔を用意しておき任意の大きさに切り取って使用する．しかしながら，ペンタブレット型皮膚感覚ディスプレイで使用するマーカーペンではスライダニブを製作する必要があるため，普段から十分に予備のスライダニブを用意しておく必要がある．スライダニブの構造を Fig. B.3 に示す．図において，(a) は市販のフェルトニブであり，スライダニブの製作にはこのフェルトニブを使用する．図 (b) のスライダニブの製作方法を以下に示す．

- [1] フェルトニブのフェルト部分を取り外す<sup>\*13</sup>．
- [2] 取り外したフェルト部分と同じ形状にシリコンゴムを形成する．
- [3] シリコンゴムの周囲にアルミ箔を貼り付ける<sup>\*14</sup>．
- [4] アルミ箔を固定したシリコンゴムをフレームに挿入し，固定する<sup>\*15</sup>．

また，図 (c) はアルミ箔の代わりに布を用いたものである．布を用いることによってアルミ箔のように破れることがなく，耐久性を向上させることができる．しかしながら，得られる感覚はアルミ箔よりも小さくなる．

<sup>\*13</sup> フェルト部分はフレームに接着されているため，カッター等を用いる

<sup>\*14</sup> 接着にはアロンアルファ等のシアノアクリレート系の瞬間接着剤を用いたが，本来シアノアクリレート系の接着剤ではシリコンゴムの接着はできない．本構成ではアルミ箔の簡易形状固定として用いている．また，シアノアクリレート系接着剤を多量に用いるとシリコンゴムを侵し，弾性を失うため注意が必要である．また，これを防ぐためには酢酸ビニル樹脂エマルジョン系の接着剤（木工用ボンド）の利用も効果的であるが，固定に時間を要する．

<sup>\*15</sup> 接着にはシアノアクリレート系の瞬間接着剤を用いた．

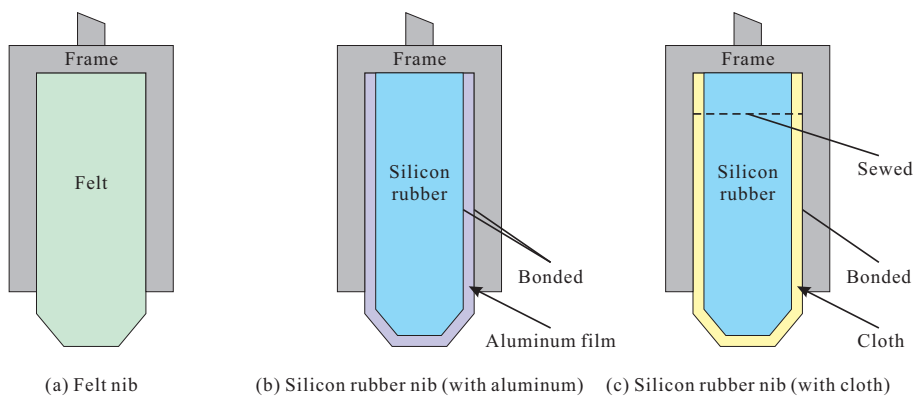


Fig. B.3 Structures of felt nib and slider nibs

## 付録 C

### 本研究で製作した電気回路

付録 C では、本研究において製作した電気回路について述べる。

#### C.1 FET スイッチング回路

パルスによる弾性表面波の励振を行うため、FET を用いたスイッチング回路を製作した。

##### C.1.1 トランジスタ

トランジスタとはアナログ回路における増幅やデジタル回路におけるスイッチングを行う半導体である。一般にトランジスタというと P 型と N 型の半導体を接続したバイポーラトランジスタのことを指す。バイポーラトランジスタはエミッタ・ベース・コレクタの 3 端子からなり、エミッタ・ベース間に電流を流すことでエミッタ・コレクタ間に何倍もの電流を流すことができる。コレクタ電流  $I_c$  とベース電流  $I_b$  の関係は以下の式より表される。

$$I_c = I_b \times h_{FE} \quad (\text{C.1})$$

ここで、 $h_{FE}$  は直流電流増幅率と呼び、通常数十から数百の値である。

一方、スイッチングにおいてはこの増幅作用を使用するが、ON/OFF のみが必要であるスイッチングには飽和領域（コレクタ電流とベース電流の比が直流電流増幅率よりも小さい領域）を用いる。

##### C.1.2 FET

FET（電界効果トランジスタ: Field effect transistor）とは、トランジスタの一種である。FET は用いる半導体が 1 種類のみユニポーラトランジスタである。FET にはソース・ゲート・ドレインの 3 端子からなるものと、バックゲート（バルク）端子を加えた 4 端子型がある。このうち、特にゲート電極に半導体酸化物を用いたものを MOSFET（Metal Oxide

Semiconductor FET) という。ゲート端子に電圧を掛けることでドレイン・ソース間に電流を流すことができる。

### C.1.3 IGBT

FET と同様のパワー素子に、IGBT (絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ: Insulated gate bipolar transistor) がある。IGBT は、FET の高速スイッチング・電圧駆動特性とバイポーラ・トランジスタの低オン電圧特性を組み合わせたものである [151]。駆動には FET と同様の方法が使用可能であり、本項の回路が応用可能である。

### C.1.4 ハイサイド駆動回路

#### C.1.4.1 概要

FET 単体を用いたハイサイド駆動を行う回路である。ハイサイド駆動とは、FET のソースに負荷を接続する構成を指す。回路製作には片面の紙フェノール基板を使用した。この駆動回路では、矩形波の制御信号 (0–15V) を入力することで高電圧の ON/OFF が可能である。

#### C.1.4.2 回路図

回路図を Fig. C.1 に、基板レイアウトを Fig. C.2 に示す。また、使用した部品について Table C.1 に示す。この駆動回路において、ドライバにはハーフブリッジ用ドライバである IR2110 を片側のみ用いている。出力先には容量成分である超音波振動子を取り付けられる。そのままでは直流電流は流れないため、FET の OFF 時には並列に抵抗を取り付けることによる放電を利用している。

Table C.1 Electric components in high-side switching circuit

Symbol	Category	Model
Q1	FET	Advanced Power Technology ARF448A
U1	FET driver	International Rectifier IR2110
C1–C3, C5	Bypass capacitor	Nippon Chemi-con KTD251B104M32A0T00
C4	Bootstrap capacitor	Nichicon UBX2D100MPL

#### C.1.4.3 ブートストラップ回路 [152][153]

ハイサイド駆動の場合、FET を ON にするためには、ゲート電圧をドレイン電圧よりも 10V 程度高くする必要がある。このため、駆動用のフローティング電源を別に用意する必要がある。

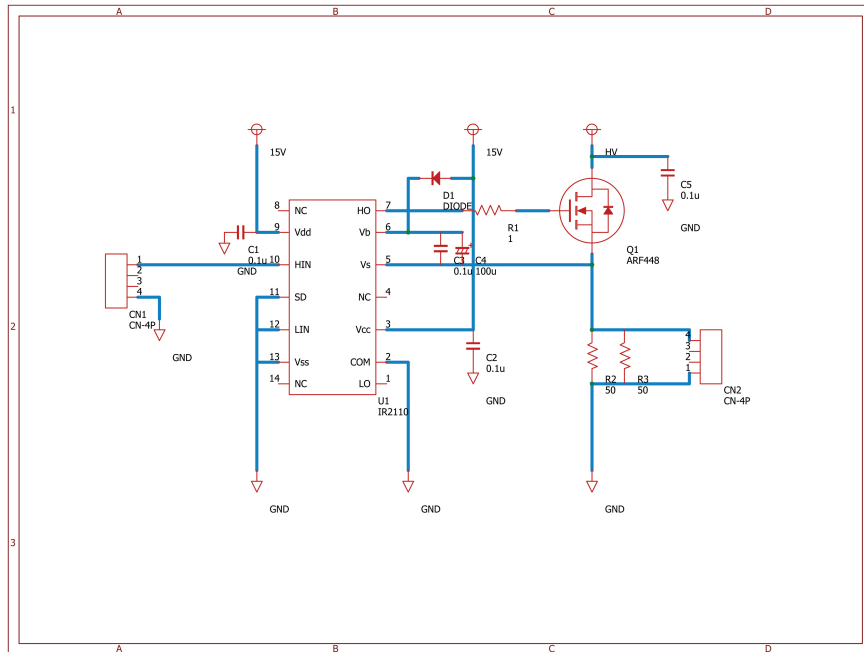


Fig. C.1 Circuit diagram of high-side switching using IR2110

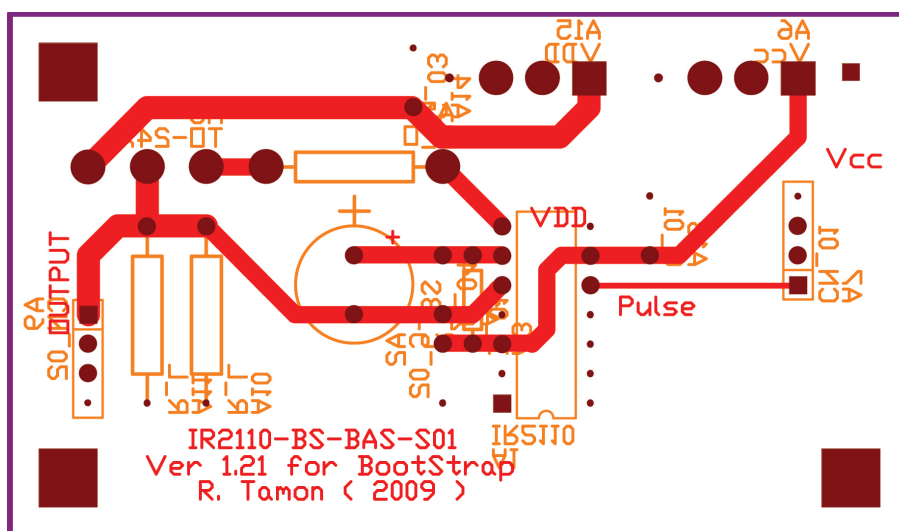


Fig. C.2 Circuit layout of high-side switching using IR2110

ある．本回路では，ハイサイド駆動にはブートストラップと呼ばれる方法を使用した．この方法では，コンデンサとダイオードによってフローティング電源を代用することができ，安価かつ簡易に駆動回路を構成することができる．このコンデンサ及びダイオードをブートストラップコンデンサ及びブートストラップダイオードという．FET が OFF のとき，ドライバ電源からブートストラップコンデンサに電荷が充電され，この電荷によって FET の駆動を行う．ブートストラップコンデンサに供給される電圧はドライバ電源電圧であるため，高耐圧とする必要はない．ブートストラップコンデンサによって供給される最小電荷量  $Q_{bs}$  を以下に示す [154][155] ．

$$Q_{bs} = 2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f} \quad (C.2)$$

ここで， $Q_g$  はハイサイド FET のゲート電荷容量， $f$  はスイッチング周波数， $I_{Cbs(leak)}$  はブートストラップコンデンサのリーク電流， $Q_{ls}$  は周期毎に必要なレベルシフトチャージ， $I_{qbs(max)}$  はハイサイド駆動回路の最大静止電流である．ここで，ブートストラップコンデンサのリーク電流は電解コンデンサを使用していなければ無視することができる．レベルシフトチャージは，International Rectifier 製のドライバ IC を使用する場合，500V/600V 耐圧のものであれば 5nC，1200V 耐圧のものであれば 20nC 必要である．また，上式はスイッチングのデューティ比が 50% の時のものであり，仮にデューティ比がそれ以上の場合はより多くの電荷を要する．(C.2) 式を満たしていない場合，供給電圧にはリップルが生じ，ハイサイド FET のゲートへの出力が停止する．これを防ぐため，ブートストラップコンデンサ容量は (C.2) 式より求められる値の最低 2 倍以上は必要である．最小のブートストラップコンデンサ容量  $C_{bs}$  は次式より表される．

$$C_{bs} \geq \frac{2(2Q_g + \frac{I_{qbs(max)}}{f} + Q_{ls} + \frac{I_{Cbs(leak)}}{f})}{V_{cc} - V_f - V_{LS}} \quad (C.3)$$

ここで， $V_f$  はブートストラップダイオードによって生じる順方向電圧降下， $V_{LS}$  はハーフブリッジ構成（後述）でのローサイド FET またはハイサイドドライバの負荷における電圧降下， $V_{cc}$  は論理回路電源電圧（ドライバ電源電圧）である．ブートストラップ回路の動作によっては小容量コンデンサの過充電が考えられ，またリップルを低減する必要があるため (C.3) 式によって導出される容量の 15 倍程度の容量のものが用いられる．また，ブートストラップ回路に必要なダイオードは負荷回路の電源電圧をブロックする必要があるため，以下の条件を満たす必要がある．

- $V_{rrm}$  は負荷回路の電源電圧以上とする
- $t_{rr(max)}$  は 100ns 未満，ファストリカバリダイオード
- $I_f$  は (C.2) 式より導出された  $Q_{bs}$  とスイッチング周波数  $f$  の積

ブートストラップ回路を構成する上で、ブートストラップコンデンサは可能な限り IC のピンに最短とする必要がある。また、ブートストラップコンデンサに電解コンデンサを使用する場合、電解コンデンサは低 ESR のものを用い、電解コンデンサに加えてセラミックコンデンサまたはタンタルコンデンサを並列に使用する必要がある。

#### C.1.4.4 回路の問題点

振動子を出力に取り付ける場合、OFF 時には抵抗を用いた放電を行う。このため、出力の立ち上がり時間に比べて立ち下がり時間が長くなる。本研究においては立ち上がり時間・立ち下がり時間はともに短くする必要があるため、次項のハーフブリッジ回路を製作した。

### C.1.5 ハーフブリッジ回路

#### C.1.5.1 概要

前項のハイサイド駆動回路では、出力の立ち上がり時間に比べて立ち下がり時間が長くなるという問題があった。これを解決するため、FET を 2 つ用いたハーフブリッジ回路を製作した。高電圧の印加を考慮し、回路製作には両面のガラスエポキシ基板を使用した<sup>\*1</sup>。この駆動回路では、矩形波の制御信号 (0–15V) を入力することで高電圧の ON/OFF が可能である。

#### C.1.5.2 回路図

回路図を Fig. C.3 に、基板レイアウトを Fig. C.4 に示す。Fig. C.4 において、Fig. C.4(a) は基板の表面、Fig. C.4(b) は基板の裏面である。また、使用した部品について Table C.2 に示す。この駆動回路において、ドライバには前項同様ハーフブリッジ用ドライバである IR2110 を用いた。出力先には容量成分である超音波振動子を取り付けられる。

Table C.2 Electric components in half-bridge switching circuit

Symbol	Category	Model
Q1, Q2	FET	Advanced Power Technology ARF448B
U1	FET driver	International Rectifier IR2110
C1–C3, C5	Bypass capacitor	Nippon Chemi-con KTD251B104M32A0T00
C4	Bootstrap capacitor	Nichicon UBX2D100MPL
D2, D3	Gate diode	Toshiba Semiconductor 1S1588

\*1 レイヤ間の接続にはサンハヤトのスルピンキット (BBR5208) を使用した。



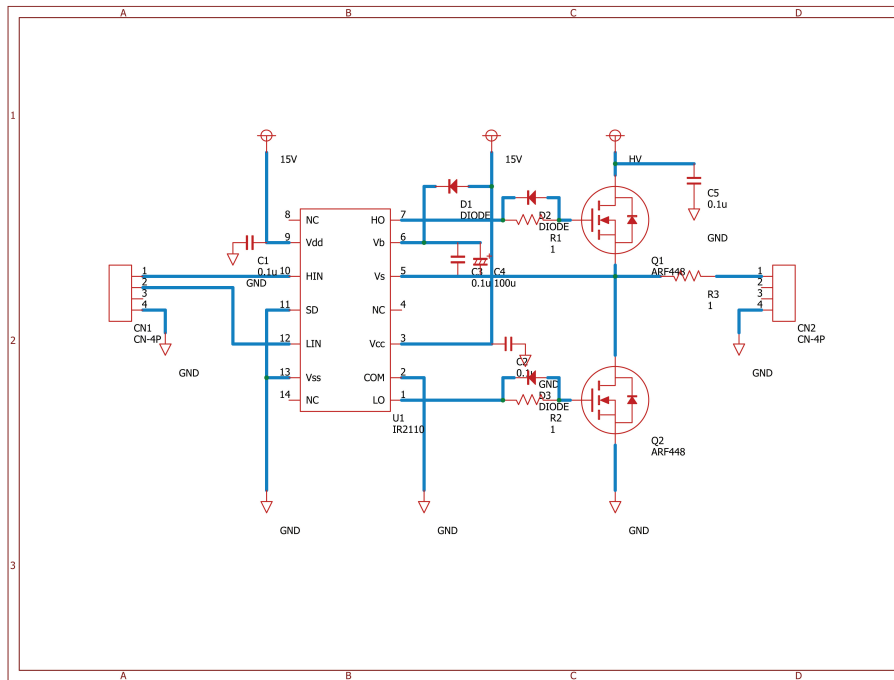


Fig. C.3 Circuit diagram of half-bridge switching using IR2110

### C.1.5.3 ゲート抵抗と立ち上がり時間の関係及び立ち下がり時間の改善 [152]

FET の駆動回路ではドライバ-FET ゲート端子間には電流制限用の抵抗を接続している。この抵抗をゲート抵抗と呼び、ゲート抵抗の大きさはスイッチングの立ち上がり時間に影響する。ゲート抵抗が大きいと立ち上がりは遅くなり、逆に小さいと立ち上がりは速くなるが、小さくしすぎると寄生発振が生じる。ゲート抵抗の最適値は FET 毎に、回路の用途毎に異なるため、実験的に求める必要がある。

また、通常 FET、特にパワー MOSFET は立ち上がり時間より立ち下がり時間のほうが長い傾向がある。本回路で使用した ARF448 では、Table 3.2 より、 $t_r$  が 10ns であるのに対し、 $t_f$  は 25ns と記載されている。このような場合、ゲート抵抗と並列にダイオードを接続することで、立ち下がり時間を改善することができる。

また、本回路と直接の関係はないが、FET をトランジスタで駆動するような場合においてトランジスタのスイッチング速度が FET のスイッチング速度に影響を及ぼすことがある。このような場合、トランジスタのベース抵抗に並列にコンデンサを追加することで、トランジスタのスイッチング速度を高速化することができる。



## C.1.6 フルブリッジ回路

### C.1.6.1 概要

更なる改良を行い、ハーフブリッジ用ドライバである IR2110 を 2 つ用いることで、FET を 4 つ用いたフルブリッジ回路を製作した。高電圧の印加を考慮し<sup>\*2</sup>、回路製作には両面のガラスエポキシ基板を使用した。この駆動回路では、矩形波の制御信号 (0–5V) を入力することで高電圧の ON/OFF が可能である。

### C.1.6.2 回路図

フルブリッジ回路の回路図を Fig. C.5 に示す。Fig. C.5 において、Fig. C.5(a) は駆動回路、Fig. C.5(b) は信号生成回路である。また、基板レイアウトを Fig. C.6 に示す。Fig. C.6 において、Fig. C.6(a) は基板の表面、Fig. C.6(b) は基板の裏面である。また、使用した部品について Table C.3 に示す。この駆動回路において、ドライバには前項同様ハーフブリッジ用ドライバである IR2110 を用いた。信号生成には NOT 回路のロジック IC である 7406 を用いた。また、IR2110 の SD 端子を用い、出力の ON/OFF スイッチとして機能させた。出力先には容量成分である超音波振動子を取り付けられる。

### C.1.6.3 デッドタイムの生成

FET をブリッジ構成とする場合、ブリッジの FET が同時に ON になると短絡してしまう。この短絡をアーム短絡といい、FET に大電流が流れて故障する。このため、短絡しないように気を付ける必要があり、通常 FET が同時に OFF になるような時間を設ける。これをデッドタイムといい、本回路ではダイオード・抵抗・コンデンサを用いて実現している<sup>\*3</sup>。抵抗とコンデンサによる RC ローパスフィルタにダイオードを組み合わせることで、立ち上がり遅れをカットすることができる<sup>\*4</sup>。この出力を NOT 回路に入力することで、遅延時間を生成することができる。遅延時間  $t_{dt}$  は以下の式より求められる。

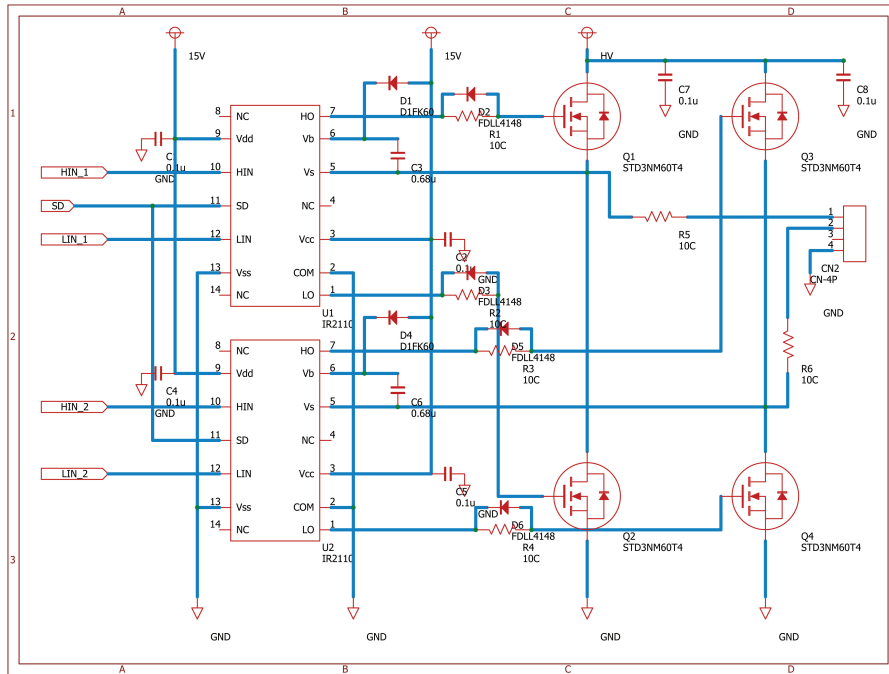
$$t_{dt} = 0.8CR \quad (\text{C.4})$$

$$t_{dt} = 0.69CR \quad (\text{C.5})$$

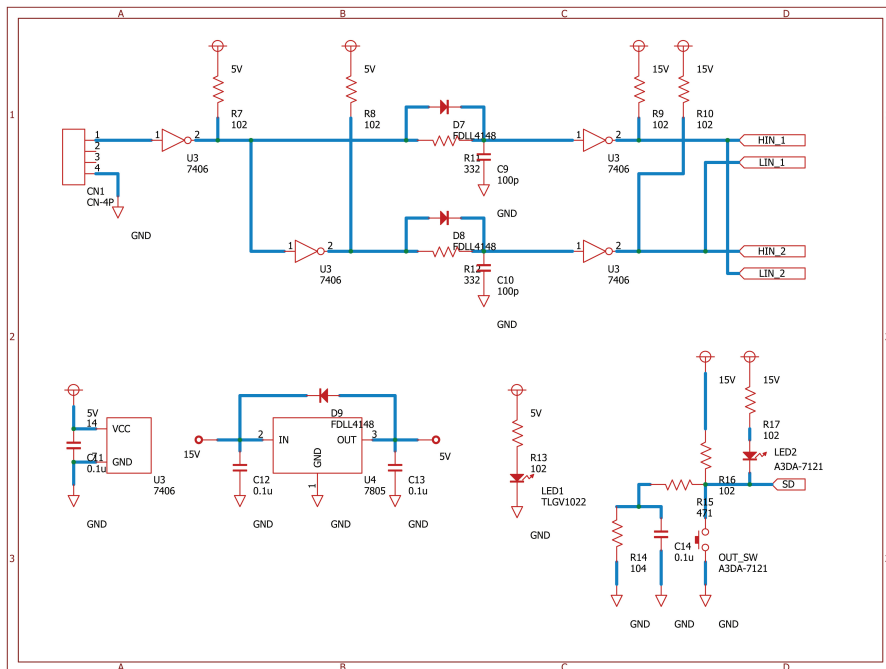
<sup>\*2</sup> 基板表面には保護用にグリーンレジストを塗布した。

<sup>\*3</sup> ドライバ IC によってはデッドタイム生成回路を内蔵しているものもある。本回路では高速なスイッチングを行うため、デッドタイム生成回路を内蔵しない IR2110 を使用し、使用する周波数に合わせたデッドタイム生成回路の実装を行った。

<sup>\*4</sup> 通常ダイオードの向きは逆であり、立ち下がり遅れをカットし AND 回路に入力する回路であるが、NOT 回路を使用するためこのような構成としている。



(a) Full-bridge FET driving circuit



(b) Signal conditioning

Fig. C.5 Circuit diagram of full-bridge switching using IR2110



Table C.3 Electric components in full-bridge switching circuit

Symbol	Category	Model
Q1–Q4	FET	STMicroelectronics STD3NM60
U1, U2	FET driver	International Rectifier IR2110
U3	Hex inverter	Texas Instruments SN74LS06DG4
U4	Regulator	STMicroelectronics L7805CDT-TR
C1, C2, C4, C5, C11–C14	Bypass capacitor	Murata GRM188R71H104KA93D
C3, C6	Bootstrap capacitor	Nippon Chemi-con KTS500B684M31N0T00
C7, C8	Bypass capacitor	Murata GRM43DR72J104KW01L
C9, C10	Deadtime capacitor	Murata GRM1885C1H101FA01D
D1, D4	Bootstrap diode	Shindengen D1FK60
D2, D3, D5–D9	Gate diode	Fairchild Semiconductor FDLL4148
R1–R6	Register	Panasonic ERJL1WKF10CU
R7–R10, R13, R16, R17	Register	Panasonic ERJ6GEYJ102V
R11, R12	Deadtime register	Panasonic ERA6YED332V
R14	Register	Panasonic ERJ6GEYJ104V
R15	Register	Panasonic ERJ6GEYJ471V
LED1	LED	Toshiba TLGV1022
LED2, OUT_SW	LED with switch	Omron A3DA-7121

#### C.1.6.4 チャタリング除去

出力スイッチには機械的なスイッチを使用しているが、このようなスイッチを切り替えた際に微細な機械的振動が生じて電気信号が断続を繰り返す。これをチャタリングといい、現象自体は短時間で消失するが、電子回路の誤作動を引き起こす。チャタリング防止策として、フィルタ回路の他フォトインタラプタ等の無接点スイッチを用いることもある。本回路では RC フィルタを用いることでチャタリングの防止を行っている。

#### C.1.6.5 回路の問題点

入力信号をベースにハイサイド駆動用信号とローサイド駆動用反転信号をデッドタイム付きで生成することができるが、反転信号の生成にインバータ回路を使用している。このため生成される反転波形は 10ns ほど遅れが生じ、デッドタイム生成回路によって立ち上がりカット

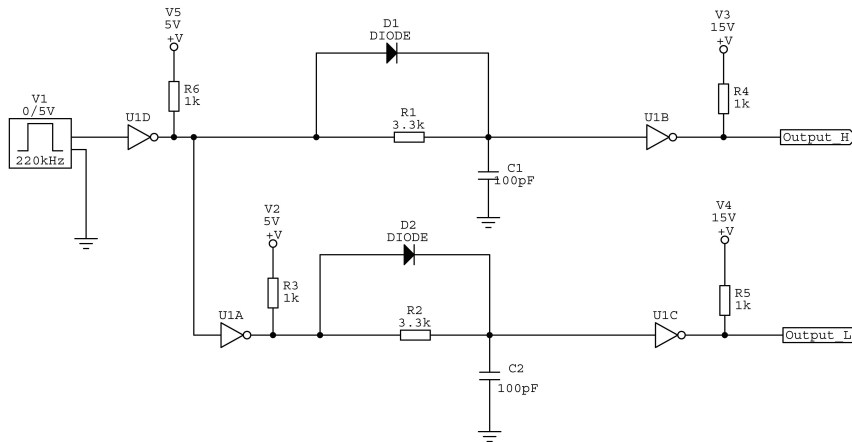


Fig. C.7 Experimental circuit diagram of dead-time generation

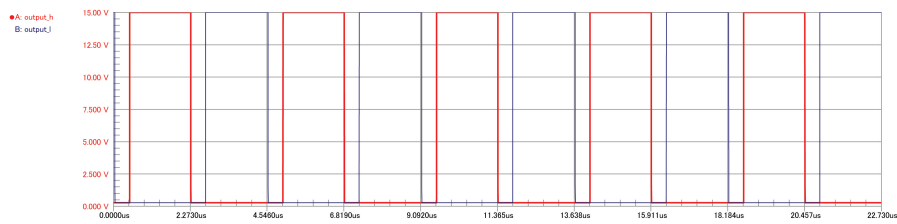


Fig. C.8 Pulse-wave and reversed pulse-wave with dead-time

されるため、FETの駆動波形は立ち上がりが立ち下がりに比べてわずかながら遅くなる。これを解決するためには反転信号の生成時の遅れをキャンセルする必要がある。

## C.2 パルスアンプ

### C.2.1 概要

パルス波による弾性表面波励振を用いた皮膚感覚ディスプレイのデモンストレーションを行う上で必要な回路を統合したものである。これにより構成全体のコストや展示会等への輸送がより簡易となる。

### C.2.2 構成

本項では装置の構成について説明する。装置内部の写真を以下に示す。

これまでは増幅された駆動信号を弾性表面波振動子に入力する上でBNCケーブルを使用し

ていたが，本アンプより出力される駆動信号は正の電圧と GNSD とを交互に生成する．すなわち，GND 側を定めることができず，BNC ケーブルを使用することはできない．トランス等を出力に使用することで GND を定めることは可能であるが，出力波形（立ち上がり及び立ち下がり）が鈍化するため使用することはできない．このため，本アンプでは使用するケーブルを 3 芯の高耐圧ケーブルとし，専用のコネクタを使用した．

### C.2.2.1 矩形波発振回路

簡単な矩形波発振回路として，Fig. C.9 に示すようなシュミットトリガ（7414）を用いた回路がある．図中の  $C$  及び  $R$  の値によってある周波数  $f$  の発振した波形を取り出すことができる． $R$  を変化させることで，ある程度の周波数調整が可能である．この回路だけでは出力波形は矩形波にはならないため，使用する上では出力にバッファを通した Fig. C.10 の回路が用いられる．周波数  $f$  は以下の式によって求められる．

$$f = \frac{1}{CR} \quad (\text{C.6})$$

しかしながら，この回路では周波数の変更を行うと矩形波のデューティ比が変化するため，デューティ比を 50% に固定かつ周波数の調整を行うような回路を製作することができない．そこで，本回路では矩形波の発振に LTC6900 という IC を使用した．回路図を Fig. C.11 に示す．この IC は単一の外部抵抗及びレンジ設定を変更することで 1kHz から 20MHz までのデューティ比 50% の矩形波を出力することができる．この IC を使用して 250kHz 付近の周波数を出力することで振動子駆動用のパルス波とする．駆動用パルス波とマイコンから出力される皮膚感覚ディスプレイ制御用信号とを AND ロジック（7408）を通すことで，バーストされたパルス波とする．このバースト波形が最終的な駆動信号として FET ブリッジ回路へ入力される．

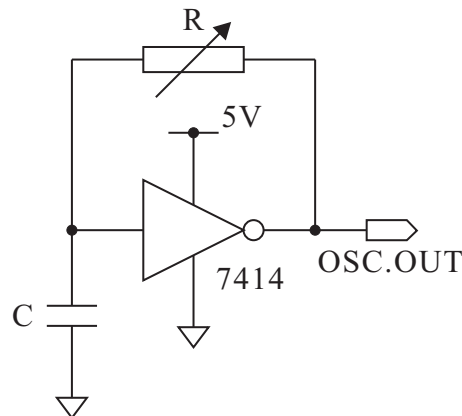


Fig. C.9 Oscillator using 7414 logic IC



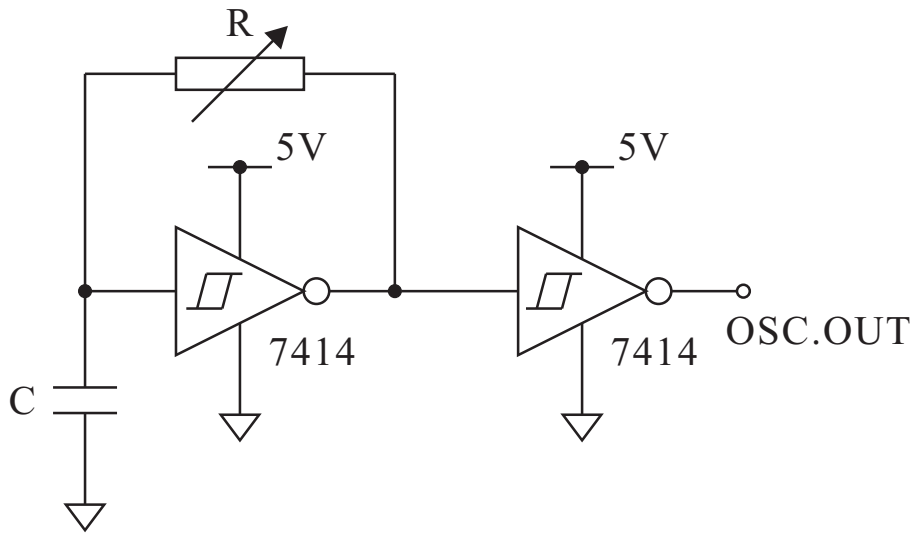


Fig. C.10 Oscillator using 7414 logic IC

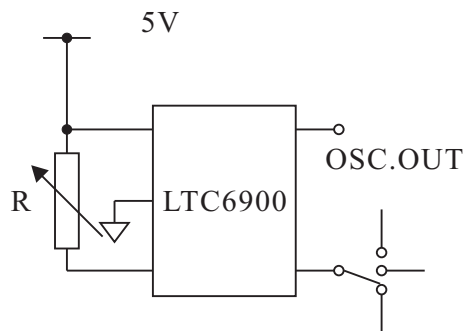


Fig. C.11 Oscillator using LTC6900

#### C.2.2.2 整流・平滑回路

振動子駆動用の電源として高電圧源が必要である．負荷である振動子は容量成分であるため，AC電源をそのまま整流・平滑することでDC141Vとして使用することができる．整流・平滑回路を Fig. C.12 に示す．本回路では短絡時の保護としてトランスを用いて絶縁を行い，またトランス 2 次側にはヒューズを用いている．トランスには 1 次側が 115V，2 次側に 55V が 2 回路のものを使用しており，2 次側を直列にすることで 110V，並列もしくは単独使用で 55V の出力を得ることができる．また，トランスを 1 次側が 115V，2 次側に 25V が 2 回路のものをを用いることで電源電圧が AC220V の国で使用することも可能である．トランスの出力電圧をブリッジダイオードを用いて全波整流し，大容量のコンデンサを用いることで平滑している．

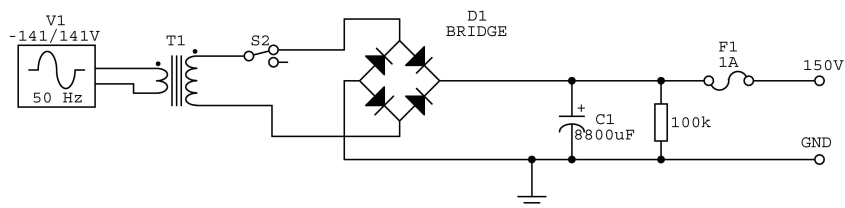


Fig. C.12 Circuit diagram for rectification and smoothing

### C.2.3 将来の展望

本パルスアンプを用いることで、従来必要としていた高周波発振器及び高周波増幅器が不要となる。またマイコン等の振動子駆動に必要な機器を統合しているため、皮膚感覚ディスプレイのデモンストレーションに必要な装置を大幅に削減し、装置の可搬性を大幅に向上することができる。しかしながら、FETによってスイッチング増幅された駆動信号を専用のケーブルを通して振動子に入力するため、ケーブルの取り回しによってはノイズを撒き散らし機器の動作に影響を及ぼす。本来 FET の出力線はなるべく短くする必要があるため、これを満たすためには振動子側に FET 及び駆動回路を統合し、信号波形のみをケーブルを通すのが望ましいと考えられる。

## 付録 D

### 力覚提示デバイスの視覚障害者補助デバイスへの応用

付録 D では，本文において抜粋した力覚提示デバイスの視覚障害者補助デバイスへの応用について付記する．

#### D.1 安価な力覚提示デバイスの利用

力覚とは，触覚のうち弾力や抵抗力を認識する感覚である．力覚を提示するデバイスはこれまで様々な研究がなされており，またモータのトルク等を用いることで提示することが可能である．このことから，触覚デバイスの中では完成度が高く製品化が実現されたものもいくつかある．しかしながら，依然として一般的なデバイスではなく，多くの研究用途を主とするデバイスは高価であった．

本研究では Novint Technologies 社の Falcon[134] を用いる．Falcon はゲーム用に販売されている安価な力覚提示デバイスである．Falcon の仕様 (抜粋) を Table D.1 に示す．アームに接続された球形のグリップ部を操作することで，デバイス使用者に力覚を提示することが可能である．グリップは 3 次元での動作が可能であり，最大で 8.8N の力を提示することができる．この Falcon を用いることで，より安価かつ一般的な環境下でのコンピュータ操作補助を行う．

Table D.1 Specification of Novint falcon[134]

3D touch workspace	4"×4"×4"
Force capabilities	8.8 [N]
Comunication interface	USB

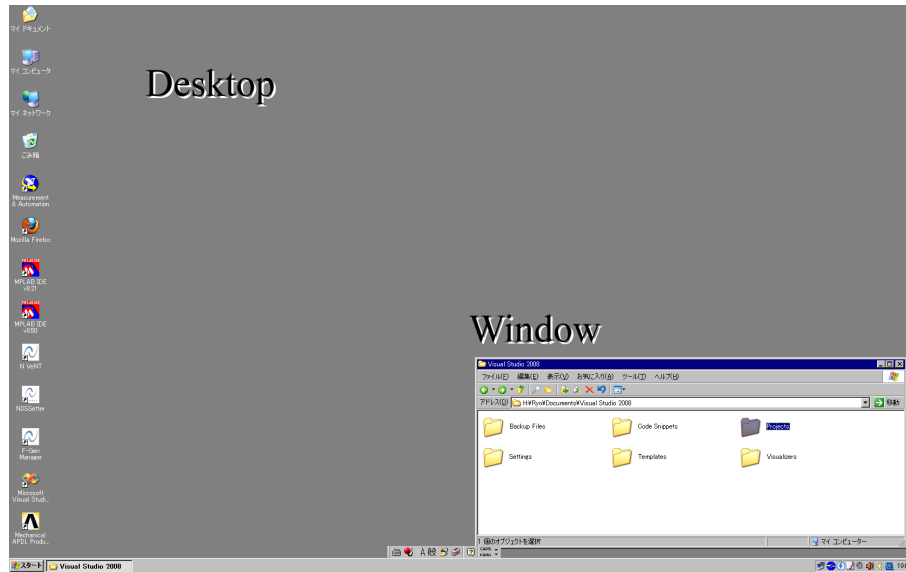


Fig. D.1 Computer desktop

## D.2 仮想空間におけるコンピュータ操作

一般的なコンピュータにおける GUI 環境を Fig. D.1 に示す．デスクトップと呼ばれる最下層の画面上にアプリケーションやデータ等のアイコンが配置され，このデスクトップに重なるように各種アプリケーションのウィンドウが配置される．カーソルによりアイコンやデータの選択，ウィンドウの移動を行う．カーソルの操作にはマウス等のポインティングデバイスが用いられる．

本研究では一般的な GUI 環境下におけるコンピュータ操作補助を想定し，力覚提示デバイス Falcon を用いたカーソル操作と力覚提示を行う．力覚提示を効果的に行うソフトウェアを製作した．製作したソフトウェアを用いて Falcon により操作する仮想空間を Fig. D.2 に示す．ソフトウェアは Microsoft Visual Studio 2008 により製作し，仮想空間は DirectX 9.0C を使用して描画した．この仮想空間はデスクトップ全体を擬似的に 3 次元の仮想空間としたもので，奥行きはウィンドウの重なりを再現するのに用いている．この仮想空間を表示するウィンドウは実際の操作中には表示されない．仮想空間内において，デスクトップ上に重なって表示されるウィンドウはそれぞれ直方体に変換され，配置される．仮想空間内の球形のカーソルは Falcon のグリップ位置に同期し，これは実際のデスクトップ上のカーソル位置となる．仮想空間内のカーソルが直方体の壁面に重なると反力が提示され，ウィンドウ位置・形状（大きさ）の認識が可能である．また，ウィンドウ内部（仮想空間の直方体手前）にカーソルが重なるとウィンドウの情報の提示が可能である．

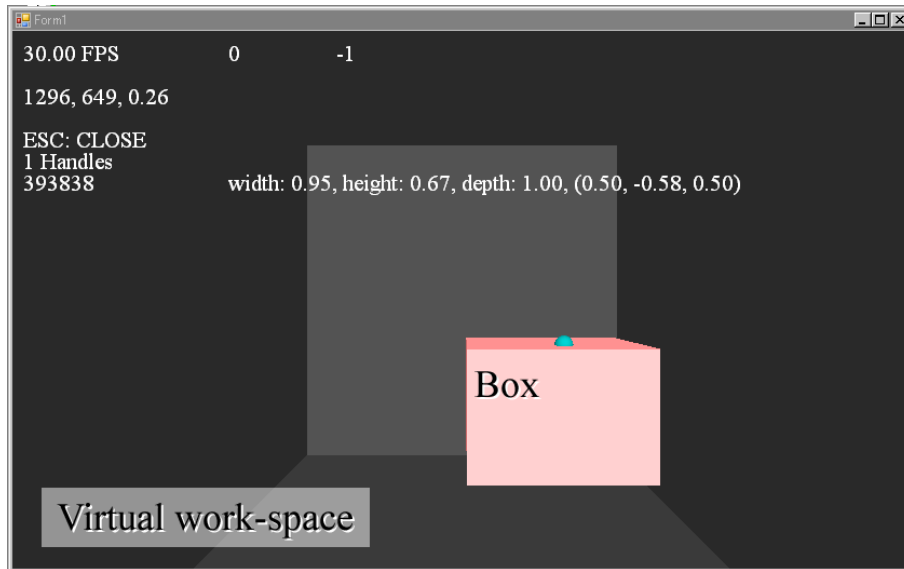


Fig. D.2 VR workspace operated by Falcon

### D.3 力覚提示によるウィンドウ弁別実験

ウィンドウの配置されたデスクトップ画面上において、製作したソフトウェアを用いて Falcon によるカーソル操作を行った。カーソル位置に応じて力覚提示を行うことで、視覚によらずウィンドウの存在を直方体として認識可能かどうか実験を行った<sup>\*1</sup>。実験の様子を Fig. D.3 に示す。被験者は晴眼者 12 名（20 代男性 11 名，女性 1 名）とし，後天的な視覚障害者への利用を想定して予めアイマスクを装着してもらった。実験の結果，Falcon を用いたカーソル操作によって，力覚提示により視覚によらずウィンドウの位置の存在の認識が可能であった。また，力覚提示によりウィンドウの形状の認識についても可能であった。このことから，一般的な GUI 環境のコンピュータ操作において，市販の安価な力覚提示デバイスを併用することで後天的な視覚障害者に対して有用なコンピュータ操作補助が可能であると考えられる。しかしながら，実際には画面上に存在しない奥行きの設定や，Falcon の動作範囲に対して違和感を感じた被験者も多かった。このことから，今後の改善が必要であると考えられる。

<sup>\*1</sup> 本実験実施時には埼玉大学の倫理規則が施行されておらず，倫理委員会は設置されていなかったが，本実験において特に個人情報記録しておらず，得られた情報は匿名化されていたことを付記する。

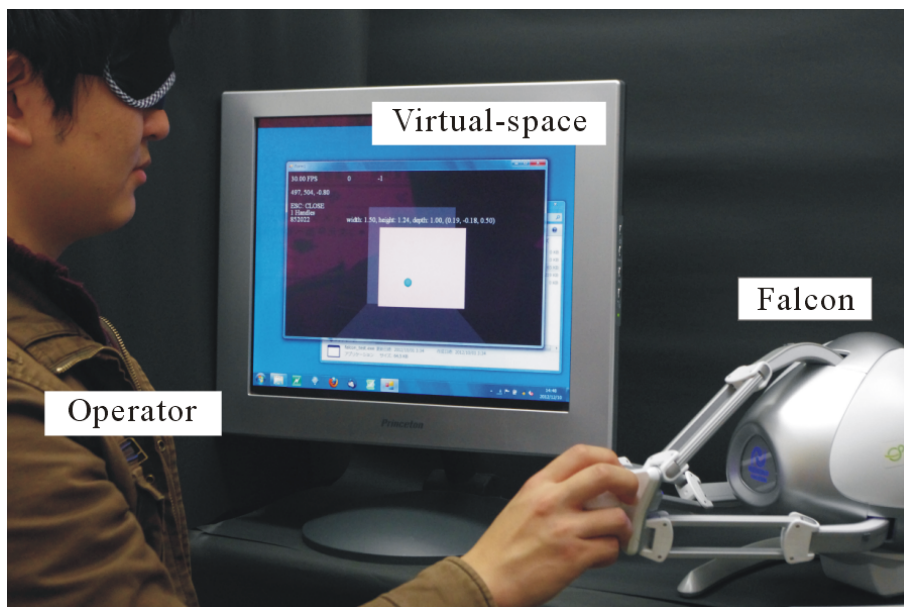


Fig. D.3 Discrimination experiment to a subject