

2010年度 修士学位論文

触覚重畳による道具操作支援

2010年8月5日

大阪大学 大学院基礎工学研究科
吉元 俊輔

本論文は大阪大学大学院基礎工学研究科に
修士(工学)授与の要件として提出した修士学位論文である。

主査： 大城 理
副査： 野村 泰伸

概要

人は感覚情報に基づき正確な運動制御を行う。近年注目される Augmented Reality: AR 技術を用いた道具操作支援では、触覚情報の不在や視覚に基づいた直感的な物性認識や空間定位が難しいことが課題である。従って仮想的な物体と道具の接触によって生じる力の触覚表現により、道具の重要部位への侵入回避や道具の空間誘導が可能なシステムの開発が求められる。力ベクトルの直感的な知覚をもたらすためには道具把持部へ仮想的な触覚分布を重畳する必要があるが、従来の触覚提示技術では指腹と道具の間に刺激装置を介在させるほかに方法がなかった。本研究では、示指と拇指で把持する道具操作を想定し、指腹と道具間に刺激装置が介在することなく指腹部に触覚分布を重畳させることができる空間透明型触覚ディスプレイを開発し、仮想的な力ベクトルを表現することを目指した。さらに道具操作支援への利用として、道具の危険領域への侵入を防ぐための触覚 AR ナビゲーションシステムの構築を行った。空間透明型触覚ディスプレイを実現する方法として、経皮的電気刺激による感覚の移動に着目し、指中節側面への電気刺激によって末節の指腹部に触覚を生じることで刺激部位と知覚部位を分離させる方法を提案した。特に神経の解剖学的構造に基づいて、安定して感覚の移動を生じる方法を考案した。また、道具に加わる仮想的な力ベクトルを示指および拇指のそれぞれの触覚分布によって表現した。空間透明型電気触覚ディスプレイにより触覚分布を生成するために2点の電極による同時刺激において、両者の刺激のパルス頻度の比率を調整することで生じる触覚の部位を制御した。

まず、感覚の移動の発生および2点同時刺激による触覚分布生成法について、被験者実験により刺激部位と知覚部位の関係を調べることで検証した。実験の結果、指の中節側面に電気刺激を与えることで触覚像を指末節に生じ、刺激電流量に応じて感覚の移動量が異なることが分かった。特に刺激位置に対する知覚領域の中心点の位置は、刺激提示部位と有意に異なることが示された。また、指への触覚分布の生成法について、短軸方向の知覚された位置を確認した結果、各指における短軸方向の触覚提示部位の選択が可能であることが分かった。その結果、示指と拇指の相対位置関係を考慮したベクトル表現により道具操作における3次元の空間誘導が可能となった。次に、道具操作支援システムの構築のために、位置計測・力ベクトル計算・触覚提示から成る触覚 AR ナビゲーションの実装を行った。光学式の位置計測と、ボクセルベースの力覚計算による仮想物体の侵入回避方向の力ベクトル計算を行い、開発した空間透明型電気触覚ディスプレイによって触覚として提示することで、物体との接触に応じた力ベクトルの触覚表現を可能にした。特に道具の侵入量に応じた反力計算と触覚提示が可能であることが確認できた。さらに、システムの有効性を評価するために、道具の誘導と仮想物体の知覚に関する被験者実験を行った。実験では力場に基づいた力ベクトルを提示した際の道具の軌跡を記録し、知覚方向の評価を行ったところ、40%の正答率で誤差10 mmの位置に道具の誘導が可能であることが示された。さらに、なぞり操作における仮想的な障害物の回避において、3 mm以下の侵入で目的の操作を達成可能であることが示唆された。

キーワード

拡張現実感, 触覚重畳, 道具操作, 誘導システム, 電気触覚ディスプレイ, 空間透明.

Abstract

Human being controls body movement precisely according to sensory information. Augmented Reality: AR technology has received attentions as a supporting tool. However, the lack of tactile information hardens the intuitive spatial recognition and decreases the accuracy of manipulations. Therefore, development of the navigation system which can avoid invading important area or guide tool by presenting tactile sensation according to the contact condition between virtual objects and the instrument is desired. Although tactile distribution at the fingertip is important for the intuitive perception of the force vector, previous tactile display cannot present it without mediating a stimulator. The purpose of this study was to develop the spatially transparent tactile display which enables to superpose tactile distribution at the fingertip without setting up a stimulator on the fingertip in order to represent the force vector in case of holding the instrument with index finger and thumb. The author also aimed at developing the tactile AR navigation system as an application of the force representation by spatially transparent tactile display. The author proposed a method to separate the stimulating and perceived areas by sensory shift caused by electrically stimulating digital afferent nerves under the side of the finger media. Especially, stabilization of the sensory shift was proposed based on anatomical structure of the afferent nerves. The author also proposed the force vector representation by using tactile distribution of the index finger and the thumb. To present tactile distribution, perceived position was selected along with colonial direction of the finger based on two point simultaneous stimulation with different pulse rates.

The proposed methods were evaluated by several subjective experiments in which the relationship between the stimulus and the perceived area was examined. The result showed that stimulating digital afferent nerves under the side of the finger media enabled a user to perceive the tactile sensation at their fingertip. The perceived position is significantly different from the stimulated position. Furthermore, the result also showed that the tactile distribution was selected in direction of the short axis of the finger based on the model of phantom sensation. The tactile display enabled to present 3 dimensional force vector to navigate the instrument by considering the relative position of index finger and thumb. Then, the author implemented the tactile AR navigation system which consists of the camera, the computer, and the proposed tactile display. The position of the instrument was measured optically, and the force which makes difficult to invade a virtual object was calculated by using voxel-based haptic rendering algorithm. Furthermore, the proposed spatially transparent electrotactile display fed back the tactile sensation by letting a user perceive virtual touch sensation with grasping a tool. In order to evaluate the system, the navigation and virtual object perception were tested. The trajectory of the tool was recorded when virtual force vector was presented based on the force field. The result showed that the system could navigate a tool to the precise position with less than 100 mm error and 40 % success rate. Furthermore, avoidance of virtual obstacles was tested during tracking a line with the tip of the tool. The result indicated that users avoided the obstacles with less than 3 mm invasion of the obstacles.

Keywords

Augmented Reality, Tactile augmentation, Instrument manipulation, Navigation system, Electrotactile display, Spatially transparent.

目次

第1章 序論	1
第2章 道具操作と感覚機能	4
2.1 道具操作と運動制御	4
2.2 触覚受容機構	7
第3章 ARナビゲーションと触覚提示	11
3.1 ARによる道具操作支援	11
3.2 道具操作支援に必要な触覚ディスプレイ	14
第4章 空間透明型電気触覚ディスプレイ	16
4.1 電気刺激による触覚生成	16
4.2 感覚の移動の安定化手法	19
4.3 空間透明型触覚ディスプレイの設計	22
4.4 空間透明性の評価	24
第5章 電気触覚による力ベクトル表現	28
5.1 触覚分布表現	28
5.2 道具の把持による力ベクトルの合成	30
5.3 触覚による力ベクトル提示システムの設計	33
5.4 力ベクトル表現の評価	36
第6章 触覚ARナビゲーション	39
6.1 システム構成	39
6.2 システム実装	45
6.3 評価実験	50
第7章 結論	67
謝辞	68
業績	69
参考文献	71

目 次

1.1	Concept	2
2.1	Examples of familiar instruments	4
2.2	Control system	5
2.3	Surgical tool	6
2.4	Fossil preparation	6
2.5	Tactile nerve system	7
2.6	Mechanoreceptors	9
2.7	Tactile signal during manipulating tasks	10
3.1	Augmented Reality	11
3.2	Tactile navigation system	12
3.3	Tactile AR navigation system	13
3.4	Previous tactile displays	14
4.1	Nerve equivalent circuit	16
4.2	Receptor selective stimuli	17
4.3	Input action potential	18
4.4	Stimulus points and perceived area	19
4.5	Nerves of the finger	20
4.6	Stimulus and sensory shift	21
4.7	Stimulus and sensory shift	21
4.8	Electrotactile display system	22
4.9	Developed electrodes array	23
4.10	Finger segments	24
4.11	Examples of the answer sheet	25
4.12	Stimuli and perception	26
5.1	Tactile vector	28
5.2	Phantom Sensation	29
5.3	Synthesized tactile vector	31
5.4	Relative position of the index finger and thumb	31
5.5	Constrained condition	32
5.6	Electrotactile display system for presenting tactile vector	33
5.7	Developed electrodes	34

5.8	Stimulus timing chart	34
5.9	Tactile map	36
5.10	Evaluate phantom sensation	37
5.11	Force vector area	38
6.1	Electrotactile AR navigation system	39
6.2	Voxmap-PointShell algorithm	41
6.3	Force vector calculation	42
6.4	Data structure and flow in tactile AR navigation system	44
6.5	Result of registration	45
6.6	Result of generation of Voxmap	46
6.7	Result of generation of PointShell	46
6.8	Result of Voxmpa-PointShell	47
6.9	Spatial transparent electrotactile display	47
6.10	Mesured waveform	48
6.11	The implementation of tactile AR system	48
6.12	The holding position of the tool	50
6.13	Visual effect of force vector	52
6.14	Result of non-interactive navigation	52
6.15	Result of force vector perception	53
6.16	Result of interactive navigation	54
6.17	Navigated trajectory	55
6.18	Time response of the visually navigated trajectory	56
6.19	Time response of the tactually navigated trajectory	57
6.20	Spectrum of the hand velocity	58
6.21	Deference between visual and tactile spectrum	59
6.22	Tracing experiment	62
6.23	Obstacle patterns	63
6.24	Analysis of tracing	63
6.25	Result of tracing	65

表 目 次

2.1 Instrument and control	5
4.1 Specifications of the electrodes	23
4.2 Experimental environment in evaluation of sensory shift	23
4.3 Stimulus position	24
4.4 Quantitative evaluation	25
6.1 The specification of the computer	45
6.2 The specification of the electrotactile display	48
6.3 Candidate of the destination	51
6.4 Destination of the tool	52
6.5 Time of completing	54
6.6 Parameter settings	62
6.7 Minimum size of the obstacle	63

第1章 序論

文房具や工具・調理器具など、我々の日常には様々な道具があふれており、高精度かつ効率的な道具操作は生活の質を向上させる。最適な運動制御を実現し、高度な道具操作を可能にするためにはヒトの五感、つまり感覚機能が重要である。五感のうち体性感覚は外界から身体に働く力を直接的に知り得る唯一の機能である。体性感覚には筋肉や腱の緊張に由来する“力覚”と皮膚変位に由来する“触覚”があるが、精細な作業を行う場合には指先の触覚が大きく影響する。もし触覚がなければ本のページをめくるという作業にも相当な労力が伴うであろう。つまり、知覚した触覚によって物体の操作結果に優劣が生じる。道具の操作においても触覚が重要であり、道具を介した物体との接触によって、私たちはまるで道具が体の一部であるかのように接触状態を理解することができる。特に、指で把持する道具と対象物の接触により生じる把持部の触覚分布は空間定位、形状認識および弾性や粘性といった物性の知覚をもたらす。道具の位置や加える力に反映される。道具と物体の間に働く力の知覚においては、視覚によって得られる情報が推測に留まるのに対し、触覚によって得られる情報は実際に生じている力そのものである。従って触覚が繊細な道具操作に重要であり、直接的に運動に関わっていることは明らかである。

対象物の物性や扱う道具によっては明確な触覚が得られないために操作に困難を要する場合もある。外科手術における剪刀の操作を例にとると、鋭利な刃先が深部や周囲の臓器等を損傷する恐れがあるため力の加減や術具の位置決め極めて正確な操作を要する。仮に接触対象に応じた触覚の変化が明確であれば、重要部位の損傷を防ぐと共に高い精度の操作も容易になると考えられる [1]。一方で、化石の研磨における手持ち式の切削道具の操作を例にとると、対象物の硬さが化石と不要物の境界面を触覚によって知覚することを困難にし、目視によって切削量を確認しながら研磨を進めるために時間を要する。もし境界面に触れた際の触覚が明確であれば、容易に研磨を行うことが可能であると考えられる [2]。両者の例に共通して、特定の領域の境界面を知覚させる、或いは重要部位への侵入を防ぐための空間的な誘導を可能にすることが求められる。近年では外科手術を中心としてコンピュータ技術を用いた道具の操作支援が注目されている [3]-[6]。

拡張現実感 (Augmented Reality: AR) はコンピュータを用いて生成した仮想環境を現実環境に重ね合わせて提示することで、活動を支援する技術である [7], [8]。AR を用いた道具操作支援に関しては、実際に得られる視覚や聴覚情報に仮想的な情報を補うことで道具の誘導や目的場所の通知などが主として行われてきた [9]-[11]。可視化と位置合わせの技術の向上により、画像による道具の誘導はより効果的になりつつあるが道具操作自体の直接的な支援とはならない [12], [13]。視覚や聴覚から道具と対象物の接触状態を知るためには定義された情報の意味を“解釈”しなければならず、直接的な理解を与える力覚や触覚情報には劣る。より直接的な理解を与える AR システムとして、Nojima らは力覚提示による外科手術の操作支援を提案した [14]。また、Vogl らは力覚フィードバックにより原子操作の補助を行うシステムを提案している [15], [16]。しかし力覚提示を利用した AR システムでは、実際に力を発生するために情報提示のみならず操作者の意図に関わらず運動生成まで引き起こす。また、支点を要するという構造上の制約が作業空間と操作の自由度を制限するという問題がある。一方、触覚提示を利用した道具操作支援システムとして Robineau

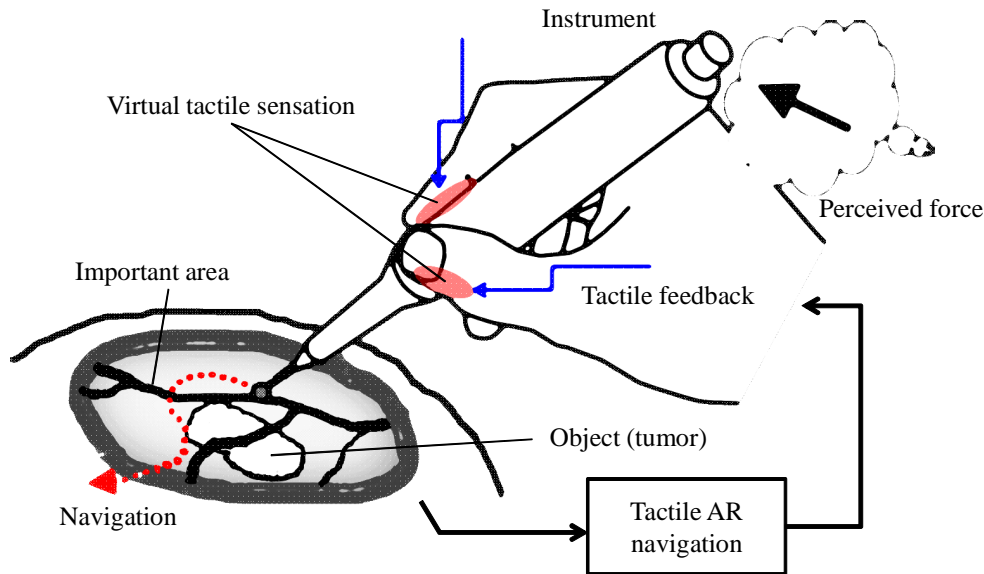


Fig. 1.1: Concept: This study is targeting the spatial navigation of the handheld surgical tools for the situation avoiding the collision between the tip of the tools and the pre-determined unsafe area.

らの舌部への電気刺激提示 [17] や King らの把持部への圧力提示 [18], Brell らの指の甲側への振動提示 [19] がある。いずれの触覚 AR ナビゲーションにおいても体表の特定の部位に刺激装置を接触することで触覚分布を生成し、道具と物体の接触の表現や誘導のためのベクトルを表現している。より直接的な理解を得るためには実際の現象さながらに道具の把持部の触覚分布を生成することが望ましいが、刺激装置を道具と把持部との間に介在させなければならず、実際の道具操作を妨げるという問題がある [20], [21]。従って、道具の直接的な操作を可能にするためには、把持部に刺激装置の介在なしに仮想的な触覚のみを重畳させ、かつ触覚の空間分布を生成可能であることが求められる。さらに触覚提示装置は小型であればある程、望ましい。

本研究では、機械工作や外科手術・考古学・伝統工芸などにおける道具の操作支援に応用可能な、触覚提示装置および触覚 AR ナビゲーションシステムの開発を目的とする。特に示指と拇指により道具を把持し操作を行う道具を対象とし、把持部である指腹部に刺激装置の介在なしに触覚分布を生成することで仮想的な力ベクトルを表現し、現実では知覚し得ない境界面の提示および道具の誘導を行うことを目的とする。本研究の概念図を Fig. 1.1 に示す。

本論文では触覚の知覚部位に刺激装置を介在させることなく触覚を生成することを“空間透明な触覚提示”と定義する。VR や福祉の分野で利用されている経皮的抹消神経電気刺激により生成される触覚を電気触覚と呼ぶが、電気触覚では刺激提示部位と触覚の知覚部位の不一致が生じる(感覚の移動)現象が報告されており [22], 感覚の移動を安定して生じさせることができれば空間透明型の触覚ディスプレイとして応用可能であると考えられる。まず、電気刺激が神経を直接刺激することから、神経の解剖学的構造および刺激波形に基づいた感覚の移動の安定化手法を提案する。また、空間透明型触覚ディスプレイによって指腹部の触覚分布を生じる方法として、2点電極における同時刺激の刺激パルス頻度に応じて両者の中間位置に触覚を生じる錯覚現象 (Phantom Sensation: PhS) [23] を利用することで2点の電極のみで知覚部位の選択を行う方法を提案する。さらに、道具の把持を考慮した各指の位置関係と各指に提示可能な触覚分布を考慮することで、仮想物体と道具の接触によって生じる力ベクトルの触覚表現を目指す。提案する空間透明な触覚提示法を用いて触覚 AR ナビゲーションシステムを構築することで指腹部の触覚による仮想物体との接触

表現および道具の誘導を可能にする。

本論文では、まずヒトの運動制御という観点から道具の操作精度の向上に必要な要素について述べ、運動制御に重要な役割を果たす触覚について生理学的なメカニズムについて述べる(2章)。次に、従来の道具操作支援を目的としたARシステムについて触れ、直感的な空間誘導を可能にする情報の提示という観点から触覚ディスプレイの問題点を調査する(3章)。本論文で最も重要となるのが、空間透明型電気触覚ディスプレイである。従来の触覚ディスプレイの物理的制約を根本的に解決する手段として触覚神経の解剖学的構造を利用した感覚の移動の安定化を提案し、被験者実験に基づいて評価を行う(4章)。さらに、触覚による回避方向の表現として力ベクトルを把持部に与える触覚分布によって知覚させる方法を提案する。空間透明性を損なわずにベクトルを表現する方法としてPhSを利用した知覚部位の選択を可能にし、被験者実験および表現可能な領域の解析に基づいて力ベクトル表現の評価を行う(5章)。提案する空間透明型電気触覚ディスプレイの応用として、道具操作における仮想的な危険領域への侵入に応じた力ベクトル表現が可能な触覚ARナビゲーションについて述べ、システムの実装を行い、被験者実験によってシステムの評価を得る(6章)。最後に全体を総括する(7章)。

第2章 道具操作と感覚機能

文房具や工具・調理器具など、我々の日常には様々な道具があふれており、ヒトは感覚機能を巧みに利用しながら道具操作を行っている。本章ではいくつかの手持ち式の道具とその操作を例にとり、ヒトの運動制御という観点から道具の操作に必要な要素について考察する。

2.1 道具操作と運動制御

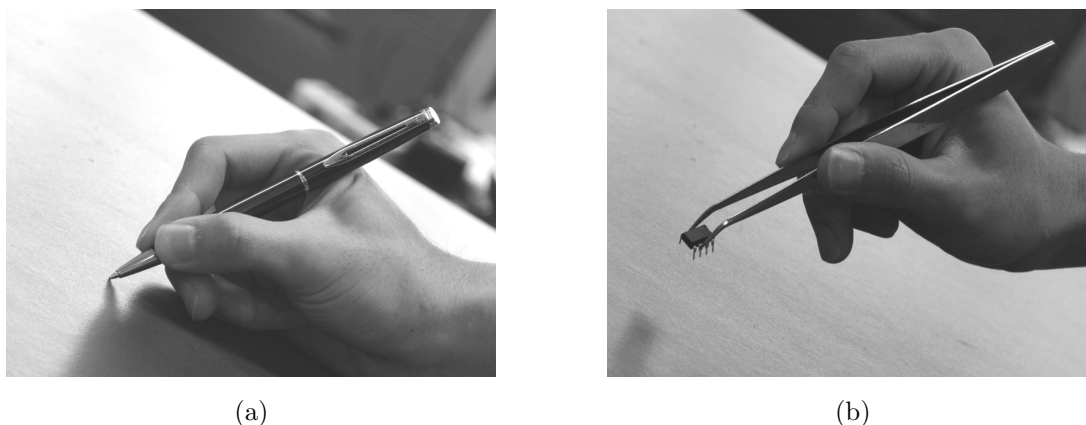


Fig. 2.1: Examples of familiar instruments: (a) Ballpoint pen (b) Tweezers.

身近な道具の例を Fig. 2.1 に示す。ボールペンは文字や図形を描くための道具である。一方で鑷子は先端で微細なものをより分け、はさむことで作業を行うための道具である。人がボールペンをを用いて文字を書くという作業を分析すると、大きく三つの行動に分けられる。まずペンが固定できる場所を指で把持し、対象物における文字を書くべき場所を注視する。次にペンの先端を対象物に接触させながら意図した文字の第一画目の描画を開始する。さらに描いた一画の断片から達成の度合いを確認しながら一画の描画を終える。鑷子で物を摘み上げるという行為では、対象物の位置を確認して先端で挟み、滑り状態を確認しながら一定の力で把持し、状態を持続しながら目的の場所まで手を動かすことで作業を達成する。両者の例から道具操作は、目標値を設定し、ある操作量に基づいて作業を行い、計測された制御量から操作量を調整するというフィードバック系の制御システムを成すと考えられる。見る・聞く・味わう・嗅ぐ・触れるという行為に対応した視覚・聴覚・味覚・嗅覚・体性感覚は状態の計測を可能にする。特に、視覚により対象を確認し目標値を定めることができる。また、体性感覚によって身体と物体との接触を感じ、操作量を決定することができる。さらに操作によって得られた制御量を対象に応じた感覚によって知覚することができる。例えば、ハンドドリルで物体に穴を開けるという作業において、制御量である穴の深さが変化すると肉目で確認できるドリルの長さや接触によって発生する音の高さが変化し、貫通と共に手に加わる力が変化する。つまり視覚・聴覚・体性感覚によって制御量を知覚することができる。

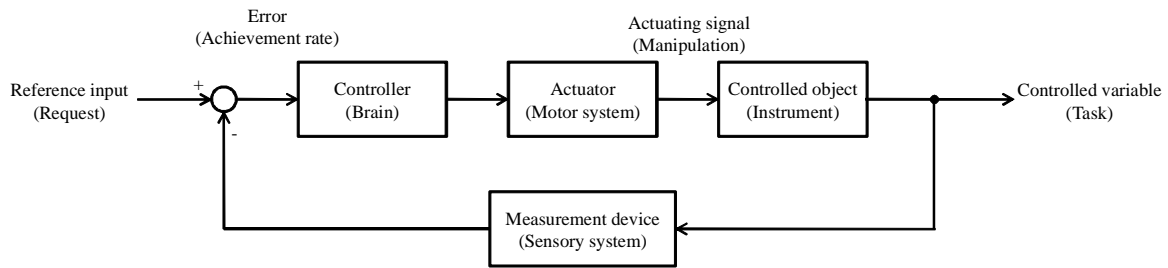


Fig. 2.2: Control system: The system outputs controlled value based on the error value.

Fig. 2.2 にフィードバック系の制御システム概念図を示す．制御システムにおいて，目標値は操作の結果を判断する基準であり，制御量の状態の計測値と目標値の差が偏差（正確度）として表現される．道具の操作においては，この偏差と制御量に関するシステムの応答速度と安定性が操作の優劣を決める重要な要素であると考えられる．優れた応答特性を得るためには，制御量に基づいた適切なフィードバック信号を操作量に加える必要がある．Table 2.1 に代表的な手持ち式の道具における基本的な機能と，操作量および制御量をまとめる．ハンドドリルの操作のように制御量が様々な感覚器を通して明確に得られる場合は精度の高い道具操作が容易であるが，操作中に得られる感覚情報が少ない状況下においては精度の高い道具の操作が難しい．以下では外科手術と化石の研磨を例に操作の難しさを説明する．

Table 2.1: Instrument and control.

Instrument	Function	Manipulated variable	Controlled variable
Pen	Draw	Contact position	Color distribution
Scissors	Cut	Grip strength	Amount of cutting
Knives	Trim	Contact pressure	Depth of trimming
Chopsticks	Hold	Grip strength	Amount of slippage
Drill	Bore	Contact pressure	Depth of boring
Soldering iron	Melt	Contact time	Amount of melting
Chisel	Carve	Contact pressure	Depth of carving
Tweezer	Tweeze	Grip strength	Amount of slippage
Reel	Wind	Force	Length of string
Screwdriver	Screw	Torque	Stiffness
Forceps	Hold	Grip strength	Amount of slippage

外科手術

外科手術においては，様々な術具を用いて疾患部位を切除または剥離，縫合する．Fig. 2.3 に示すように，剪刀は術式によらず広く用いられる術具であり，疾患部の剥離・切除等に用いられる．術者は神経系や血管・臓器などの重要部位に術具が侵入しないよう，重要部位と疾患部位を視覚や触覚を頼りに確認しながら正確に操作する必要がある．特に脳神経外科においては血管や神経が複雑に走行する間を切り抜けて治療を行うために鋭敏な視覚と触覚機能を必要とし，剪刀の操作に熟練を要する．また，対象が軟組織を対象とする場合においては術具と対象物の接触によって生じる触覚が微量であり，触覚を頼りに対象を判別しながら操作を行うことが困難である．脳神経外科手術においても，血管・神経並びに脳皮質が柔軟であるために触覚による明瞭な違いが得られないということが手術を難しくしている．



Fig. 2.3: Surgical tool: (a) Surgical scissors [24] (b) The way to use surgical scissors [25].

化石研磨

化石標本の作製には様々な道具が用いられるが、その一つに手持ち式の切削道具がある。Fig. 2.4 に切削道具および使用の様子を示す。切削道具は化石の境界面を露出させるために周囲の鉱物を取り除くために用いられ、化石自体を損傷しないよう極めて慎重に操作を行う必要があり、時間を要する。特に境界面の知覚は全て視覚に頼っており、直感的な操作が難しく、深部に埋もれた複雑な形状を露出させるためには、高度な技術を要する。周囲の鉱物と化石の間で硬さの違いが分からないという点も操作を困難にする原因である。

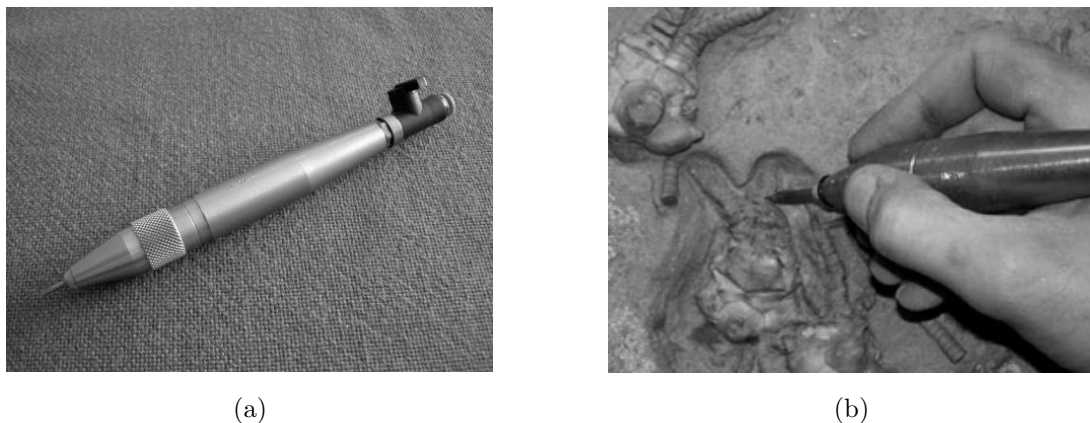


Fig. 2.4: Fossil preparation [26]: (a) Air scribe tool (b) The way to use the air scribe tool.

両者の例に共通して、操作量を制御するための感覚情報が重要であるが、得られる感覚情報は十分ではないために熟練を要する。特に体性感覚の情報に乏しいために情報の補足が求められる。運動制御の観点から道具操作に必要な感覚情報として、主に次の二つが考えられる。

- 対象部位を確認し目標値を定める、また制御量を理解するための視覚情報。
- 術具と対象の接触状態を理解し、操作量を決定するための体性感覚情報。

視覚と触覚の機能を拡張することができれば、両者に関わる情報をもとに高精度かつ迅速な道具操作が可能になると考えられる。特に体性感覚は道具操作に直接的に影響するために、実際では知覚し得ない体性感覚情報の提示が求められる。以下では、体性感覚のうち特に道具の微細な接触状態の知覚に関わる指先の触覚に焦点を当て、その生理学的な機能と機構を示す。

2.2 触覚受容機構

私たちは物体に触れることで生じる感覚のことを日常的には触覚・触感と表現するが多いが、生理学的には体性感覚と呼ばれる [27]。体性感覚は、物体に触れることで生じる質感・温度覚・痛みなどの皮膚感覚と、重量・圧力・身体の動きに伴う運動感覚である深部感覚の2種類に大別することができる。ただし、内蔵感覚を含める場合もあるが、本論文では扱わない。本論文では特に、皮膚感覚から温度覚と痛覚を除いた感覚を触覚 (Tactile sensation)、深部感覚を力覚 (Haptic sensation) と定義して議論を展開する。

2.2.1 触覚神経系

Fig. 2.5 に指先から脳までの触覚神経系の構造を示す。触覚が引き起こされるまでの過程は信号処理の観点から下記の3段階に分けられる。

1. 皮膚下受容器が適刺激により活性化され、受容器電位を発生する (環境情報の符号化)。
2. 受容器電位が神経活動を引き起こし、視床を介して脳皮質に伝達する (信号の伝播)。
3. 皮質内の各階層で情報処理が行われ、触覚を知覚する (符号の解読)。

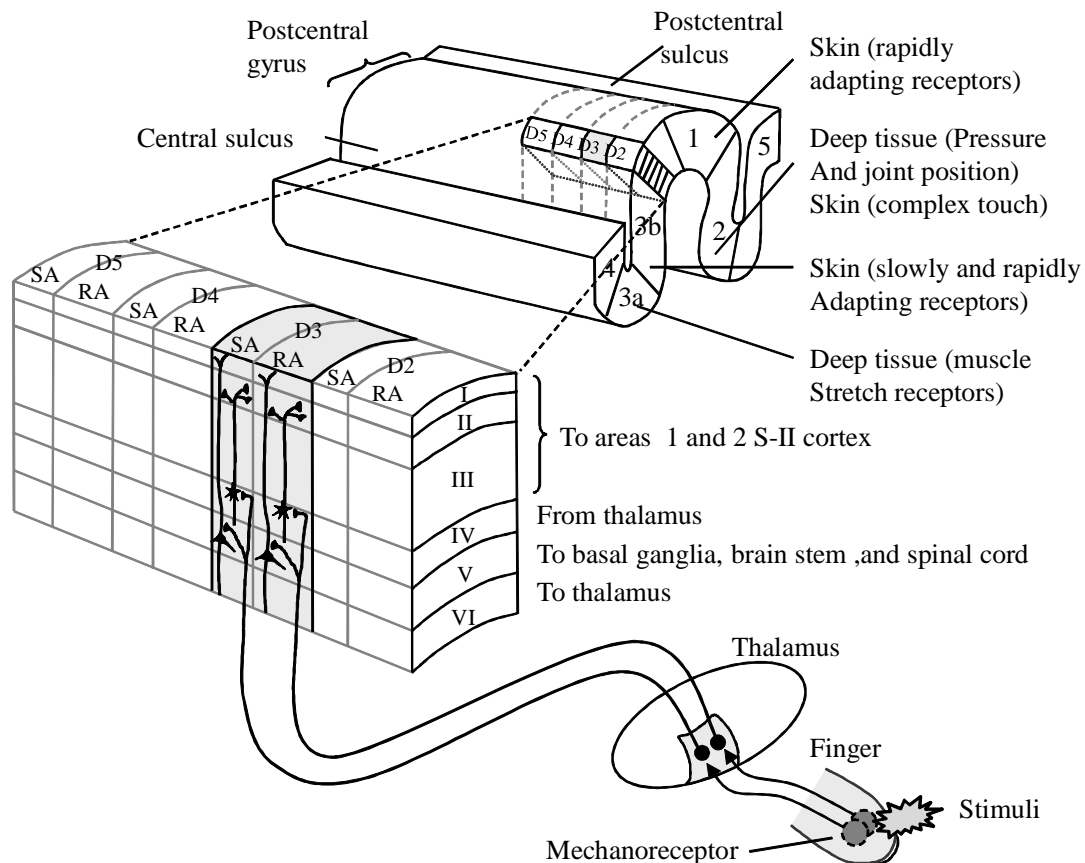


Fig. 2.5: Tactile nerve system [27]: The stimuli detected by mechanoreceptors are conveyed to the cortex via thalamus.

2.2.2 皮膚感覚の発生と空間分布

触覚は外界からの物理的な刺激が皮膚に加わることで生じるが、知覚される感覚は複数種類の受容器が刺激される組合せ・位置・刺激の強度・時間的变化によって決まる。組合せは物理的な刺激の種類に依存するが、触覚を引き起こすものから温度覚・痛覚を引き起こすものまで様々である。それぞれの感覚は様式が異なるとされ、物理的な刺激の種類には機械的刺激・温度的刺激・化学的刺激・電気的刺激が挙げられる。

機械的刺激

機械的刺激が皮膚に変形を起こすことで触覚を生じる。特に物体の表面材質の粗さや形状などの知覚や、皮膚に圧力が継続的に加えられて生じる圧覚や、皮膚の機械的な振動によって生じる振動覚を生じる。機械的刺激は皮膚下に存在する機械受容器がそのひずみを検出することで受容される。

温度的刺激

外界の温度の違いに応じて皮膚に感じる感覚の様式を温度感覚という。温度感覚は皮膚の温度と外温との差を温度受容器が感知することで生じる。温かさや冷たさという言葉で表現されるように、相対的な温度を知覚することで環境の把握を補助している。

化学的刺激

化学物質が皮膚に触れることで痺れなどの感覚を生じるが、多くは皮膚を破壊するための痛覚によるものが多い。特定の化学物質に反応し、触覚を生じる化学受容器が存在する。

電気的刺激

電気的刺激を皮膚または神経に直接与えると触覚を生じる。電気的刺激による感覚は受容器によって受容されるのではなく、神経の発火が誘発されて生じる。従って、上記三つの刺激に対応する各受容器につながる神経全てを刺激し得る。本論文では特に皮膚を介した電気刺激である経皮的電気刺激によって生じる感覚を電気触覚と定義する。

また、痛覚は全ての刺激の種類に共通して起こりうる様式である。それぞれの刺激に対応する侵害受容器が、組織に損傷を与える恐れがある刺激に反応し、組織を保護するために痛覚が生じる。我々が普段知覚しうる感覚の大半が機械的刺激による触覚である。皮膚感覚において、全ての様式が含まれて初めて正確な環境の把握が可能となるが、道具の把持の感覚や物体形状の認識など、日常的な体験を通して機械的刺激による触覚が最も身近であることが分かる。

触覚に関わる受容器は全身に広く分布しており、いずれの皮膚の場所においても触覚を生じうる。しかし、体の部位ごとに触覚の空間分解能が異なる。皮膚下における受容器の密度は、触覚の感度と空間分解能を決定する重要な要素である。触覚の2点弁別の閾値、つまり触覚の空間分解能は指腹部・手の平・足の裏・唇で高い値を有する。また、ヒトの脳皮質における体性感覚領域は、体の受容領域との位置関係が保存されており、対応領域によって区分されている。体性感覚の区分はホムンクルスと呼ばれ、体性感覚地図によって体の各部位の感覚皮質への投射が表現される。体性感覚地図では、入力量が多く重要な感覚が得られる部位が広く表現されており、例えば手に対応する脳皮質領域の面積は背中に対応領域に比べて非常に広い。2点弁別閾と体性感覚地図共に手の触覚が重要であることを意味しており、特に無毛部の指先から得られる情報が環境認識に関わる割合が多い[27]。従って、触覚の理解に向けて指腹部に焦点を当て構造と機能を説明する。

2.2.3 皮膚構造と機械受容器

指腹部など無毛部皮膚に存在する機械受容器はマイスナー小体・パチニ小体・メルケル触盤・ルフィニ終末の4種類に分類される。有毛部との違いはマイスナー小体の有無で、有毛部には毛根部に神経繊維が巻き付いた毛包受容器が存在する。Fig. 2.6 (a) に無毛部における皮膚の受容器と神経を表示した内部構造を示す。

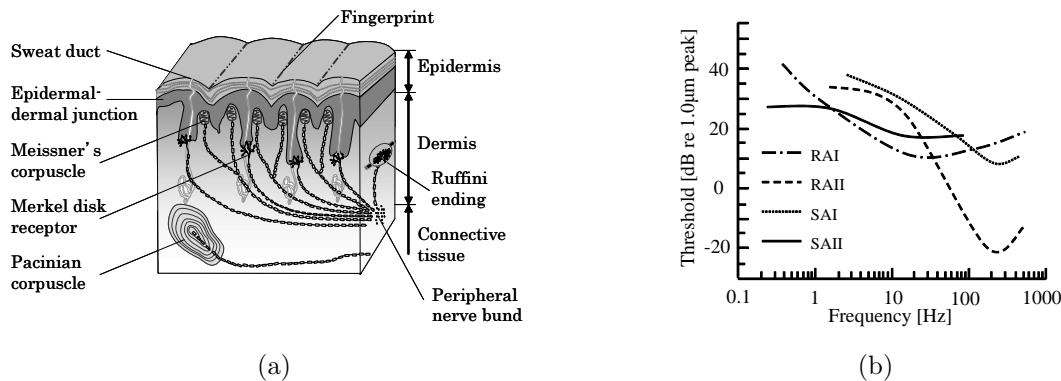


Fig. 2.6: Mechanoreceptors: (a) Receptor structure of the hairless skin [27] (b) Sensitivities with the frequency [28].

機械的の刺激を感受する4種類の受容器はある周波数を有する神経活動を引き起こす。発火頻度と呼ばれる神経活動の周波数は機械的の刺激の強度に依存しており、受容器は強度の情報を発火頻度に変換して脳内に伝達している。また、一定の強度の機械的の刺激を持続的に印加した場合、発火頻度は経時的に変化する。全ての機械受容器に共通して発火頻度が経時的に減少するが、減少率が受容器間で異なり、速順応 (Fast Adaptive: FA) 型と遅順応 (Slow Adaptive: SA) 型に分類することができる [28]。発火頻度の経時的減少は順応と呼ばれ、一定強度の機械的の刺激を与え続けることで受容器が刺激を感受しなくなることを意味する。Fig. 2.6 (b) に示すように、各受容器ごとに機械的の振動刺激の周波数と神経活動が起こる刺激の閾値の特性が決まっている。

マイスナー小体 (FAI)

低周波振動に反応し、30 Hz 付近に共振点を持つ。振動感覚を引き起こし共振点において高い分解能で周波数変化を知覚することができる。特に物体の端や小さな不規則性など細かい変化に反応する。

パチニ小体 (FAII)

比較的高い周波数に応答し、200 Hz 付近で明瞭な共振特性を持つ。振動感覚を引き起こすことが知られており、物体の表面をなぞった時の振動の感受に携わる。

メルケル触盤 (SAI)

広範囲の周波数で感度が高く、順応の遅さから刺激の直流成分に反応することが分かる。発火頻度は皮膚に付加した圧力に対応しており、圧覚を引き起こす。持続した刺激による軽い圧刺激を検出し、わずかな凹凸や輪郭を感受する。

ルフィニ終末 (SAII)

刺激の直流成分に反応し、刺激がない場合も自発的な神経発火を繰り返す。皮膚の曲げや圧縮に反応するため物体を掴んだ時の感覚を生じる。

2.2.4 物体操作と触覚信号

指先による物体操作はいくつかの小さな目的によって決まる接触動作の一連の流れによって達成される。物体を掴み上げ、空中で保持しながら他の場所へ移動させる際の触覚信号を Fig. 2.7 に示す。最初の到達段階では、指が物体に接触することが目的であり、次の負荷段階では接触を抑制して表面を支えることが目的である。両者の間では触覚信号の時間応答が大きく異なり、それぞれの作業において異なる触覚が発生する。この実際に得られた触覚信号と予想した触覚信号と比較することによって目的の成否を判断する。従って、脳は作業の進行度を理解することができ、次の運動を制御することができる。FAIは特に、物体が指に接触または指から開放される際に活性化される。FAIIは物体を持ち上げる際と設置する際の過渡的な状態に反応する。SAIおよびSAIIは接触時にそれぞれ特有の活動を生じるのに加え、物体から静的な力が与えられた際に活性化される。[29]

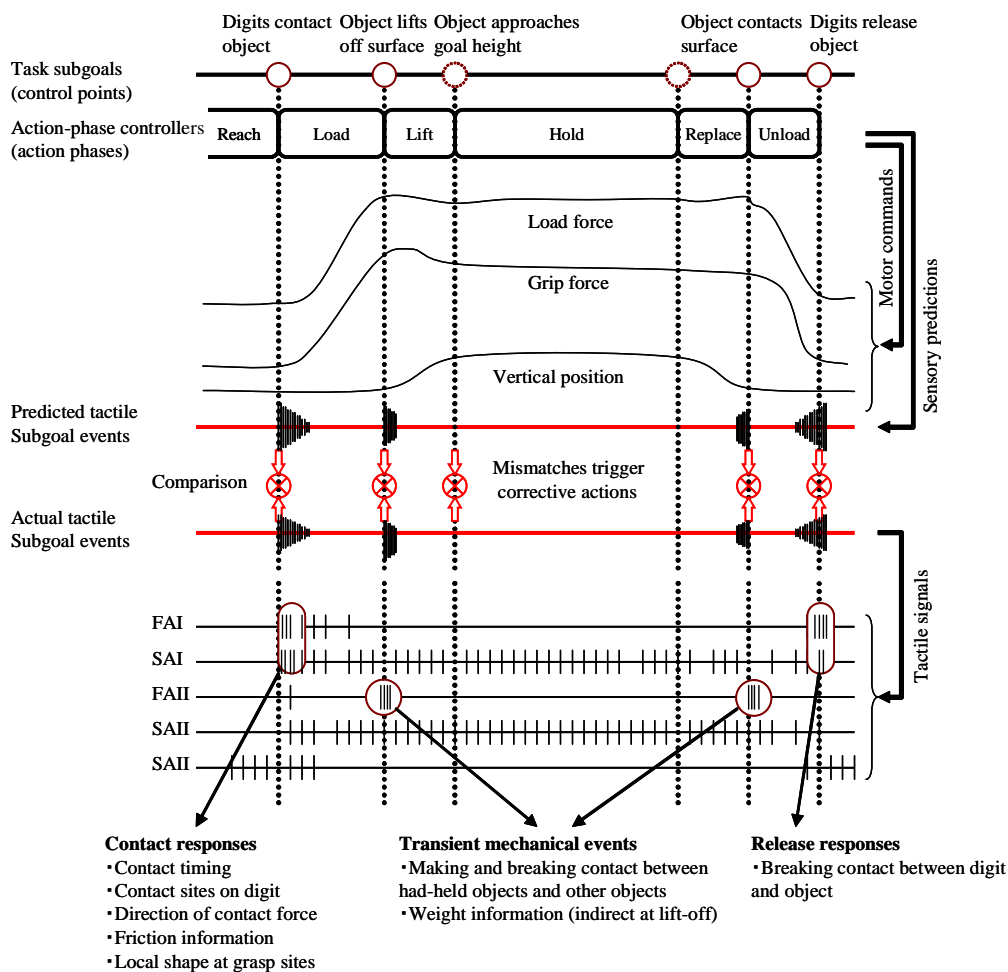


Fig. 2.7: Tactile signal during manipulating tasks: The figure illustrates the subgoals of the grasping the object, the state of the motion, and the measured tactile signal during the task from above [29].

道具操作においても、操作はいくつかの小目的に応じた段階に分割され、各段階で予測された触覚信号と実際に得られた触覚信号を比較することで正確な操作を行っていると考えられる。ARは、触覚に限らず最適な感覚信号が得られるように仮想的に刺激を提示して感覚を増強する技術である。次章では従来のAR技術を用いたナビゲーションシステムについて紹介し、道具操作を支援するための触覚提示技術について考察する。

第3章 ARナビゲーションと触覚提示

道具操作の支援として、人の感覚能力を補助・拡張する AR 技術が注目されている。本章では、道具の空間的な誘導に重要なベクトルの提示に焦点を当て、従来の AR ナビゲーションシステムについて紹介する。特に、空間知覚に重要な役割を果たす触覚の提示という観点から現状の問題点を洗い出し、道具操作支援に必要な要件について考察する。

3.1 AR による道具操作支援

人工現実感 (Virtual Reality: VR) は人の感覚器を人工的に刺激することで、あたかも現実環境に存在するかのように知覚させる技術である。VR が完全にユーザを仮想空間に没入させる技術であるのに対し、AR は現実環境に仮想環境が重ね合わせられた環境への没入感を提供する技術である。AR 技術の例を Fig. 3.1 に示す。現実環境の映像におけるマーカの位置に仮想環境で表現された物体を重畳することで両者の間の新しい環境を作り出している。本論文では、AR を次の特徴を持つ環境として定義する [10]。

- 現実環境に仮想環境を統合する。
- 実時間でユーザが仮想空間とインタラクションできる。
- 3次元空間である。

仮想環境では、コンピュータで作出した仮想的な情報を提示することができる。方向を示す矢印をヘッドマウントディスプレイを用いて現実環境の映像に重ね合わせることで空間的な誘導を行う ARider[31] のように、人が本来知覚することのできない情報を仮想的な情報によって補うことで、現実環境における運動を補助することが可能である。AR 技術はユーザの知覚能力を増強し、現実環境における作業効率や成果を高めることを目的として医療、ロボット操作、ゲームや軍事などの様々な分野に応用されてきた [7]-[10]。以下では特に道具の操作支援を行うための AR ナビゲーションシステムについて述べる。



Fig. 3.1: Augmented Reality: A virtual object, i.e., a teapot is visually augmented to the real environment.

3.1.1 道具操作支援

AR 技術を用いた道具操作の支援は大きく二つに分類することができる。仮想的な情報を事前の計測情報に基づいて得る場合と、操作中の計測情報に基づいて得る場合である [19]。可視化を中心に発展した AR 技術では、外科手術に関して X 線コンピュータ断層撮影 (Computed Tomography: CT) や核磁気共鳴画像法 (Magnetic Resonance Imaging: MRI) で得られた体内画像を体表画像に視覚的に重ね合わせることで術具操作の支援を行うような、前者に相当するシステムが主として開発されてきた [1], [7]。後者の操作中の計測情報に基づいた情報提示では触覚センサ [30] や化学センサ等により得られた情報を聴覚や体性感覚によって提示するシステムが提案されてきた [11]。

両者においては以下の二つの技術が重要である。

- 仮想環境と現実環境の位置合わせを行うための計測技術。
- 直感的な操作を可能にする情報をいかに提示するかという感覚提示技術。

コンピュータ技術の向上に伴って、高い精度の位置合わせや可視化が実現されてきた一方で、現実環境の道具操作に基づいた体性感覚の提示を行う直接的な操作支援に課題が残る [3]。Nojima らは力覚提示を利用することで実環境における作業の支援システム “SmartTool” を提案した [14]。Fig. 3.2 (a) に示すように、作業に用いる道具とセンサ部・力覚提示部とを一体化し、実時間で変化する環境を計測し、力覚情報に変換することで作業者に物体との接触情報を提示することができる。また、Vogl らはナノスケールの原子操作を行うための AR インタフェース “Atomic Force Microscopy (AFM) System” の開発を行った [15],[16]。Fig. 3.2 (b) に示すように、AFM プローブの先端と対象物表面の接触状態を現実時間で計測し、力覚フィードバック装置を用いて接触による反力を提示することで、ナノスケールの物体との直接的なインタラクションを可能にし作業の支援を行うシステムを構築した。

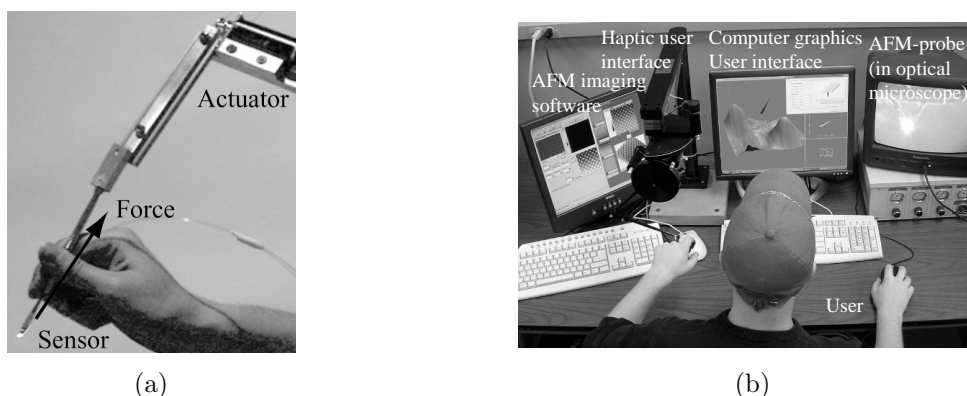


Fig. 3.2: Tactile navigation system: (a) SmartTool [14] (b) Augmented Reality User Interface for Atomic Force Microscopes (AFM) [16].

力覚フィードバックを用いた接触状態の提示は、視覚情報の拡張のみでは達成できないような高い精度の操作結果が得られることが示されてきた。一方で力覚提示装置は力を発生させるために支点を必要とすることから、作業の自由度や操作可能な道具が限定される点が問題であり、現実環境における様々な道具操作への応用という面では現実的ではない。力覚と同様に人体に与えられた機械的な力によって知覚する触覚情報の提示を行う触覚ディスプレイは、比較的小型であるため道具の操作に与える制限も少なく、微妙な接触状態を判断するための情報提示として有効であると考えられる。以下では触覚の提示による道具操作の支援システムを紹介し、その問題点について考察する。

3.1.2 触覚提示による道具操作支援

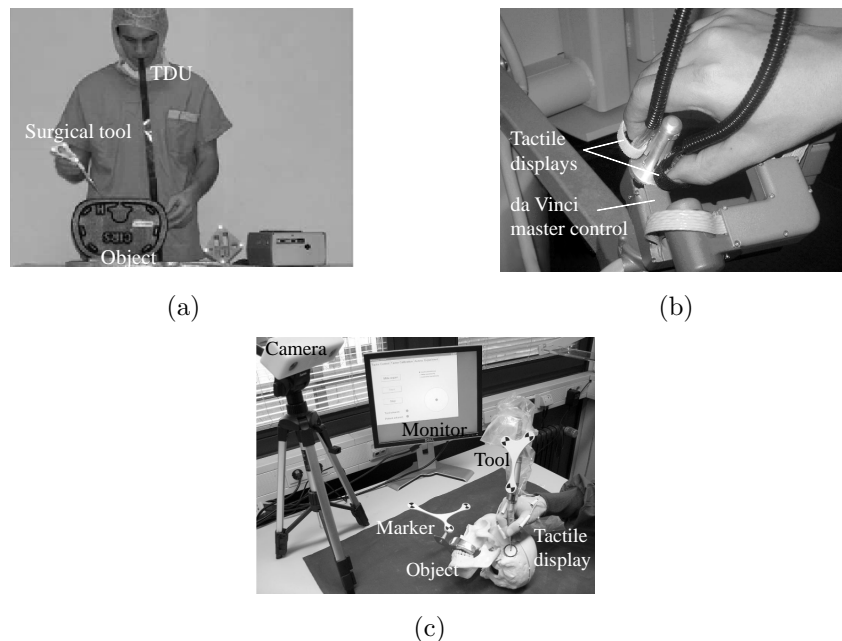


Fig. 3.3: Tactile AR navigation system: (a) Tongue Display Unit (TDU) System [17] (b) Pneumatic Balloon Tactile Display System [18] (c) conTACT [19].

Robineau らは術中の針の位置を知らせる手段として、電気刺激で舌を刺激して視覚情報を触覚情報で代行するシステム “TDU Navigation” を構築した [17] . 図 3.3 (a) に示すように、ユーザは口で電極を咥えながら術具の操作を行い、術具の 3 次元位置をアレイ電極の活性パターンによって提示する . TDU Navigation では触覚の提示部位が作業空間と異なるため術者は空間情報を変換して理解しなければならず、直感的な道具の操作に問題が残る . 一方で、King らはマスタースレーブ方式の内視鏡手術ロボット “Da Vinci” の操作支援を目的とした、空気圧バルブ触覚ディスプレイを用いた AR システムを開発した [18] . Fig. 3.3 (b) に示すように、マニピュレータの操作を行う指に道具先端の圧力分布を提示することができる . 空気圧バルブ触覚ディスプレイシステムでは触覚の提示空間と操作点が一致しているが、指とマニピュレータの間に存在する触覚ディスプレイが操作の妨げとなる可能性が高い . Brell らは術具の先端の位置決め作業を触覚フィードバックによって支援するシステム “conTACT” の開発を行った [19] . Fig. 3.3 (c) に示すように、conTACT では道具先端の目標位置までの距離を提示するために、複数のモータ振動子を手の甲に搭載してその振動の組み合わせと振動周波数によって 3 次元的位置情報を表現する触覚を生成することで位置決め操作の精度を高めた . しかし仮想空間における触覚の提示部位が現実環境の操作点と異なるため操作の直接的な支援とはならない .

触覚 AR ナビゲーションによって作業の精度や効率が上がることが示されている一方で、道具支援を目的とした従来の触覚 AR ナビゲーションは以下の二つの課題が残る .

- 実際に操作を行う作業空間と活動を支援する情報の提示空間の一致 .
- 操作に影響を与えないための作業空間における操作性保持 .

両者の実現を困難にする主な要因は、従来の触覚ディスプレイは道具と操作を行う指の間にアクチュエータが介在するという物理的な制約である . 次節では従来の触覚ディスプレイの研究から道具操作支援システムに応用可能な触覚生成手段について述べる .

3.2 道具操作支援に必要な触覚ディスプレイ

道具操作支援システムに応用が可能であるという観点から，AR ナビゲーションにおける課題と合わせて以下の五つの要素 [32] が触覚ディスプレイに要求されると考え，最適な触覚の生成方法について考察する．

- 触覚知覚部位に刺激装置が介在せず空間透明であること．
- 刺激装置が小型・軽量であること．
- 時間応答性がよいこと．
- 感覚強度を変化させることができること．
- 触覚の分布を生成可能であること．

Fig. 3.4 に触覚ディスプレイの一例を示す．近年開発された触覚ディスプレイの主要な原理は 2 次元配置されたピンアレイによる機械的刺激である．凹凸形状の提示として，圧電素子やモータなどで駆動する振動ピンの変位で物体の表面形状の一部を表現する方法が提案されている [33]-[35]．また，Allerkamp らは受容器の生理学的な共振特性に基づいたピンアレイの振動制御による触覚の生成を提案した [36]．一方で，皮膚の水平方向の運動 (指と物体の摩擦力) に着目したディスプレイも存在する．Takasaki らは，皮膚と対象物の上に働く摩擦係数を表面弾性波によって制御することで能動的な物体探索時の触覚提示を可能にした [37]．また，Yamamoto らは物体との間に働く静電気力に注目し，静電アクチュエータにより皮膚水平方向の運動を引き起こすことで粗さの提示を実現した [38]．さらに，実現象と等価な指の歪を皮膚吸引によって与える方法 [39] や，皮膚に水平方向の皮膚変位を圧電素子で駆動する膜で伝える方法 [40] が開発されている．Ando らは指によるなぞり動作の増強を目的としたシステム “SmartFinger” を提案した [41]．SmartFinger では爪に振動子を装着し，指が平らな物体に接触している時に振動を与えることであたかも対象物が振動しているように知覚される錯覚を利用して触覚を提示するため，空間透明型の触覚ディスプレイに相当するが，指先に力の分布を提示することはできない．また，電気刺激によって触覚を提示する電気触覚ディスプレイが提案されている [42]-[43]．Kajimoto は電気刺激による触覚提示を利用した皮膚感覚増強システム “SmartTouch” を開発した [44]．SmartTouch は視覚情報を触覚情報に変換して提示することができる．Fig. 3.4 (b) に示すように，刺激提示部と同一部位に光センサを取り付けることで現実世界と仮想世界の位置合わせを行い，電気刺激による触覚提示を用いることでより薄いディスプレイ構造を目指した．

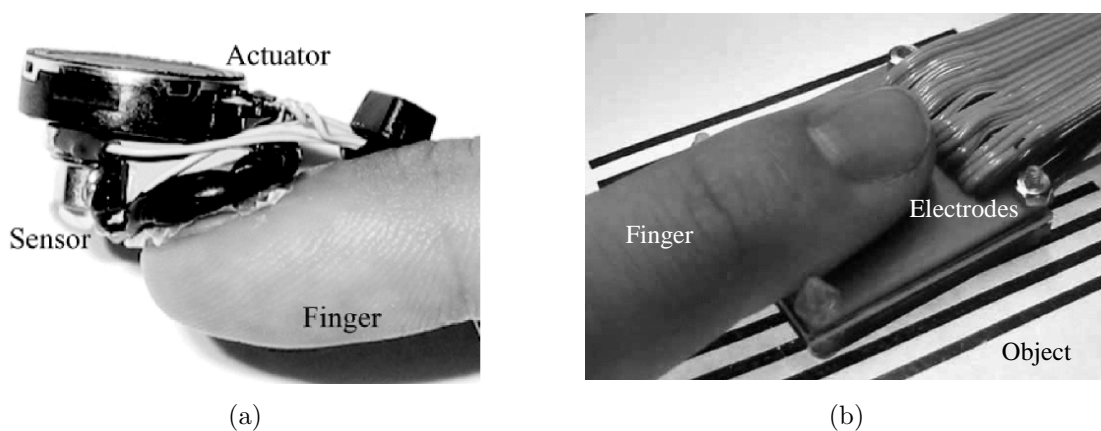


Fig. 3.4: Previous tactile displays: (a) SmartFinger [41] (b) SmartTouch [44].

いずれの触覚提示原理においても、触覚を提示する皮膚の部位に物理的な刺激を与える必要があるため従来の技術では空間透明な触覚提示を実現することはできない。空間透明性以外の要件を考慮すると、電気刺激が道具操作支援のための AR システムに最適な触覚の提示法であると考えられる。電気刺激では、機械的な可動部がないために道具の操作を邪魔しないという点が他の手法に比べて特徴的な点である。さらに、刺激提示の遅延時間が極めて短いこと、機械的な共振がないこと、刺激提示部が電極のみによる構成であり小型化が容易であることが利点として挙げられる。

従来の電気触覚ディスプレイにおいて、電極の改良によりディスプレイを極めて薄くすることで空間透明性を高めることができるが、完全に空間透明な装置の構造を実現するためには新しい触覚提示原理の発案が必要不可欠である。一方で、Kajimoto らは SmartTouch の開発過程で、指腹の刺激の提示部位と触覚の知覚部位の不一致が生じるという興味深い現象を報告している(感覚の移動)[22]。感覚の移動は触覚の空間分布の生成には問題となるが、空間透明型の触覚ディスプレイの設計という観点からは注目すべき現象である。道具の把持を可能にしつつ把持部に人工的な感覚を重畳させるためには、指における感覚の移動の機構を明らかにし、安定して感覚の移動を生じさせるための手法を確立する必要がある。

第4章 空間透明型電気触覚ディスプレイ

感覚の移動が報告されている電気刺激による触覚提示法は刺激提示位置と知覚位置の分離を実現できる可能性がある。従って、空間透明型の触覚ディスプレイの設計としては、電気刺激による方法が有力である。本章では電気刺激により触覚を生成する原理を説明し、指腹部への感覚の移動を安定して生じる方法を提案する。さらに、被験者実験から刺激と知覚部位の関係を調べ、感覚の移動に関する評価と考察を得る。

4.1 電気刺激による触覚生成

触覚は主に機械的な刺激が皮膚に加わることで生じるが、皮膚を介した電気刺激で神経が直接刺激されることによって生じる。電気刺激によって生成された触覚を電気触覚というが、電気刺激と神経活動の関係を解析的に導くことで生成される触覚と刺激の関係を明らかにすることができる。生理学的な知見から、任意の触覚は以下の三つの要素によって決定されると仮定する。

- 機械受容器の種類を選択（受容器ごとの神経活動の組み合わせ）。
- 神経活動パターンを入力（活動の強度・時機）。
- 機械受容器の位置を選択（活性化された神経に接続する受容器の位置）。

以下ではそれぞれが原理的に可能であることを神経軸索の等価回路 [45] および神経の解剖学的構造に基づいて説明する。

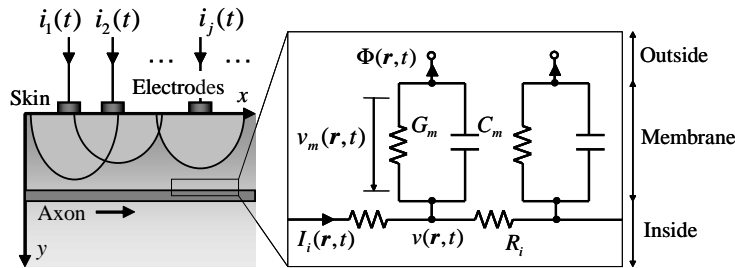


Fig. 4.1: Nerve equivalent circuit: Nerve equivalent circuit is represented by the parallel circuit of resistances and capacitances.

Fig. 4.1 において、それぞれ単位長当たりの値として、軸索の細胞膜をキャパシタンス C_m とコンダクタンス G_m の並列で表現し、軸索内部は抵抗 R_i で表す。皮膚水平方向を x 、皮膚垂直方向を y 、時刻を t とし、 M 個の点電極が皮膚に与えた電流が x 方向に無限に伸びる軸索に関して膜間電位 $v_m(x, y, t)$ を生じたとする。膜内電位と膜外電位を $v(x, y, t)$ と $\Phi(x, y, t)$ とし、 $v(x, y, t) - \Phi(x, y, t)$ が $v_m(x, y, t)$ となる。従って、 $\Phi(x, y, t)$ と $v_m(x, y, t)$ の関係は $\kappa = 1/R_i C_m$ 、 $\tau = G_m/C_m$ とおくと次のように表すことができる。

$$-\kappa \frac{\partial^2 v_m(x, y, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial v_m(x, y, t)}{\partial t} + \tau v_m(x, y, t) = \kappa \frac{\partial^2 \Phi(x, y, t)}{\partial x^2} \quad (4.1)$$

右辺が膜間電位を間接的に変化させることができる入力関数であり，Activating Function (AF) と呼ばれる [46] . j 番目の電極による AF の空間分布 $h_j(x, y)$ で皮膚に刺激電流 $i_j(t)$ が与えられると，全電極による AF $\Psi(x, y, t)$ は個々の重ね合わせで求めることができる [47] .

$$\Psi(x, y, t) = \kappa \frac{\partial^2 \Phi(x, y, t)}{\partial x^2} = \kappa \sum_{j=1}^M h_j(x, y) i_j(t) \quad (4.2)$$

式 (4.2) を式 (4.1) に代入し， x でフーリエ変換した後， t でラプラス変換する．変換後の $v_m(x, y, t)$ と $h_j(x, y)$ ， $i_j(t)$ を $V_m(k_x, y, s)$ と $H_j(k_x, y)$ ， $I_j(s)$ で表わすと， $V_m(k_x, y, s)$ に関して次式が得られる．

$$V_m(k_x, y, s) = \frac{\kappa}{\kappa k^2 + \tau + s} \sum_{j=1}^M H_j(k_x, y) I_j(s) \quad (4.3)$$

神経活動は $v_m(x, y, t)$ が閾値電位 V_{th} を越えると誘発されることを前提とする．式 (4.1) の解である $v_m(x, y, t)$ は式 (4.3) を逆ラプラス変換及び逆フーリエ変換することで求めることができるが，空間分布と時間分布は $H_j(k_x, y)$ と $I_j(s)$ にそれぞれ依存し， $h_j(x, y)$ と $i_j(t)$ が神経の選択刺激と神経活動の時間応答を決定することができる．

4.1.1 受容器種類の選択

機械受容器の軸索は種類によって伸びる方向と深さが異なる．式 (4.2) の x 軸方向に伸びる軸索に関する AF は， y 方向に伸びる軸索に置き換えて考えることができ，AF の空間分布項 $h_j(x, y, t)$ が軸索の方向に依存することが分かる．皮膚を等方的な導電体と考えた場合，皮膚中には電極からの距離に反比例した膜外の電位分布が生じ，それぞれの軸索の活性領域が電極の極性と神経軸索の方向で決定される．従って，各受容器に対する刺激様式は Fig. 4.2 のようになる [22] .

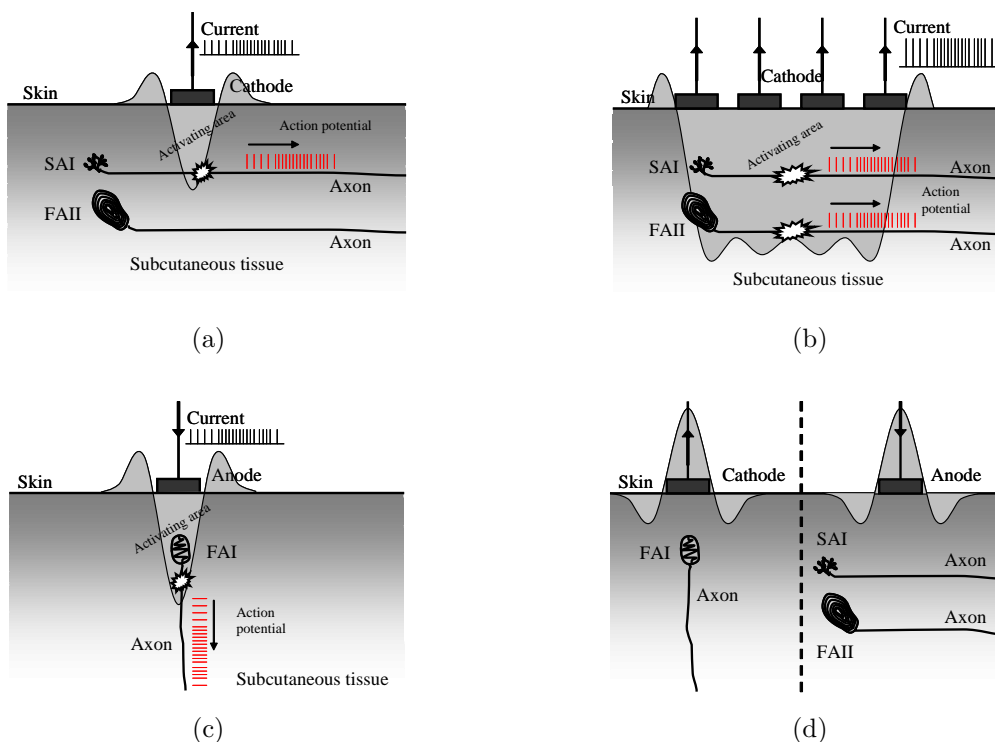


Fig. 4.2: Receptor selective stimuli: (a) SAI mode (b) FAII mode (c) FAI mode (d) Inactivated mode.

Fig. 4.2(a) に示すように，SAI と FAII の皮膚と水平方向に伸びる軸索を刺激するためには，皮膚に対して流れ出る方向の電流（陰極電流）による刺激が有効である．SAI が比較的浅部に存在することから，電流量を小さくし，局所的に刺激を行うことで SAI の軸索のみを刺激可能である．一方，同図 (b) のように，FAI I は軸索が深部に存在するため刺激領域を広げ，電流量を増やすことで刺激を行う．しかし，浅部の SAI の存在により，FAII のみを選択的に刺激することはできない．同図 (c) に示すように，皮膚に垂直方向に伸びる FAI の軸索は皮膚に対して流れ込む方向の電流（陽極電流）を用いることで刺激が可能である．また，SAII の神経を刺激する方法は確立されていない．

4.1.2 神経活動パターンの入力

x 方向に伸びる軸索が AF の空間分布により活性される領域に着目して，1 点電極による刺激電流 $i_1(t)$ に対する神経活動の時間応答を考える． I_m を振幅， n を自然数， T を周期， T_W をパルス幅， $u(t)$ をステップ関数として，刺激電流波形を次式のパルス列で表わす．

$$i_1(t) = I_m \sum_{n=0}^{\infty} \{u(t - nT) - u(t - nT - T_W)\} \quad (4.4)$$

式 (4.4) を t でラプラス変換して，式 (4.3) に代入すると次式が得られる．

$$V_m(k_x, y, s) = \frac{\kappa H_1(k_x, y)}{\kappa k^2 + \tau + s} \frac{I_m}{s} \sum_{n=0}^{\infty} \{e^{-nTs} - e^{-(nT+T_W)s}\} \quad (4.5)$$

式 (4.5) を逆ラプラス変換することで， $v_m(x, y, t)$ の時間分布 $v_m(k_x, y, t)$ が求まる．

$$v_m(k_x, y, t) = \frac{\kappa H_1(k_x, y)}{\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \{(1 - e^{-\alpha\beta_n}) u(\beta_n) - (1 - e^{-\alpha\gamma_n}) u(\gamma_n)\} \quad (4.6)$$

ただし，簡単化のため $\alpha = \kappa k^2 + \tau$ ， $\beta_n = t - nT$ ， $\gamma_n = \beta_n - T_W$ と置いた．

式 (4.6) から膜間電位が閾値電位を越えて起こる神経活動の経時変化を Fig. 4.3 に示す．電気刺激の入力信号は神経活動の信号におよそ一致するため，感覚閾値を超えるような電気刺激によって任意の神経活動の信号を入力可能であることが分かる．また，継続的に刺激が与えられた場合は膜間電位が経時的に増加し，発火が生じなくなることから，一定の刺激により順応現象が生じて知覚感度が低下することが説明できる [48]．仮想環境において自然な感覚を生成するためには，受容器の活動を模擬した信号を電気刺激の波形によって表現し，適切な神経へ入力する必要がある．

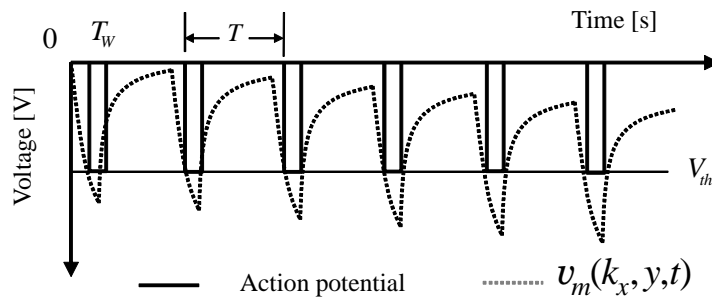


Fig. 4.3: Input action potential: Nerves will be activated by membrane voltage, which is above the threshold.

4.1.3 受容器位置の選択

触覚の知覚は、活性化された機械受容器の位置に生じる。一般的に電気触覚ディスプレイでは触覚を提示したい場所に刺激電極を設置することで活性化される受容器位置を選択している。指腹部に触覚を提示するには刺激電極を指腹部に接触させ、電極直下の受容器を刺激することで触覚を提示する。特に、触覚の空間分布を生じる場合は Fig. 4.4(a) に示すようにアレイ状の電極が用いられ、刺激を発生した電極位置に対応した知覚部位が得られる。しかし、陰極電流を用いる場合、刺激提示部位よりも末端に触覚を生じる(感覚の移動) 場合があり、適切な位置に触覚を生じることができない [22]。意図した部位に触覚を生じるためには、刺激位置と知覚部位の関係が分かっている必要があるが、両者の関係は解明されていない。

一方で福祉の分野では、義手の開発において切断された触覚神経の一部を利用した感覚フィードバックが試みられてきた [50]。Fig. 4.4(b) は腕切断者の胸部に残留する腕の神経系への電気刺激と手先へ投影される触覚の関係を示している。切断された神経を刺激することで存在しない手先への触覚を生じる現象は、触覚が抹消に存在する(存在した)受容器の位置に生じることを意味している。つまり、電気刺激を途中の神経経路に介入させることができれば、感覚の移動を生じることが可能であると考えられる。さらに、神経の解剖学的構造を利用することで刺激位置と知覚部位の関係を定量化することが可能であると考えられる。

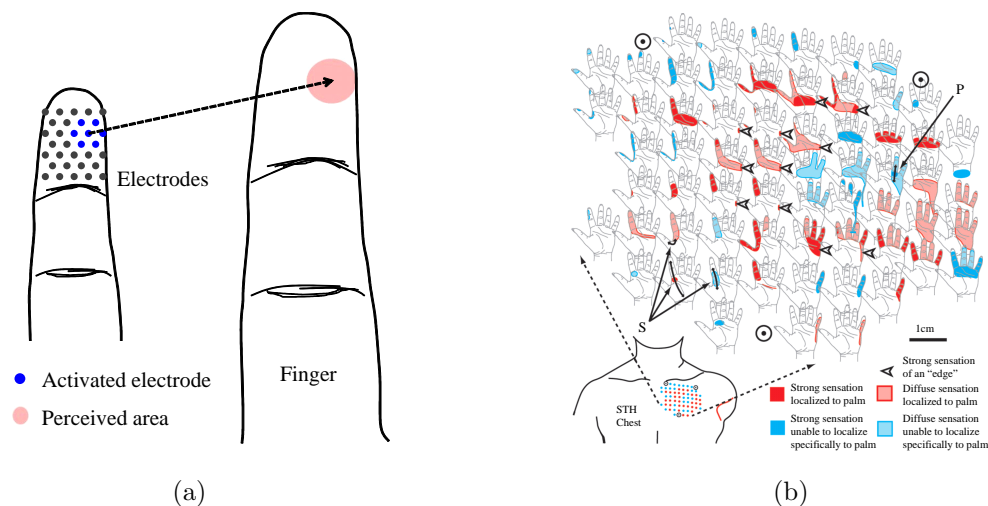


Fig. 4.4: Stimulus points and perceived area: (a) Electrodes are located at the fingertip and the tactile sensation is projected nearby the activated electrodes. (b) The reinnervated chest skin of patient STH showing sensations referred to the missing limb [50].

本研究で扱う道具の操作支援では、指腹部の触覚分布が対象となる。次節では指腹部への感覚の移動を安定して生じるための手法について説明する。

4.2 感覚の移動の安定化手法

感覚の移動は、神経の解剖学的構造及び刺激電流に依存しており、安定して感覚の移動を生じるためには刺激の提示部位および刺激を適切に設計する必要がある。以下ではまず、指の神経の解剖学的構造に基づいて、道具の把持部、つまり人差し指および親指に触覚を重畳させるための刺激の提示部位を決定する。次に感覚の移動を生じるための刺激を設計する。

4.2.1 刺激提示部位と感覚の移動

Fig. 4.5 に示すように、各指の掌側に 2 本ずつ存在する固有掌側指神経 (Proper Palmar Digital Nerves: PPDN) は指末節から基節を通り、拳にかけて小指に存在する 2 本と薬指の 1 本は尺骨神経 (Ulnar nerve) に、薬指の残りの 1 本と中指、示指、母指の PPDN は正中神経 (Median nerve) にまとまる [52]。左右の PPDN からは微細な神経が枝状に分岐しており、それぞれ指の左右半分ずつ触覚の受容領域を担っているが、神経の末端に接続された機械受容器の多くは指腹部に集まっている。また、PPDN は、皮膚内部で指動脈に平行するように存在している。中手に存在する筋は骨間筋および虫様筋の 2 種類であるが、これらはいずれも第 2 関節に接続する指背腱膜 (伸筋腱膜) に着く。また、上腕部に存在する伸筋から伸びた腱が爪の近傍に接続しており、第 1 関節における屈曲はこの腱によって達成される。すなわち、指において第 2 関節よりも末端の部位には筋肉は存在しない [51]。

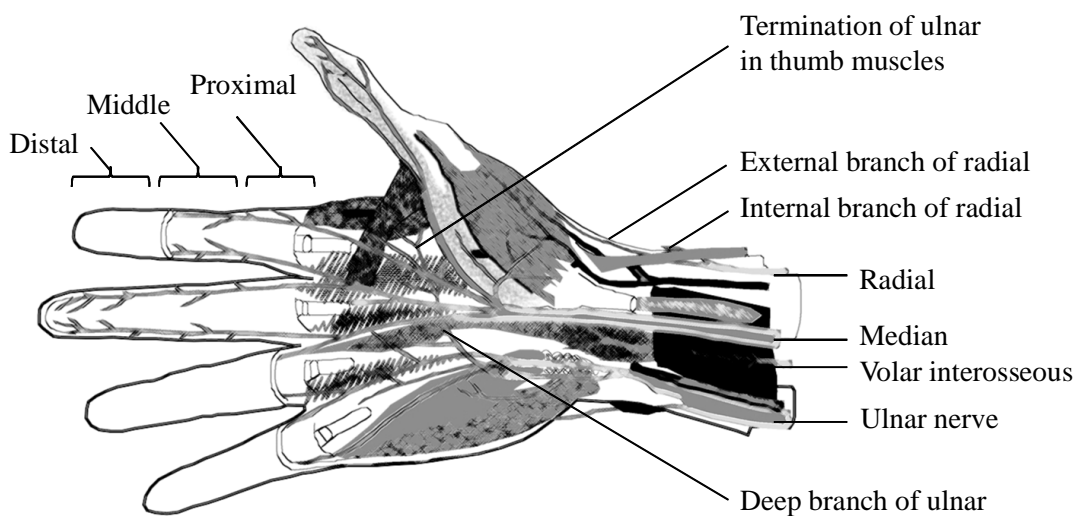


Fig. 4.5: Nerves of the finger: Each finger has two main afferent nerves along the side of the finger.

配線と装着による拘束感の観点から、刺激提示部位は道具の把持を行う指の末端よりも根元に近いほど望ましい。しかし一方で、中枢に近いほど神経が束を成しており、経皮的電気刺激で特定の部位に触覚を生じさせることは難しいと考えられる。特に各指の PPDN が束になる拳よりも上位の部位では特定の指のみに触覚を生じさせることは困難である。また、電気刺激によって運動を生じないためには、刺激部位を筋肉が存在しない指の第 2 関節より末端に選定する必要がある。さらに、指の末節 (指腹部) は道具の把持を行うことから、刺激提示部位は指の中節に限定される。

人差し指および親指の PPDN がそれぞれ指の掌側側面を走ることから、それぞれの指の掌側側面に刺激を提示する必要がある。指の中手方向に分岐した少量の神経を刺激するのではなく、末節方向に伸びる側面の PPDN を刺激することは、指腹部に触覚を生じる上で重要である。さらに、神経が比較的浅部に存在する第 2 関節付近に刺激を提示することで、固有掌側指神経の刺激を確実に行うことができると考えられる。また、末節に集まる機械受容器の数が中節に存在する機械受容器の数よりも多いことは、刺激を提示する中節部位というよりは末節に触覚を生じることが可能であることを示している。

4.2.2 刺激波形と感覚の移動

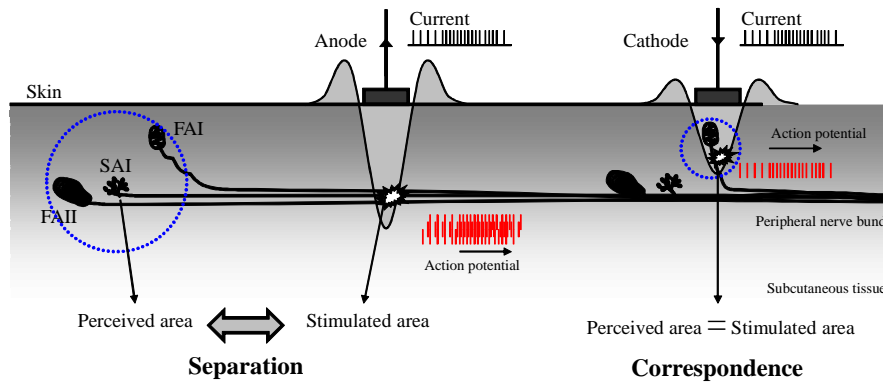


Fig. 4.6: Stimulus and sensory shift: Anodic stimuli can activate the peripheral nerve band thus leading the separation between perceived area and stimulated area, while cathodic stimuli cannot.

受容器種類の選択的刺激で述べたように、皮膚と平行に伸びる軸索は陰極電流によって刺激することができる。従って指末端に向かって皮膚と平行に伸びる固有掌側指神経は、Fig. 4.6 に示すように陰極電流刺激によってのみ刺激可能であると考えられる。また、電流量が小さいと比較的浅部に存在する刺激提示部位周囲の受容器のみが刺激され、感覚の移動は生じないと考えられる。従って、感覚の移動を確実に生じるにはある程度の刺激量が必要である。

Fig. 4.7 に示すように、刺激波形にはパルス波形を用いる。刺激波形の波高は、感覚の移動に影響する一方で、刺激波形の周期およびパルス幅は神経の活性化領域に影響を与えないために感覚の移動とは無関係であると考えられる。感覚の移動が生じる波高は人によるばらつきがあるため、それぞれのユーザーに応じて波高、つまり刺激量の調整が必要となる。

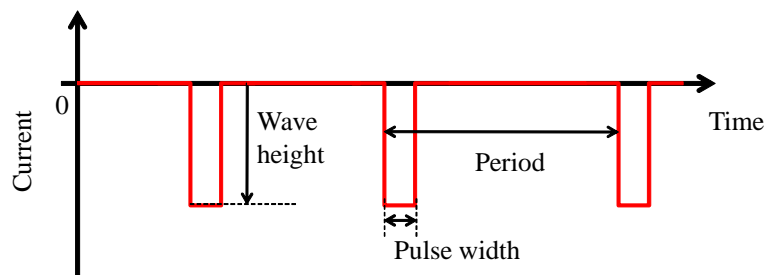


Fig. 4.7: Stimulus and sensory shift: Anodic pulse stimulus is used for sensory shift and its wave height will be adjusted for each user.

4.3 空間透明型触覚ディスプレイの設計

提案手法により感覚の移動が制御可能であることを示し、触覚の分布生成が可能な電極設計を得るために、空間透明型電気触覚ディスプレイの製作を行い実験システムを構築する。本システムでは以下の二つの知覚に関する調査を目的としている。

- 電気刺激によって感覚の移動量を制御可能であること。
- 電極の位置と皮膚上の触覚分布の関係。

以下では提案に基づいた実験システムについて述べる。

4.3.1 システム構成

実験で用いる電気触覚ディスプレイの構成を Fig. 4.8 に示す。電気触覚の生成は、パルス電圧を皮膚に与えることで神経の刺激を行うことで実現される。電気触覚ディスプレイはパルス信号の生成を行う信号生成器と電気刺激を触覚として知覚できる信号に変換する電気刺激回路および電極部から構成される。

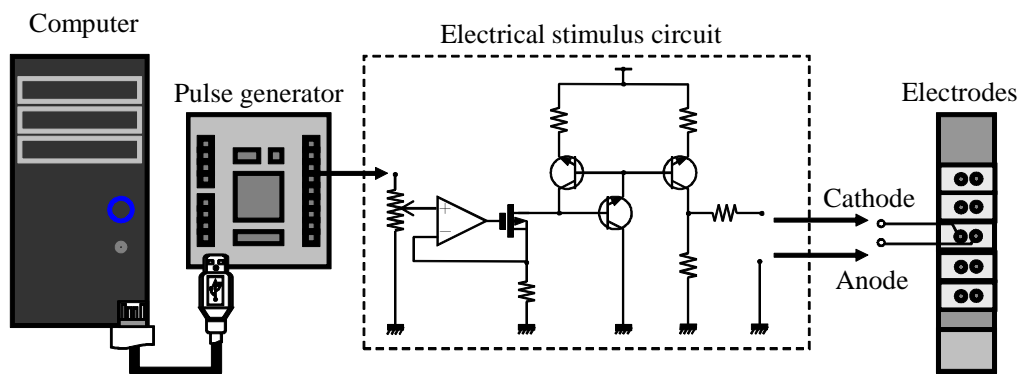


Fig. 4.8: Electrotactile display system: Pulse generator is controlled by the computer. The pulse will be converted to the electrical stimulus and presented to users with the electrodes.

信号生成器

任意の頻度のパルス信号を生成するために、コンピュータで指定したパルス頻度に基づいて信号を生成可能な回路が必要である。電気刺激の信号によって神経活動を模擬することを考慮すると、パルス信号として必要な条件としてパルス幅 $200 \mu s$ 、パルス頻度 1-1000 pps (pulse per second) が求められる。実際には、パルス頻度 100 pps と 1000 pps の刺激における感覚の識別が困難であることから、1-100 pps のパルス頻度を利用する。また、シリアル通信によってパルス頻度情報をコンピュータから転送し、マイクロコンピュータでパルスの発生を行う。

電気刺激回路

人の皮膚の抵抗は数十 $k\Omega$ であり、電気刺激によって触覚を知覚するためには最低でも 0.1 mA 程度の電流を流す必要があるため、数百 V の比較的高い電圧が必要である。電気刺激回路部では、まずパルス電圧

を電流に変換し、高インピーダンスである皮膚に電流を流すための高電圧回路の出力電流を制御する。また、ユーザが入力電圧を制御し出力電流を変化させることで、刺激量を調整可能にする必要がある。

電極部

感覚の移動の安定化として述べた通り、電極の位置は指中節側面が望ましい。また、指で把持するような道具において、指と道具の間に電極を配置することなく指腹部に触覚を知覚させる必要がある。

実験では提案手法によって感覚の移動が安定して生じることを示すと共に、指腹部に生成される触覚の分布と電極の位置関係を調べる。従って、アレイ状の電極を指の中節に設置し、アレイ状の電極のうち一つを ON にした際の刺激提示部位に対する触覚の知覚部位を測定する。Table 4.1 に電極の仕様を示す。また、電極は示指中節に巻き付けて装着する。作成したアレイ電極の構造と装着の様子を Fig. 4.9 に示す。電極のサイズおよび配置間隔は装着時における電極同士の接触を防ぎ、かつある程度の電極面積を確保して明瞭な感覚を得るための値として決定した。

Table 4.1: Specifications of the electrodes.

Electrode size	4 mm ²
Electrode interval (Vertical)	8 mm
Electrode interval (Horizontal)	6 mm



Fig. 4.9: Developed electrodes array: (a) Electrodes structure (b) Appearance of the use.

実装環境

Table 4.2 に実験システムの実装環境を示す。

Table 4.2: Experimental environment in evaluation of sensory shift.

CPU	Intel Core 2 Quad 2.83 GHz
RAM	2.0 GB
GPU	NVIDIA GeForce 9600 GT
OS	Windows XP Professional
Programming Language	C++
Pulse generator	Arduino MEGA

4.4 空間透明性の評価

被験者実験により電気刺激によって感覚の移動の発生が可能であり、感覚の移動の安定化手法が妥当であることを示す。特に、電極の配置による感覚の移動の違いを調査するため、いくつかの電極配置における触覚の知覚部位について測定を行う。さらに、指腹部への触覚分布の生成が可能であることを調べるために、刺激の提示部位に対する触覚知覚部位の関係を調査する。

4.4.1 実験プロトコル

実験手順は以下の通りである。

1. 電極を指に装着する。
2. 回路の電源を入れ、電流量を上げながら基準となる感覚量を決定し、再び電流量を 0 に戻す。
3. 刺激提示部位を決定し、設定した感覚量に届くまで電流量を上げていく。
4. 設定した感覚量に達したら、触覚として知覚している全領域を指のモデル図から選択し、回答を行う。
5. 最も感覚量の強い領域をモデル図から選択し、回答を行う。
6. 全ての刺激部位のパターンについて調べられるまで手順 3 から手順 5 を繰り返す。

また、指のモデル図を Fig. 4.10 に示す。刺激の提示部位は Table 4.3 に示すアレイ電極の活性パターンによって選択する。また、実験の条件に関して、提示する電気刺激パルスとして明瞭な振動覚が得られ、順応が起こりにくいパルス頻度 10 pps、パルス幅は $200\mu s$ の信号を用いる。

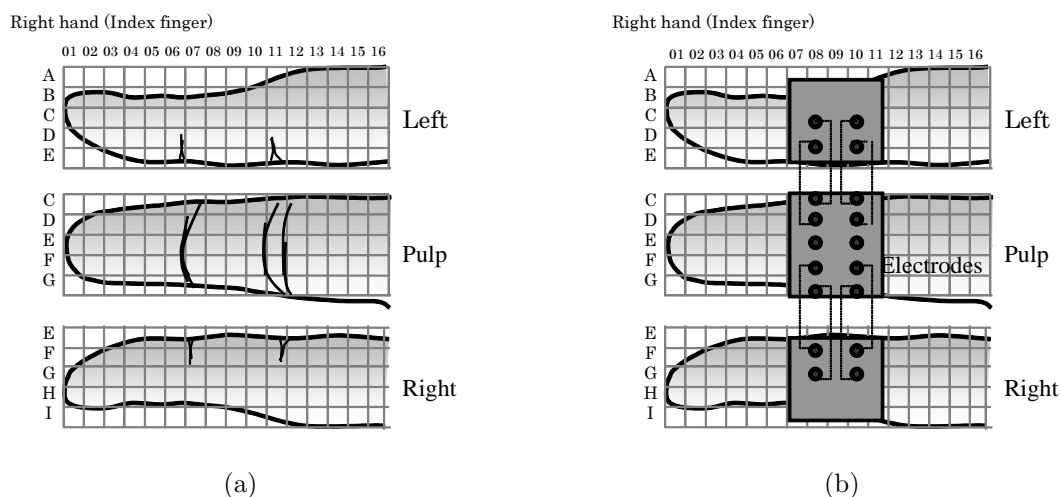


Fig. 4.10: Finger segments: (a) Each segment is 4×4 mm size, and given the index number (Example: B5). (b) Each electrode will be located on the each segment.

Table 4.3: Stimulus position.

Position (Pos.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Anode	H08	H10	G08-F08	F10-G10	E08	E10	C08-D08	C10-D10	B08	B10
Cathode	H10	H08	G10-F10	F08-G08	E10	E08	C10-D10	C08-D08	B10	B08

4.4.2 実験結果および考察

健康な成人男性被験者 9 人に対して実験を行った。実験中は視覚による刺激のフィードバックは与えず、被験者は指示に従って電流量を調整し回答を行う作業のみを繰り返し行った。刺激の感度は重要でなく知覚位置が重要であるため、全ての電極配置に関する刺激の提示と回答は連続して行い、触覚の順応等による影響は考慮しなかった。実験によって得られた回答の一例を Fig. 4.11 に示す。実験結果より得られた各電極位置における知覚部位の平均値と分散を指の長軸方向と短軸方向に関して求め、Table 4.4 に示す。ただし、Fig. 4.11 における升目の一片を 4 mm として扱い、升番号 I1 である左下端を指の長軸および短軸の原点として用いることで計算を行っている。また、測定結果を元に最も触覚を強く知覚した部位を 2 点、その他の触覚を知覚した部位を 1 点として 9 人の被験者の触知覚部位の感覚強度を平均化し、得られた感覚強度に関する等値面を色相で表現することで Fig. 4.12 に示す結果が得られた。特に Fig. 4.11 において指の短軸方向に関して、指左右側面と掌側の共通部位を融合して等値面を作成した。

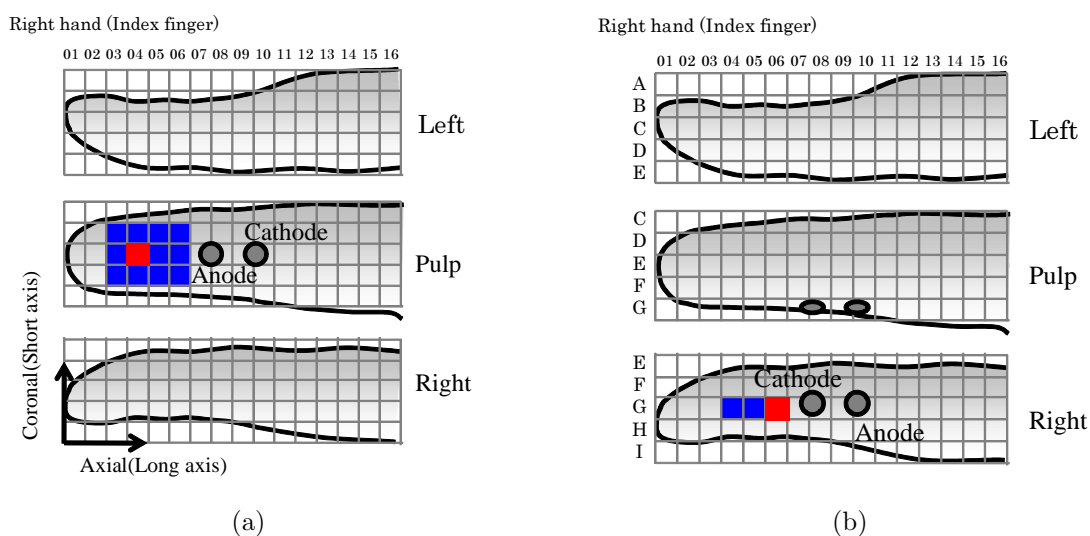


Fig. 4.11: Examples of the answer sheet: Blue means hole perceived area while red means local well-perceived area. (a) Stimulus at the E8 (Anode), E10 (Cathode) (b) Stimulus at the G8 (Anode), G10 (Cathode).

Table 4.4: Quantitative evaluation.

Anode position (axial, coronal) [mm]	Axial average (variance) [mm]	Coronal average (variance) [mm]
Pos.1 (28, 4)	20.37 (1.00)	4.82 (0.25)
Pos.2 (36, 4)	22.51 (0.88)	4.80 (0.27)
Pos.3 (28, 10)	12.69 (1.09)	11.25 (0.50)
Pos.4 (36, 10)	14.61 (1.03)	11.86 (0.37)
Pos.5 (28, 16)	16.69 (1.23)	15.88 (0.52)
Pos.6 (36, 16)	15.03 (0.92)	14.39 (0.46)
Pos.7 (28, 22)	18.27 (1.27)	21.52 (0.30)
Pos.8 (36, 22)	15.68 (1.39)	23.47 (0.40)
Pos.9 (28, 28)	22.06 (1.41)	26.06 (0.36)
Pos.10 (36, 28)	22.13 (1.49)	25.88 (0.36)

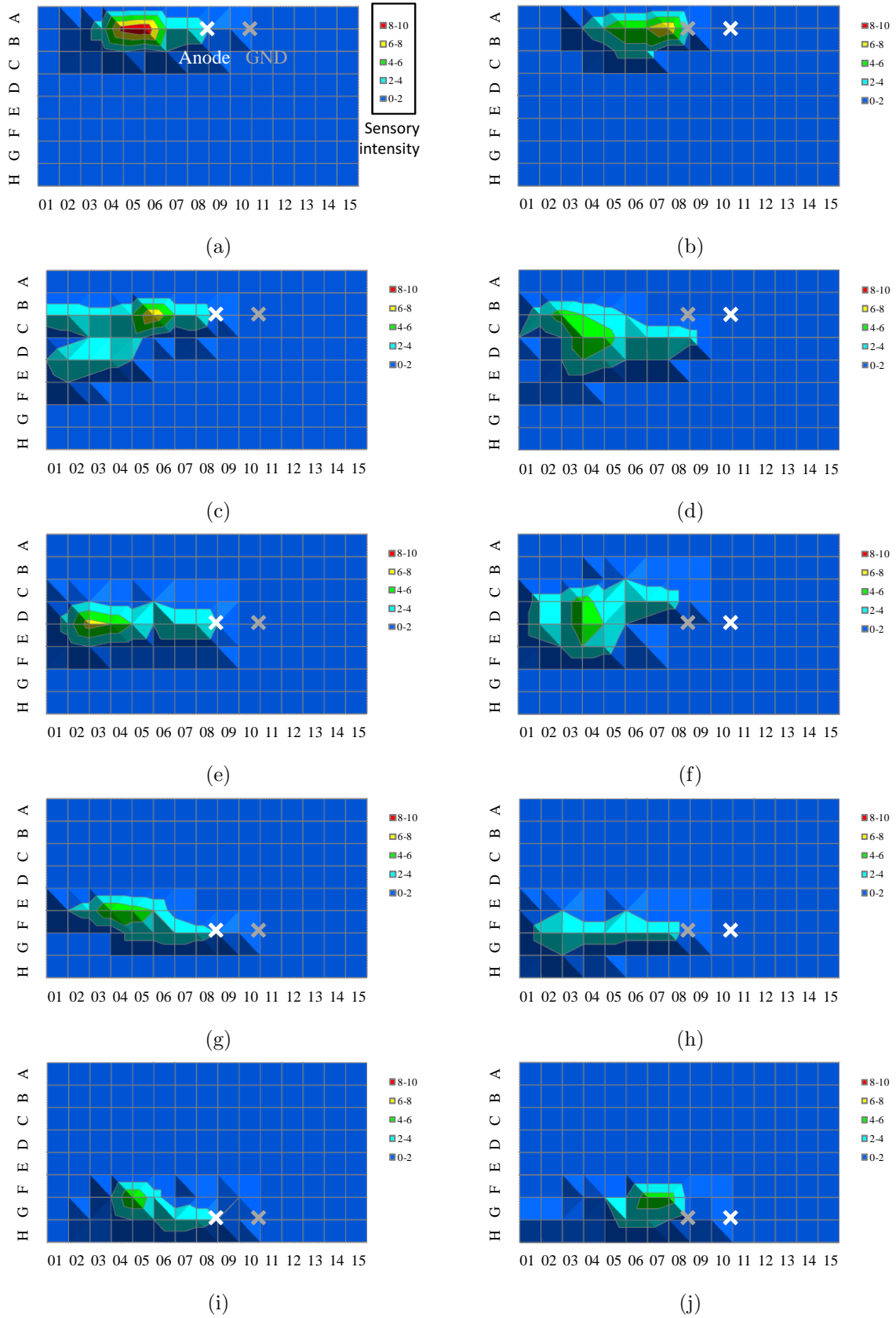


Fig. 4.12: Stimuli and perception: Perceived areas are represented by the color distribution. (a) Pos. 1 (b) Pos. 2 (c) Pos. 3 (d) Pos. 4 (e) Pos. 5 (f) Pos. 6 (g) Pos. 7 (h) Pos. 8 (i) Pos. 9 (j) Pos. 10.

感覚の移動

Table 4.4 に示す電極位置と知覚位置の関係に関して、指の長軸方向では電極位置に対して知覚位置が指末節に近い部位に知覚されることが分かる。特に、電極が指の掌側側面から指腹側の位置 (Pos. 3-Pos. 8) において、電極の長軸方向の位置 28 または 36 mm に対して知覚部位は 12.69-18.27 mm の位置であり、中節の刺激が末節に生じていることが定量的に分かる。また、最大で 1.4 程度の標準偏差を考慮すると、刺激位置の範囲に知覚位置が含まれないことが有意に示される。最も感覚の移動量が大きい場所は刺激電極が Pos. 3 (中指の掌側側面) にある場合であり、固有掌側指神経の直下への刺激が最も感覚の移動を生ることが示された。また、他方の側面である Pos. 8 についても比較的感覚の移動量が大きいことが分かる。

Fig. 4.12 よりいずれの電極配置においても、知覚部位は指末端方向への移動を生じることが分かる。特に指の側面に電極を配置する場合を除き、同図 (c)-(h) で知覚の中心位置が指の末端に生じており、感覚の移動が生じていることが分かる。各電極配置に関して、指末端側を接地した場合に比べ末端側を陰極にした場合は触知覚部位が指の末端に生じ、知覚領域が狭くなることが分かる。この現象は陰極が指の末端に近い位置にあるほど、刺激される神経束の数が少なくなり、触知覚が生じる範囲が狭くなることから説明できる。知覚範囲の広がり、感覚の移動量の安定性はトレードオフの関係にあるが、確実に感覚の移動を生じさせるためには刺激電極の位置を中節の中でも特に第二関節に近傍に設置する方がよいと考えられる。

一方で、指側面に刺激を提示した場合 Fig. 4.12 (a), (b), (i), (j) は感覚の移動量が微量である。固有掌側指神経が指側面というよりは側面と正面の間を通過しているため、側面に刺激を与えた場合は神経束の刺激が行えず、電極周囲の神経のみを活性化するために知覚が電極付近に生じたと考えられる。さらに電極の極性を入れ替えた際に知覚部位が移動する方向が、他の刺激提示部位の場合と比べ逆である。この現象は陰極電流によって神経束が刺激されておらず、電極真下の神経のみが刺激されていることを示唆している。

以上の結果から、指中節の掌側側面から指腹側の位置 (Pos. 3-Pos. 8) に限り、陰極電流の電気刺激を与えることで指末節に触覚を知覚させることが可能であると考えられる。これは感覚の安定化として 4.2 節で述べた手法と一致しており、安定して感覚の移動を生成するための電極位置の設計の妥当性が示された。

知覚部位の選択

指長軸方向に関しては、感覚の移動のほかに電極の指長軸方向の位置に応じて知覚部位の移動が生じることを述べた。Table 4.4 から短長軸共に電極位置に応じた知覚部位の変化が生じることがわかる。一方で指の短軸方向に関する触覚知覚位置は、刺激電極の短軸方向の位置に依存している。指の掌側に刺激を提示した場合は知覚領域に極端な広がり確認できたが、要因としては左右側面の触覚神経が同時に刺激されることで指全体に知覚が広がったためであると考えられる。

また、実験を通して電流量が増加するとより指末節に触覚が知覚されることが報告された。この現象は木構造を成す神経の形態によって説明ができる。PPDN のうち、皮膚深部に存在するものほど末端まで伸びている。従って、電流量を変化させることで深部の神経の興奮が生じ、より末端に伸びる神経が刺激されることで触覚を末端に感じると考えられる。しかし、電流の調整は感覚量に変化を与えるため、電流量の調整による指長軸方向の触知覚位置の選択は感覚量の制御と両立しないため、採用することはできない。

以上の結果から、電極の位置に応じた触知覚部位の選択は指の短軸方向のみで可能であると考えられる。一方、アレイ電極による刺激提示の方法が考えられるが、空間的制約から粗に配置せざるをえず、知覚部位を連続的に選択することは困難である。次章では、最も低拘束な触覚分布の生成として、2 点の刺激電極のみで連続的に知覚部位を選択できる刺激提示法を提案する。

第5章 電気触覚による力ベクトル表現

道具の空間的な誘導を行うためには、道具先端に加わる仮想的な力ベクトルの触覚提示が有効である。触覚の場合、道具先端の力ベクトルは把持を行う示指と拇指に加わるベクトルに分解され、指腹部への圧力(触覚分布)として伝わると考えられる。本章では空間透明型電気触覚ディスプレイを用いた触覚分布表現について提案し、各指の腹部に加わる力ベクトルの表現を目指す。次に各指に加わる力ベクトルの線形和が道具先端に加わる力ベクトルとして知覚されるという仮定のもとに、道具に加わる力ベクトルを表現するための方法について提案し、評価を行う。

5.1 触覚分布表現

電気刺激によって指腹部に力ベクトルを提示する方法として、アレイ状の電極の刺激量および刺激パルス頻度に分布を生じることによって触覚の分布を生成する方法が提案されている [53]。しかし、前章で提案した空間透明型触覚ディスプレイではアレイ状の電極を利用することができず、指の両側面に配置した2点の電極のみで触覚分布を生じさせるために、力の大きさと知覚される場所を制御するための手法を考案する必要がある。以下では空間透明型電気触覚ディスプレイで表現可能な刺激に基づいて各指に加わる力ベクトルの表現について説明する。

任意の指の各PPDNを刺激することで提示できる触覚分布は、指の各側面を中心として指の長軸方向に長く伸びる楕円状の分布である。この触覚分布から知覚する力は Fig. 5.1 に示すように、知覚領域の中心から指の内部に向かって伸びる力、或いは指の長軸方向に連続的に力点が並ぶ広範囲の力として知覚されると考えられる。いずれの場合も提示できる力は指の断面に水平な2次元平面上の方向を有するベクトルであると考えられる。従って、理想的には指に加わる力を3次元で表現することが望ましいが、提案する空間透明型電気触覚ディスプレイでは指長軸方向の成分の表現が困難である。しかし、Fig. 5.1 に示すように、指腹部で把持する道具の多くがその形状の連続性から各指の長軸方向に関して一様に接触しており、力の大きさと指の短軸方向のみの触覚分布が生成可能であれば十分であると考えられる。

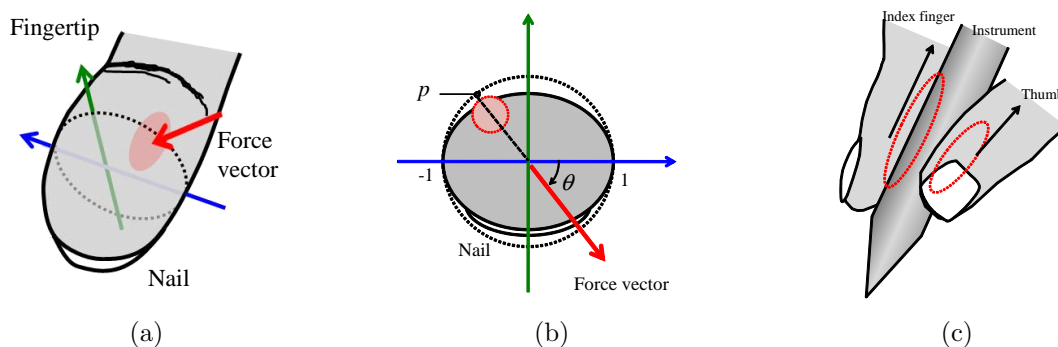


Fig. 5.1: Tactile vector: (a) Perspective view (b) Cross section of the fingertip (c) Continuity of the contact.

5.1.1 大きさ提示

提案する電気触覚ディスプレイは、電流量と刺激パルス頻度の制御が可能である。一方で、電気刺激によって触覚ベクトルの大きさ、つまり感覚強度を変化させる方法として、刺激のパルス頻度による方法と刺激量による方法の二つがある。カベクトル表現における感覚強度の制御として、Satoらは陽極電流と陰極電流でそれぞれパルス頻度と刺激量を利用している [53]。しかし刺激量は安全性や知覚領域に影響を与えるため、感覚強度の制御には刺激のパルス頻度を用いることがの好ましいと考えられる。

刺激のパルス頻度と感覚の強度は、神経の発火頻度と感覚強度の関係に結び付けて考えることができる。神経の発火頻度と感覚強度は線形関係にあるように [27]、電気刺激のパルス頻度が 100 pps 以下においては刺激のパルス頻度と触覚の感覚強度は線形の関係にある [49]。また、提示できる感覚の観点から陰極電流によって生じる感覚はパチニ小体が刺激されることによる圧覚であるとされる。従って、感覚強度を制御可能となれば圧覚の大きさ、つまり指に加わる仮想的な力の大きさを制御することができると考えられる。特に 2 点の刺激電極のうち、パルス頻度の高い方が感覚強度に関係すると仮定することで、指に加わる仮想的な力の大きさ F_t を次式で表す。

$$F_t = W \max[f_1, f_2] \quad (5.1)$$

ただし、 f_1, f_2 は 2 点の刺激電極におけるそれぞれのパルス頻度であり、 W は較正時にユーザごとに設定された比例定数を表す。また、 $\max[f_1, f_2]$ は f_1, f_2 のうち小さくない方を返す関数である。

5.1.2 方向提示

提案する空間透明型触覚ディスプレイはその空間的透明性のために空間的選択性を犠牲にしている。しかし幸いなことに、各指の PPDN は指の両側面に存在しており、それぞれが指の半領域の触覚受容を担っている。従って、どちらの神経を刺激するかを選択することで、最低でも指の短軸方向に関して指の半領域のいずれかの部位に触覚を生成することが可能である。さらに興味深い現象として、2 部位の同時刺激によって両者の間に触覚の像を生じる現象 (Phantom Sensation: PhS) が報告されている。Fig. 5.2 に示すように、PhS は電気刺激によっても生じ、2 点の電極間の感覚強度の割合によって 2 点間のどの部位に触覚を生じるかが決定される [23]。従って、PhS を利用することで 2 点の電極のみで指の短軸方向の触覚提示部位を任意に選択可能であると考えられる。

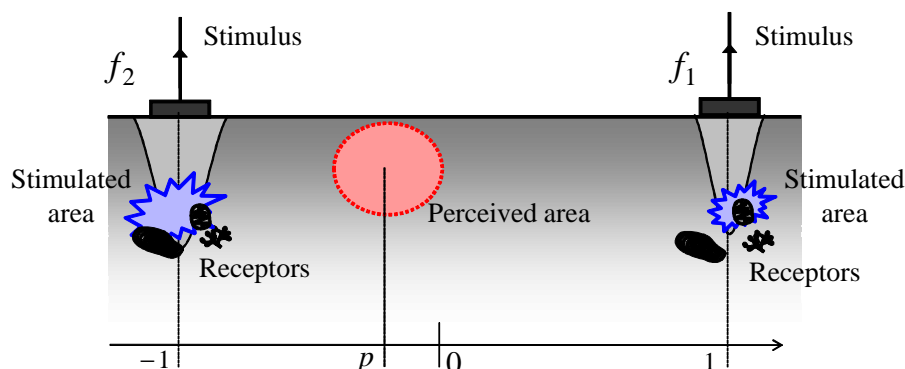


Fig. 5.2: Phantom Sensation: Perceived area is projected between each electrode when two electrodes are stimulated at the same time.

Phantom Sensation の定式化

PhS は 2 点の電極間の感覚強度の比によってどの部位に触覚を生じるかを意味している．前述の通り，感覚強度は刺激のパルス頻度および刺激量で変化させることが可能であるが，感覚の移動量の観点から刺激のパルス頻度による制御が望ましいため，刺激のパルス頻度と感覚強度の関係を利用することで PhS を生じる．Fig. 5.2 に示すように，2 点の電極間の中心を 0 とした座標系で知覚が生じる部位の相対位置 p を定めると，次式で表すことができる．

$$p = \frac{f_1 - f_2}{\max[f_1, f_2]} \quad (5.2)$$

ただし， f_1 および f_2 はそれぞれの電極に与える刺激のパルス頻度である．

指の形状を考慮した方向提示

健常者の各指の指腹部断面はおよそ楕円形状を描いている．PhS によって，触覚を知覚する部位はこの円弧上に存在する．Fig. 5.1 に示すように，力ベクトルの方向は指の断面に水平な平面におけるベクトルとして表現することができる．簡単化のために指の断面を楕円ではなく円で近似を行うことで極座標系における力ベクトル表現を可能にする．以下では，指の断面における知覚の中心点から指の中心点に伸びる線分の方向が，指に提示される力ベクトルの方向であると定義する．従って， θ を指の短軸方向に対して指に加わる力ベクトルが成す角度とすると，以下の式で表すことができる．

$$\begin{aligned} \theta &= -\frac{\pi}{2}(p+1) \\ &= -\frac{\pi}{2}\left(\frac{f_1 - f_2}{\max[f_1, f_2]} + 1\right) \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.2 道具の把持による力ベクトルの合成

ヒトは道具に加わる力ベクトルを道具を介した触覚によっても理解することができる．道具に加わる力ベクトルは，把持部の皮膚に加わる力分布に変換され，触覚情報として脳に伝達される．脳内では，腱や筋肉による固有受容感覚や視覚と触覚を統合することによって，道具に加わる力を推定している．つまり，各把持部に加わる力ベクトルは視覚などの情報に基づいた座標変換によって一つの座標系に統合され，道具に加わる力ベクトルとして知覚されると考えることができる．また，拇指はその腹面を示指の側面に向けて接続されている手の形状を有することから両者の間で座標系が大きく異なり，それぞれの基底ベクトルは一次独立であると考えられる．従って，各指の座標系で表現可能なベクトルは 2 次元であるが，両者の線形和によって第 3 方向の基底ベクトルを定義することができ，3 次元での力ベクトルが表現可能となる．以下では示指と拇指の相対位置関係を考慮することで変換行列を求め，各力ベクトルを合成して一つの力ベクトルとして表現するための手法について説明する．

5.2.1 力ベクトルの合成

道具の把持は一般的に拇指と示指の指腹部によって行われ，中指の側面が道具を支持する形で添えられる場合が多い．拇指と示指が Fig. 5.3 に示す位置関係にある場合の道具に働く力ベクトルの表現について考える．それぞれの指の座標系における力ベクトルを $\mathbf{F}_{\text{thumb}} = (F_{x_{\text{thumb}}}, F_{y_{\text{thumb}}}, 0)$ ， $\mathbf{F}_{\text{index}} = (F_{x_{\text{index}}}, F_{y_{\text{index}}}, 0)$ ，それぞれの座標系から道具の中心の座標系への変換行列を ${}^{\text{thumb}}\mathbf{T}_{\text{tcp}}$ ， ${}^{\text{index}}\mathbf{T}_{\text{tcp}}$ とすると，合成された力

ベクトル $\mathbf{F}_{tcp} = (F_{x_{tcp}}, F_{y_{tcp}}, F_{z_{tcp}})$ は次式で表わされる .

$$\mathbf{F}_{tcp} = {}^{\text{index}}\mathbf{T}_{tcp}\mathbf{F}_{\text{index}} + {}^{\text{thumb}}\mathbf{T}_{tcp}\mathbf{F}_{\text{thumb}} \quad (5.4)$$

各指に加わる力ベクトルおよび道具に加わる力ベクトルは全て 3 次元列ベクトルであり, それぞれ未知数と既知数である . 一方でそれぞれの変換行列は 3×3 の回転行列であり, 道具の持ち方に依存したパラメータとなる . 各指に提示可能な力ベクトルはその断面に平行な面内 (z 成分が 0) で表される 2 次元ベクトルであるが, 両者の相対位置関係を利用することで提示可能な力ベクトルを 3 次元に拡張することができる .

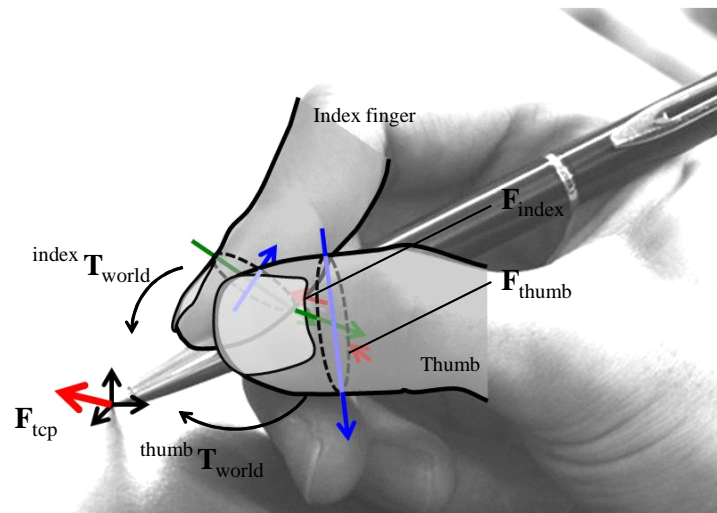


Fig. 5.3: Synthesized tactile vector: Each tactile vector is synthesized based on the posture of the finger.

5.2.2 道具の把持と指の相対位置関係

拇指と示指の相対位置関係を利用することで 3 次元の力ベクトル表現が可能であることを確認するために, 道具把持時における指の位置関係のモデル化を行う . Fig. 5.4 に示すように, 拇指は示指の側面に腹を向ける状態に位置し, 長軸は約 $\pi/4$ rad 傾いている . また, 把持部を正面から観察すると, 短軸は $3\pi/2$ rad 傾いて位置していることが確認できる .

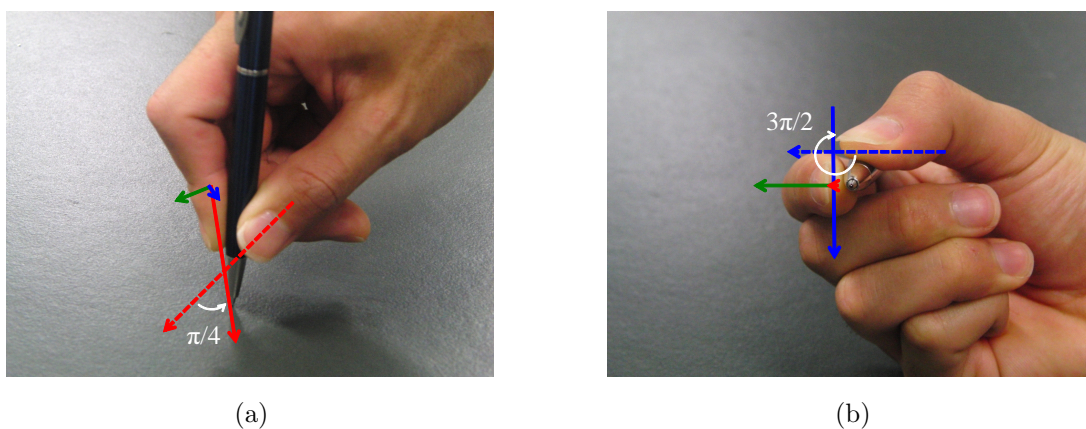


Fig. 5.4: Relative position of the index finger and thumb: (a) Side view. (b) Front view.

把持部の観察および複数視点の画像に基づいた定量的な評価から, 拇指の座標系は示指の座標系におい

て, x 軸に $\pi/4$ rad, y 軸に 0 rad, z 軸に $3\pi/2$ rad 傾いて位置していると考えることができる. 従って, 拇指から示指への変換行列 ${}^{\text{thumb}}\mathbf{T}_{\text{index}}$ は, 次式で表すことができる. ただし, θ, ϕ, ψ はそれぞれ示指座標系の x, y, z 軸と成す角度である.

$$\begin{aligned} {}^{\text{thumb}}\mathbf{T}_{\text{index}} &= \begin{pmatrix} \cos\phi \cos\psi & -\cos\phi \sin\psi & \sin\phi \\ \cos\theta \sin\psi + \sin\theta \sin\phi \cos\psi & \cos\theta \cos\psi - \sin\theta \sin\phi \sin\psi & -\sin\theta \cos\phi \\ \sin\theta \sin\psi - \cos\theta \sin\phi \cos\psi & \sin\theta \cos\psi + \cos\theta \sin\phi \sin\psi & \cos\theta \cos\phi \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1/\sqrt{2} & 0 & -1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} & 0 & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.5)$$

従って, 合成された力ベクトルと各指の力ベクトルの関係は次式のように書き換えることができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{\text{tcp}} &= {}^{\text{index}}\mathbf{T}_{\text{tcp}} (\mathbf{F}_{\text{index}} + {}^{\text{thumb}}\mathbf{T}_{\text{index}} \mathbf{F}_{\text{thumb}}) \\ &= {}^{\text{index}}\mathbf{T}_{\text{tcp}} \begin{pmatrix} F_{x_{\text{index}}} + F_{y_{\text{thumb}}} \\ F_{y_{\text{index}}} - F_{x_{\text{thumb}}}/\sqrt{2} \\ -F_{x_{\text{thumb}}}/\sqrt{2} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.6)$$

上式より各指に加わる力ベクトルを用いて示指座標系における各基底ベクトルを表現することが可能であるため, 合成された力ベクトルは 3 次元ベクトルで表される. 一方で, 上記の方程式は未知数が四つに対し, 既知数が三つである. 道具に加わる力から解を一意に定め, 刺激を生成するためには既知数を一つ追加する必要がある. ところで, 各指に与えられる力ベクトルの大きさの差が大きいほど, 知覚が容易になると考えられる. また, 実際には指腹部で道具を支えるために短軸方向成分の力よりも指腹部に垂直な方向成分の力を多く受けやすいと考えられる. 従って, 両者の制約条件を追加することで Fig. 5.5 に示すように解領域が制限され, 解を一意に決定することができる. 知覚を考慮した条件式を以下に示す.

$$\begin{cases} F_{x_{\text{index}}} = 0, F_{y_{\text{thumb}}} = F_{x_{\text{tcp}}} & \text{if } F_{x_{\text{tcp}}} \leq 0 \\ F_{x_{\text{index}}} = F_{x_{\text{tcp}}}, F_{y_{\text{thumb}}} = 0 & \text{if } F_{x_{\text{tcp}}} > 0 \end{cases} \quad (5.7)$$

ただし, F_x は式 (5.6) の左側から ${}^{\text{index}}\mathbf{T}_{\text{tcp}}$ の逆行列を乗ずることによって得られる示指座標系における力ベクトルの x 成分である.

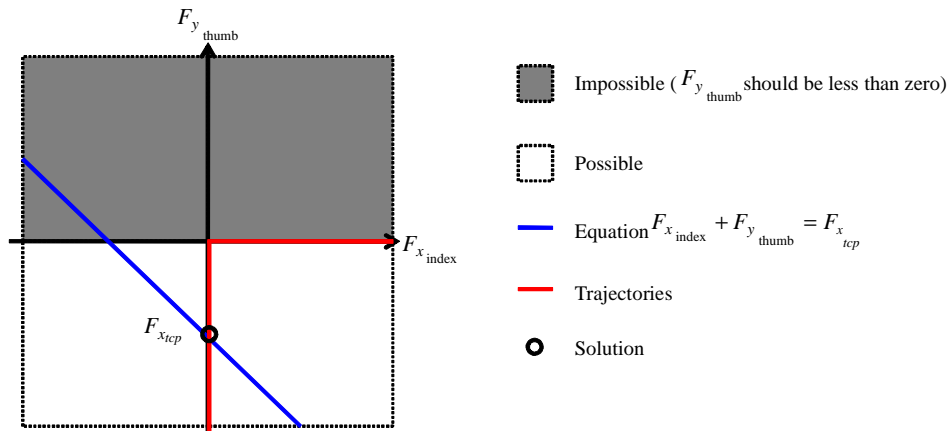


Fig. 5.5: Constrained condition: The solution is the cross point between blue and red lines.

5.3 触覚による力ベクトル提示システム的设计

力ベクトルの提示のためには、各指共に同時に2点の刺激が可能な多点電極の電気触覚提示システムを構築する必要がある。前章で述べた単電極に対し、多点電極化に伴い生じる問題点として、感覚の安定性の低下がある。以下では力ベクトル提示システムの構成について説明し、多点電極化に伴う感覚の安定化手法について述べる。

5.3.1 システム構成

力ベクトルの提示に用いる電気触覚提示システムの構成を Fig. 5.6 に示す。空間透明型の触覚ディスプレイと同様に、システムはコンピュータ部、パルス信号の生成を行う信号生成器、電気刺激を触覚として知覚できる信号に変換する電気刺激回路および電極部から構成される。

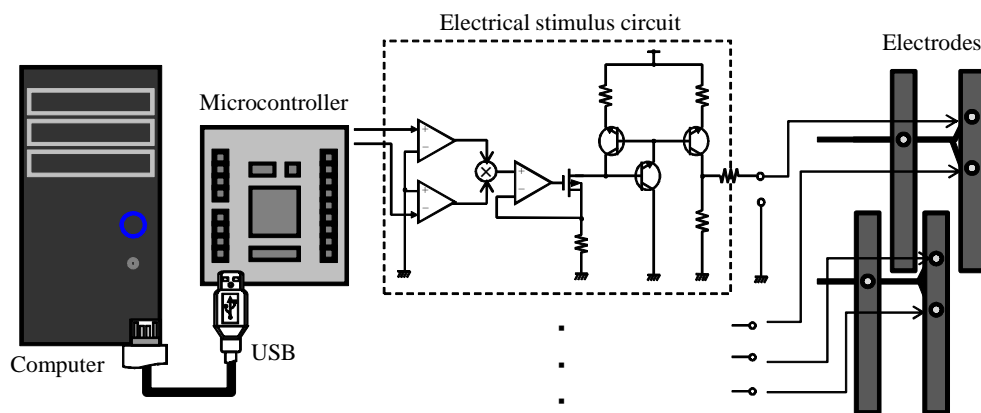


Fig. 5.6: Electro-tactile display system for presenting tactile vector: Pulse generator is controlled by the computer. The pulse will be converted to the electrical stimulus and presented to users with four electrodes.

信号生成器

単電極の場合と同様に任意のパルス頻度のパルス信号を生成するために、コンピュータで指定したパルス周期に基づいてパルス信号を生成する。刺激電極ごとに信号パターンの指定が可能である必要がある。

電気刺激回路

単電極の場合と同様に電気刺激回路を用いて、パルス信号をヒトが知覚できる刺激に変換する。パルス信号は電極ごとに指定するため、電極の数に応じた電気刺激回路が必要である。

電極部

システムで最も重要な要素は刺激電極の構造である。2点刺激電極の構造と装着の様子を Fig. 5.7 に示す。接地電極は示指の基節に、刺激電極である陰極は中節に設置することで感覚の移動の発生および触覚分布の生成を可能にする。特に陰極電極の間隔が重要であり、指の掌側側面に位置するように配置する必要がある。指の中節の幅が 15 mm 程度であることから、刺激電極の間隔を 15 mm に設定している。

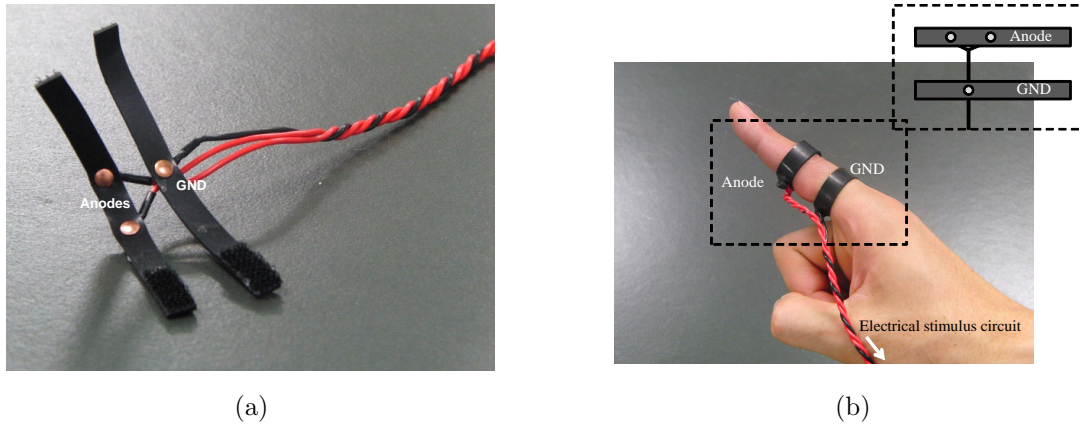


Fig. 5.7: Developed electrodes: (a) Electrodes structure. (b) Appearance of the use.

5.3.2 多点電極条件下における感覚の安定化

多電極化に伴い、刺激電流に関する以下の二つの問題が生じる。

- 同時刺激による通電電流の増加。
- 皮膚抵抗の空間的分布による電流量のばらつき。

前者は人体に同時に刺激を与える際に人体に流れる電流量が増加し、安全性が低下することを意味する。後者は人体の皮膚インピーダンスのばらつきに、場所に応じて流れる電流の量が異なり、感覚強度にばらつきが生じることを意味する。それぞれの問題の解決として、刺激電極の高速スイッチングによる逐次刺激と、電極ごとの刺激量調整による感覚強度の較正手法を提案する。

高速スイッチングによる逐次刺激

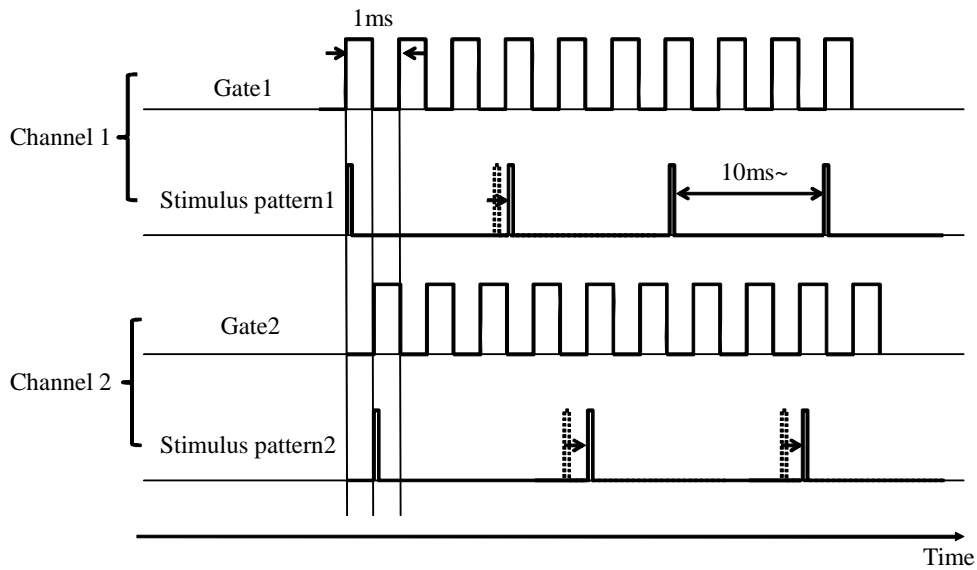


Fig. 5.8: Stimulus timing chart: Each electrodes will not be activated at the same time because of gate pulse voltage.

Fig. 5.8 に示すように、それぞれの電極に対してゲート電圧と刺激パルスを設定し、ゲート電圧が ON のときにのみ電極からの刺激パルスの出力が可能となる。電極が 2 点の場合は、ゲート電圧がそれぞれの電極で交互に ON となるように同期をとることで同時に二つの電極から刺激が出力されることを防止する。また、ゲート電圧が OFF の時に刺激パルスが位置する場合は、すぐ次のゲート電圧が ON となるまで位相をシフトして出力する。従って、ゲート電圧と刺激パルスの周期の関係が重要となる。

ゲート電圧の周期は刺激パルスの周期とパルス幅の中間に設定する必要がある。特に、ゲート電圧の切り替えが遅ければ、正確な周期でパルスを発生することが難しくなるため、ゲート電圧は可能な限り高速に切り替えたほうが望ましい。提案するシステムで扱う電気刺激の場合、刺激パルスの周期は最小で 10ms であり、またパルス幅は一定の $150\mu\text{s}$ に設定するため、ゲート電圧の周期は $150\mu\text{s}$ に近いほど刺激パルスの周期の精度がよくなる。実際には、パルス幅の保障のためにゲート電圧の周期は $200\mu\text{s}$ に設定する。周期の精度は刺激のチャンネル数にもよるが、4 チャンネルの場合 $800\mu\text{s}$ となり、パルス刺激の最短周期よりも十分短いと与える感覚には影響しないと考えられる。

感覚強度の較正手法

感覚強度の較正はコンピュータによる各電極の刺激量の調整および回路全体の刺激量の調整によって行う。コンピュータで指定された刺激量に対応した電圧を、アナログ乗算器を用いて刺激パルスに乗算し、2 点の電極ごとに刺激量を調整可能にする。また各電極の刺激量は、一つの可変抵抗によって同時に制御可能とする。各指ごとに感覚強度の較正は以下の手順で行う。

1. 刺激が OFF となっていることを確認する。
2. 可変抵抗を用いて全体の刺激量を最大にする。
3. 一方の電極に刺激パルス頻度を 100 pps に設定する。
4. 刺激パターンを設定した電極の刺激量をコンピュータの GUI を用いて調整する。
5. 触覚を生じ、指腹部に触覚を感じられる刺激量を決定し、刺激を OFF にする。
6. 他方の電極に関しても同様に、前者と同等の感覚強度に刺激量を調整する。
7. 可変抵抗を用いて全体の刺激量を 0 にする。
8. 両電極の刺激パルス頻度を 100 pps に設定し、全体の刺激量を最大まで増加させる。
9. 両電極の感覚量に偏りがないことを確認し、較正を終える。
10. 感覚量に偏りがある場合は、手順 4 に従ってそれぞれの電極の刺激量の微調整を行う。

また、感覚強度は電極と皮膚の接触状態によっても変化する。皮膚と電極の接触抵抗を実時間で計測することができれば、接触抵抗を一定に保つように刺激量にフィードバックをかけることで感覚強度を保つことが可能であると考えられる。しかし、システムに用いる電極は装着型であるため接触抵抗の変化はほとんど生じないと考え、刺激量のフィードバックによる感覚強度の制御は行わない。

5.4 カベクトル表現の評価

5.4.1 Phantom Sensation による方向提示の評価

示指および拇指に提示するカベクトルの提示に関して、PhS に基づいた方向提示が可能であることを被験者実験によって調べる。実験では、いくつかの刺激の組み合わせについて知覚部位の回答を得ることで、各指の短軸方向に関して正しく方向提示が可能であることを確認する。

実験プロトコル

実験手順は以下の通りである。

1. 電極を指に装着する。
2. 感覚の安定化に基づいた刺激量の較正を行う。
3. 全体の刺激量を 0 となっていることを確認し、刺激パターンの組み合わせを設定する。
4. 刺激量を最大にし、触覚として知覚している全領域を指のモデル図から選択し、回答を行う。
5. 最も感覚量の強い領域をモデル図から選択し、回答を行う。
6. 全ての刺激部位のパターンについて手順 3 から手順 5 を繰り返す。

刺激パターンの組み合わせとして用いるパルス頻度は 0, 25, 50, 75, 100 pps である。従って、刺激なし (両者が 0 pps) の場合を除いた 24 パターンの組み合わせにつき知覚部位を調べる。また、Fig. 5.9 に知覚部位の回答に用いた知覚部位のマップを示す。

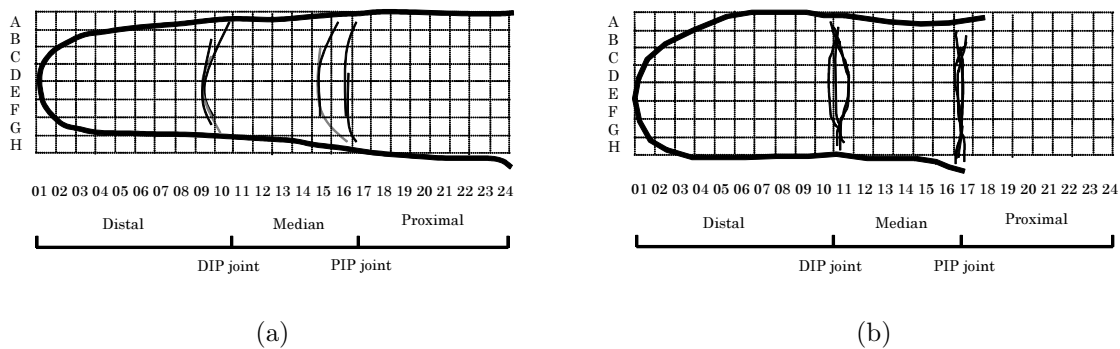


Fig. 5.9: Tactile map: (a) Index finger. (b) Thumb.

実験結果および考察

健康な成人男性被験者 7 人に対して実験を行った。実験中は視覚による刺激のフィードバックは与えず、被験者は指示に従って電流量を調整し回答を行う作業のみを繰り返し行った。全ての試行に対する刺激提示と回答は連続して行い、触覚の順応等による影響は考慮しなかった。PhS を利用した方向提示を確認するために指の短軸方向にのみ注目し、刺激のパルス頻度から計算されるカベクトルの角度 θ_e の絶対値と、実験によって得られた結果から計算したカベクトルの角度 θ_p の絶対値の関係を標準誤差 (標準偏差を被験者数の平方根で除した値) と合わせて Fig. 5.10 に示す。

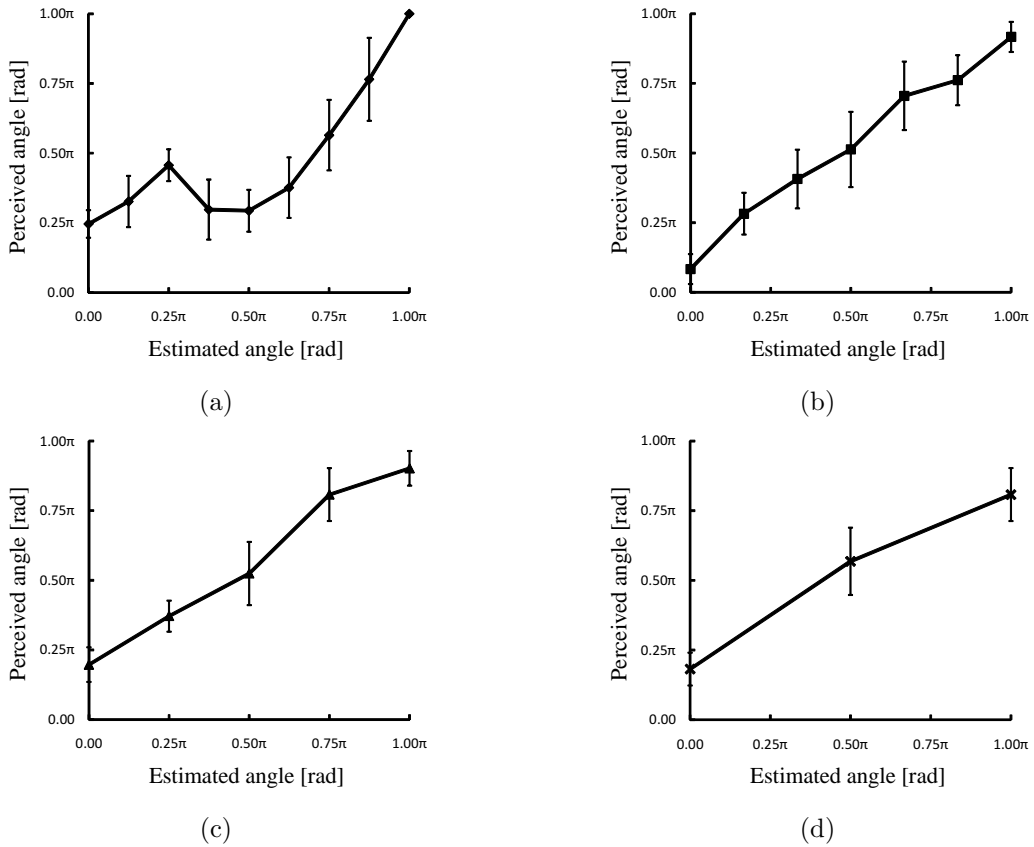


Fig. 5.10: Evaluate phantom sensation: Maximum frequencies of the stimuli are (a) 100 pps. (b) 75 pps. (c) 50 pps. (d) 25 pps.

Fig. 5.10 に示すように、(b)、(c)、(d) において刺激のパルス頻度から計算できるカベクトルの角度と、回答結果から計算したカベクトルの角度の関係に高い相関がみられた。従って、PhS の利用により指短軸方向の位置の選択が可能であることが分かる。また、(a) の刺激の最大パルス頻度が 100 pps においては理想的な直線関係が得られていないが、与える周波数の比率によって知覚部位に変化が生じることから知覚部位の選択が可能であることが分かる。最大パルス頻度 100 pps において理想的な特性が得られない原因としては、パルス頻度に応じた知覚強度が 100 pps 辺りで飽和することが原因であると考えられる。正しい位置にベクトルを提示するためには、パルス頻度が 75 pps 以下の刺激を用いるか、結果により得られた特性から PhS の式に補正を加える必要がある。また、誤差の要因として電極の接触抵抗の変化による刺激量の変化が挙げられる。接触抵抗の変化をより少なくするためには比較的面積の大きい電極を用いて接触領域を増やす、またはゲル状のシートを利用することで接触状態を安定させることが考えられる。

5.4.2 カベクトルの提示可能領域に関する評価

各指に提示できるベクトルは、指の断面に水平な平面の半円空間である。従って、二つの指で表現できるベクトル空間には制限があり、提示可能領域が限定される。このカベクトルの提示可能領域は二つの指の相対位置関係に依存しており、一方の座標系で他方で表現できない方向の成分を補うことで提示可能空間の拡張を行っている。以下では示指と拇指の相対位置関係のモデル化に基づいて両者の間の変換行列を求め、提示可能領域の解析と評価を行う。

提示可能領域の解析

提示可能領域の解析として、示指座標系における合成ベクトル表現について考える。前章で述べたように、拇指は示指座標系の x 軸に $\pi/4$ rad, y 軸に 0 rad, z 軸に $3\pi/2$ rad 傾いて位置しており、拇指の座標系から示指の座標系への変換を行う行列は式 (5.5) で表すことができる。一方、それぞれの座標系において、 y 軸方向のベクトル提示は y が負領域である指腹部に向かう方向の力ベクトルのみ提示可能となる。また、提示可能なベクトルの絶対値の上限が制限されている。以上の条件から、提示可能なベクトル領域の解析を行う。

結果および評価

解析により提示可能領域を Fig. 5.11 に示す。青色領域 B が式 (5.4) を用いて表現可能な二つの座標系が異なる 2 次元ベクトルの合成ベクトルの領域、赤色領域 R が示指と拇指の相対位置に基づいた力ベクトルの表現可能領域を意味する。解析結果より、二つの座標系が異なる 2 次元ベクトルの合成によって 3 次元ベクトルの表現が一部可能となることが分かる。しかし、提示可能な力ベクトルの方向に制限が生じることが確認できる。また、示指と拇指の座標変換に基づいたベクトルの合成により表現可能なベクトルの場合、 B と R におけるボクセル数の比をとることで 10 % の表現が可能であることが分かった。特に示指座標系において、 z の正領域の提示が不可能であり、空間誘導が可能なシステムの構築にはこの領域の制限を考慮したシステム構築が必要となる。逆に提示可能な力の空間内に操作空間を含ませた場合は、領域の制限によらず十分な力ベクトル表現ができる。

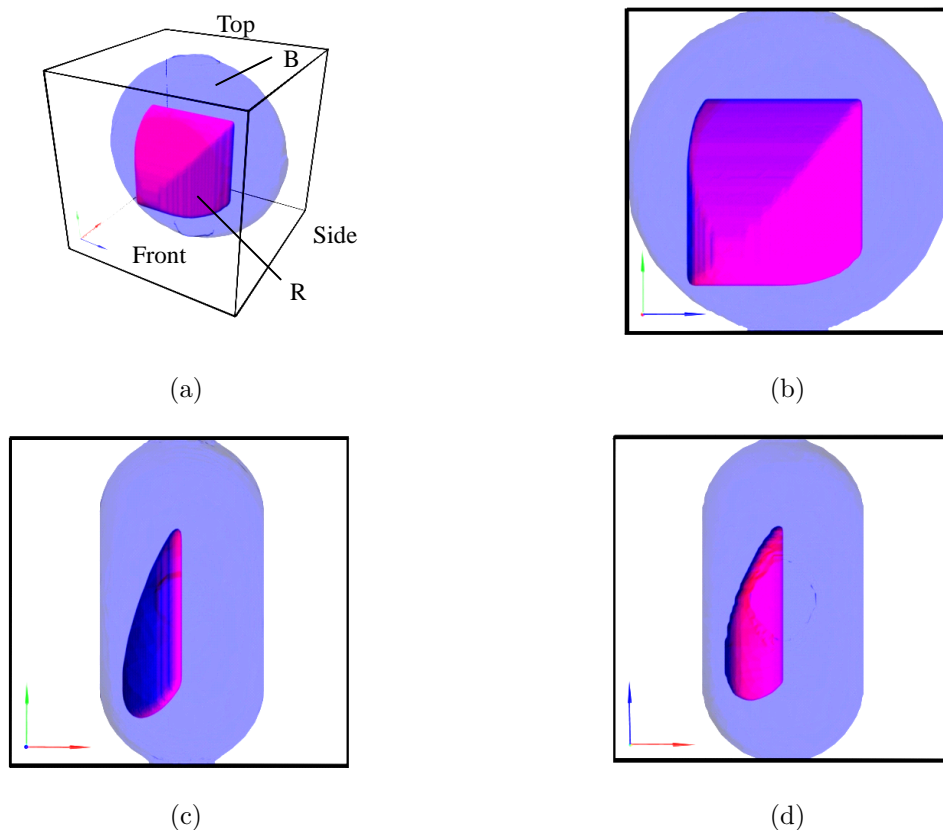


Fig. 5.11: Force vector area: (a) perspective. (b) front. (c) side. (d) top.

第6章 触覚ARナビゲーション

機械加工や外科手術において、道具先端の危険領域回避は重要な問題である。本章では、提案する空間透明型触覚ディスプレイによるカベクトル表現の応用として、仮想物体で表現した危険領域を回避するための触覚ARナビゲーションを構築する。特に、実施前計画に基づいたARナビゲーションという観点からシステムの構成に必要な要素と技術を述べる。

6.1 システム構成

Fig. 6.1 にシステム構成を示す。ユーザは道具を用いて目的の作業を行う。特に実環境では視覚・触覚によって確認できない重要部位領域が存在し、その領域を避けるように道具を動かさなければならない状況を想定している。システムでは事前の計測情報に基づいて決定した重要部位に道具が侵入しないように、仮想的な危険領域との接触を触覚提示によって知覚させる。特に、道具と危険領域の接触状態によって生じるカベクトルを求め、触覚分布として各指に提示することで道具の空間的な誘導を可能にする。

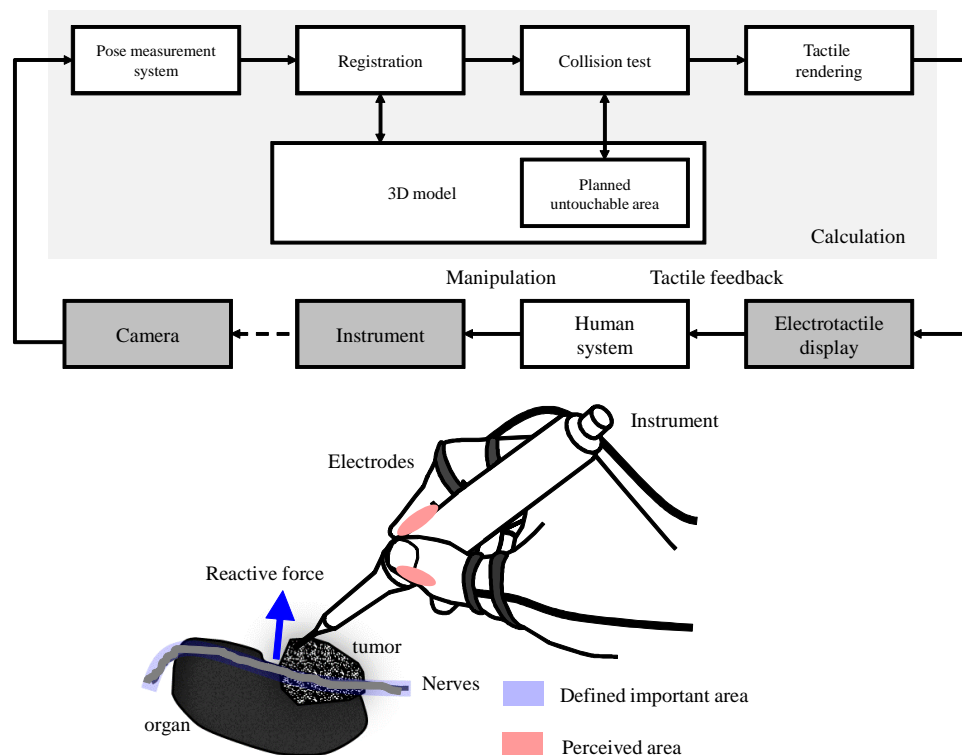


Fig. 6.1: Electro-tactile AR navigation system The system consists of positional measurement unit, tactile rendering and proposed electro-tactile display.

6.1.1 位置合わせ

事前に対象物と道具および指をモデル化し、作業中における道具の位置姿勢に基づいた接触判定を行うことで触覚として提示する力ベクトルを求める。位置姿勢計測は様々な方法が提案されているが、本節では単眼カメラおよびマーカを用いた位置姿勢推定法を用いる [54],[55]。

座標変換

現実環境に仮想環境を重ね合わせるためには、それぞれの環境中に定義された3次元座標系を一致させる必要がある。現実環境における座標系 R と仮想環境における座標系 V の位置合わせについて、剛体位置合わせの手法を以下に示す [54]。

1. 座標系 R における特徴点 (x_{R1}, y_{R1}, z_{R1}) , (x_{R2}, y_{R2}, z_{R2}) , (x_{R3}, y_{R3}, z_{R3}) , (x_{R4}, y_{R4}, z_{R4}) を得る。
2. 座標系 V における特徴点 (x_{V1}, y_{V1}, z_{V1}) , (x_{V2}, y_{V2}, z_{V2}) , (x_{V3}, y_{V3}, z_{V3}) , (x_{V4}, y_{V4}, z_{V4}) を得る。
3. 以下に示す式によって変換行列 T を求めることで、座標系 R から V への変換が可能となる。

$$T = \begin{pmatrix} x_{V1} & x_{V2} & x_{V3} & x_{V4} \\ y_{V1} & y_{V2} & y_{V3} & y_{V4} \\ z_{V1} & z_{V2} & z_{V3} & z_{V4} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{R1} & x_{R2} & x_{R3} & x_{R4} \\ y_{R1} & y_{R2} & y_{R3} & y_{R4} \\ z_{R1} & z_{R2} & z_{R3} & z_{R4} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \quad (6.1)$$

特徴点抽出

二つの異なる座標系を重ね合わせるためには、少なくとも4点の代表点の座標が既知である必要がある。本システムでは特に単眼カメラおよび形状が既知なマーカを用いたトラッキングによって代表点の座標を取得する。特徴点抽出の流れを以下に示す [55]。

1. 単眼カメラにより画像を取得する。
2. 得られた画像を一定の閾値を用いて二値化し、マーカの連結領域および輪郭線の抽出を行う。
3. 得られた輪郭線に対して直線形状を検出する。
4. 直線同士の交差点を算出し、画像内特徴点位置を同定する。

算出された四つの特徴点を用いることで、カメラ座標系からマーカ座標系への変換行列を得ることができる。

触覚 AR ナビゲーションへの適用

触覚 AR ナビゲーションでは、大きく分けて三つの位置合わせが必要となる。一つ目は実環境の道具の位置と仮想環境の道具の位置であり、変換行列を ${}^{tcp}T_{world}$ とする。二つ目は実環境の対象物の位置と仮想環境の物体の位置であり、変換行列を ${}^{object}T_{world}$ で表す。三つ目は現実環境における指と道具の座標系間での位置合わせであり、変換行列を ${}^{tactile}T_{tool}$ で表す。 ${}^{tcp}T_{world}$ および ${}^{object}T_{world}$ は 4×4 の並進も考慮した変換行列であるのに対し、 ${}^{tactile}T_{tcp}$ は 3×3 の回転のみ考慮した変換行列である。

6.1.2 道具の誘導

ベクトルを用いた道具の誘導は大きく二つの方法に分けられる．一つは道具を進めるべき方向に絶えずベクトルを提示し，誘導を行う方法である．ユーザはベクトルを追従しながら道具を動かす，決められた操作を行う．もう一方は，ベクトルの提示により仮想的な侵入不可領域への侵入を定量的に通知し，その侵入量と回避に応じたベクトルを提示する場合である．ユーザが侵入不可領域に道具を侵入させた際にのみベクトル情報が提示される．前者はユーザが操作対象部位の状態を知覚したかに関わらず，ベクトルが提示されるため安全な操作ができるとはいえない．特に外科手術などの場合，操作対象部位の近傍に神経系や血管などの重要部位が多く存在するためにユーザの知覚に応じた操作が重要である．従って，後者の侵入不可領域の設定と回避ベクトルによる接触状態の提示を利用した誘導が有効であると考えられる．また，電気刺激の長期的な提示は順応による感覚量の低下を招くことから，後者による誘導が好ましい．以下では，侵入不可領域の設定と，侵入を回避するための力ベクトル生成について述べる．

力ベクトルの生成

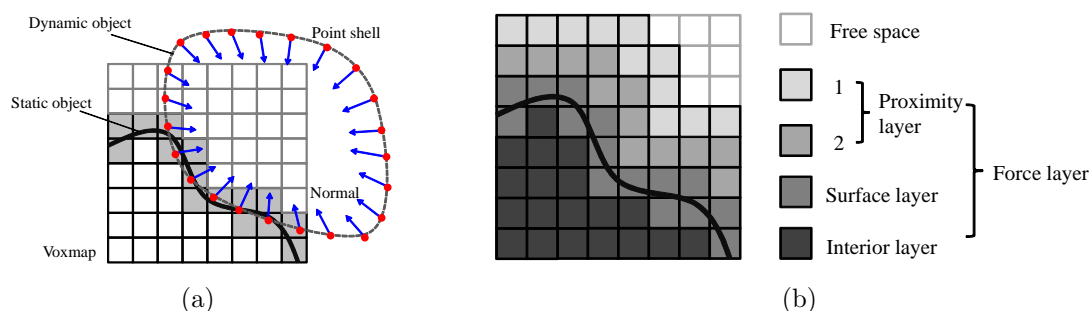


Fig. 6.2: Voxmap-PointShell algorithm: (a) A dynamic object and a static object are represented by “PointShell” and “Voxmap”, respectively (2D image). (b) Each voxel is assigned in the layer, which makes it ease to test collision.

仮想物体と道具の接触によって生じる反力を計算する必要がある．実時間性を重視して，高速な反力計算法である Voxmap-PointShell アルゴリズム [56] を用いて反力の計算を行う．Fig. 6.2 に示すように，Voxmap-PointShell アルゴリズムでは，静的な対象物から Voxmap と呼ばれる 3 次元の力場のボクセルデータを生成し，道具などの動的な物体表面の点との接触を判定することで力の計算を行う．Voxmap には四つの層が数値により定義されており，表面への侵入を防ぐための反力を提示する層 (Force layer)，物体表面を表す層 (Surface layer)，物体の内の層 (Interior layer)，反力層の外側の空間 (Free space) の四つに分類されている．動的な物体は PointShell と呼ばれ，物体の表面の各点の位置に応じた面の法線情報を含ませることで力の方向の計算に用いられる．

計算の手順は以下の通りである．

1. PointShell の点がある位置の Voxmap を参照し，層の情報に基づいて接触を判定する (Voxmap と PointShell の接触判定) ．
2. PointShell の法線を用いて Voxmap の中心点を通る接平面を計算する (接平面を用いた方向決定) ．
3. PointShell の点が平面の内側にあれば，その距離を計算し，力の大きさとする (力の大きさ決定) ．
4. 全ての PointShell 上の点について手順 1 から手順 3 を繰り返す，最終的に合力を求めることで PointShell 全体に働く合力を求める ．

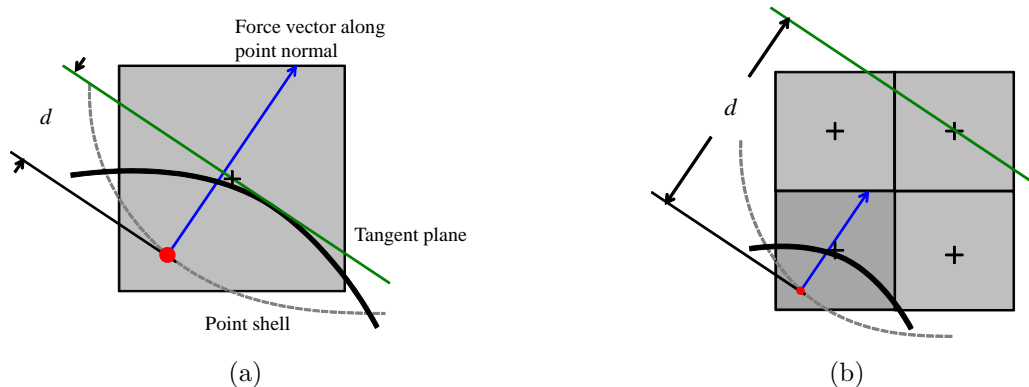


Fig. 6.3: Force vector calculation: (a) PointShell is in the outermost force layer. (b) PointShell goes into the inner force layer.

Fig. 6.3 は 2 次元で表現した Voxmap 中の PointShell に働く力の計算法を示す。Force layer の最も外側のボクセルに侵入した場合、その中心を通る PointShell の点の法線を有した面と PointShell の点の距離が反力の大きさとなり、面の法線方向が反力ベクトルの方向となる。さらに最外層の Force layer よりも内側の層に侵入をした際は最外層のボクセルの中心を通る面と PointShell の点の距離から反力の大きさを決定する。本手法の問題点は計算される力の不連続性であるが、ボクセルサイズを小さくする、または Force layer を適切に設定することで解決することができる。

Voxmap の生成

Voxmap は仮想物体の表面データを用いることで以下の手順で生成する。また、三角形平面とボクセルの接触を判定するアルゴリズムには Tomas らの Fast 3D Triangle-Box Overlap Testing [57] を用いる。

1. 仮想物体を包括する空間の分割数を指定し、格子状に区切る。
2. 全てのボクセルに関して、物体表面との交差を判定し、曲面を含むボクセルを表面層として設定する。
3. 空間の末端から逆の末端まで、バックトラッキングにより表面層の探索を行い、表面層のボクセルを見つけるまでの部位を自由空間に設定していく。
4. 表面層を線形に拡大して自由空間側へ膨張させることで、反力層を設定する。
5. 残った領域を物体の内部空間とする。

PointShell の生成

PointShell は Voxmap 同様に仮想物体の表面データを用いることで以下の手順で生成する。特に表面データが 3 角形平面で表されていることを前提としている。

1. 仮想物体を包括する空間の分割数を指定し、格子状に区切る。
2. 物体表面を含むボクセルの中心位置を仮想物体の表面状の点として設定する。
3. 平面の法線ベクトルに -1 を乗じたベクトルをその点の PointShell の法線とする。
4. 全ての平面に対して手順 2 から手順 3 を繰り返す。

6.1.3 触覚提示

Voxmap-PointShell に基づいて計算された力ベクトルは、電気刺激のパルス頻度情報へ変換され、指の中節へと提示される。5章で述べた触覚によるベクトル表現の式に基づいて、求められた力ベクトルから各指に与える電気刺激のパルス頻度情報へ変換する。仮想環境における力ベクトルを $\mathbf{F}_{\text{world}}$ 、仮想環境から示指座標系への変換行列を ${}^{\text{world}}\mathbf{T}_{\text{index}}$ とすると示指座標系における力ベクトル (F_x, F_y, F_z) は次式で表される。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = {}^{\text{world}}\mathbf{T}_{\text{index}}\mathbf{F}_{\text{world}} \quad (6.2)$$

示指と拇指の相対位置関係を考慮することで得られる力ベクトルと触覚ベクトルの関係式 (5.5) より、各指の力ベクトルの成分は次式で表される

$$\begin{cases} F_{x_{\text{index}}} = 0, & F_{y_{\text{thumb}}} = F_x \text{ if } F_x \leq 0 \\ F_{x_{\text{index}}} = F_x, & F_{y_{\text{thumb}}} = 0 \text{ if } F_x > 0 \\ F_{y_{\text{index}}} = F_y - F_z \\ F_{x_{\text{thumb}}} = -\sqrt{2}F_z \end{cases} \quad (6.3)$$

各指の極座標系 $(r_{\text{index}}, \theta_{\text{index}})$ 、 $(r_{\text{thumb}}, \theta_{\text{thumb}})$ を力ベクトルの直交座標系の成分で表すと、次式で表される。

$$\begin{cases} r_{\text{index}} = \sqrt{F_{x_{\text{index}}}^2 + F_{y_{\text{index}}}^2} \\ \theta_{\text{index}} = \tan^{-1}\left(\frac{F_{x_{\text{index}}}}{F_{y_{\text{index}}}}\right) \\ r_{\text{thumb}} = \sqrt{F_{x_{\text{thumb}}}^2 + F_{y_{\text{thumb}}}^2} \\ \theta_{\text{thumb}} = \tan^{-1}\left(\frac{F_{x_{\text{thumb}}}}{F_{y_{\text{thumb}}}}\right) \end{cases} \quad (6.4)$$

PhS を表す式 (5.3) を用いて、示指と拇指に与える刺激のパルス頻度 $(f_{l_{\text{index}}}, f_{r_{\text{index}}})$ 、 $(f_{l_{\text{thumb}}}, f_{r_{\text{thumb}}})$ はそれぞれ次式で求まる。

$$\begin{cases} f_{l_{\text{index}}} = -Wr_{\text{index}}\left(\frac{2}{\pi}\theta_{\text{index}} - 2\right) & \text{if } \pi \leq \theta_{\text{index}} < \frac{3}{2}\pi \\ f_{r_{\text{index}}} = Wr_{\text{index}} \\ f_{l_{\text{index}}} = Wr_{\text{index}} \\ f_{r_{\text{index}}} = -Wr_{\text{index}}\left(\frac{2}{\pi}\theta_{\text{index}} - 4\right) & \text{if } \frac{3}{2}\pi \leq \theta_{\text{index}} < 2\pi \\ f_{l_{\text{index}}} = f_{r_{\text{index}}} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.5)$$

$$\begin{cases} f_{l_{\text{thumb}}} = -Wr_{\text{thumb}}\left(\frac{2}{\pi}\theta_{\text{thumb}} - 2\right) & \text{if } \pi \leq \theta_{\text{thumb}} < \frac{3}{2}\pi \\ f_{r_{\text{thumb}}} = Wr_{\text{thumb}} \\ f_{l_{\text{thumb}}} = Wr_{\text{thumb}} \\ f_{r_{\text{thumb}}} = -Wr_{\text{thumb}}\left(\frac{2}{\pi}\theta_{\text{thumb}} - 4\right) & \text{if } \frac{3}{2}\pi \leq \theta_{\text{thumb}} < 2\pi \\ f_{l_{\text{thumb}}} = f_{r_{\text{thumb}}} = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6.6)$$

ただし W はユーザごとに較正によって設定される比例定数、である。上式によって求めた刺激のパルス頻度は 0-100 pps となるようにパラメータの調整を行う。

6.1.4 ソフトウェア設計

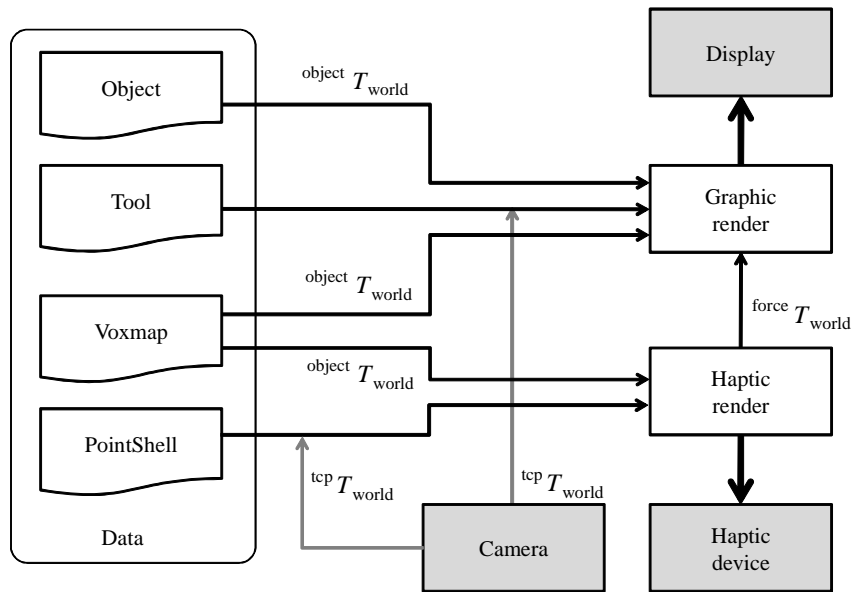


Fig. 6.4: Data structure and flow in tactile AR navigation system: The system consists of three processes which are the visual render, the tactile render and the position measurement process.

処理の流れに関しては、まずカメラにより計測された道具のマーカに基づいて、道具の位置姿勢を推定する。次に事前にモデリング化した対象物と、位置姿勢を推定した道具の位置合わせを行い、道具と危険領域との接触状態を VoxmapPointShell によって計算する。さらに計算によって得られた反力を刺激情報に変換し、空間透明型電気触覚ディスプレイによって触覚分布を生成する。

本システムにおけるデータ構造およびデータの流れを Fig. 6.4 に示す。操作の対象物および道具は実施前計測により 3 次元のポリゴンデータとして取得しておく。さらに両者のデータからそれぞれ危険領域である Voxmap、道具の表面上の点である PointShell のデータを生成しておく。実際のシステムでは、描画、位置計測、触覚の刺激計算を全て別のプロセスで行い、各プロセス間では変換行列のやり取りのみ行う。また、Voxmap-PointShell アルゴリズムは触覚の刺激計算のプロセス中で実装される。触覚提示の十分な更新速度を得るために、複数のプロセスで処理系を構築することでそれぞれの計算を高速化している。

位置計測から取得される道具の座標系から仮想空間の座標系への変換行列 ${}^{tcp}T_{world}$ は描画及び触覚の刺激計算のプロセスへ渡され、描画プロセスでは道具の位置の更新に、触覚計算プロセスでは Voxmap に基づいた接触判定が行われる。触覚計算プロセスで求めた道具に与えるべき力ベクトルから、力ベクトルの座標系から仮想空間への変換行列 ${}^{force}T_{world}$ を渡し、危険回避のベクトルの描画を更新する。

6.2 システム実装

システムの各構成要素の実装を行い，触覚ナビゲーションシステムの構築を行った．システムの実装環境を Table 6.1 に示す．以下では，各段階の実装結果について述べ，最後にシステム全体を統合した結果について示す．

Table 6.1: The specification of the computer

CPU	Intel Core 2 Quad 2.83 GHz
RAM	2.0 GB
GPU	NVIDIA GeForce 9600 GT
OS	Windows XP Professional
Programming Language	C++
Graphics Library	OpenGL
Camera	BWC-130H01(BUFFALO)

6.2.1 位置計測

道具を仮想物体で表現し，Fig. 6.5(a) (b) に示すマーカと単眼カメラを用いた位置計測に基づいて，実際の道具とモデリングされた道具の位置合わせを行った．道具のモデリングには Autodesk Maya 2010 を，カメラの画像の取得には OpenCV を，マーカの検出および変換行列の計算には ARToolkitPlus を用いた．図 6.5(c) (d) に位置計測を行った結果を示す．実際の道具の位置と，仮想的に表現された道具の位置が一致しており，両者の位置合わせが可能であることが目視できる．

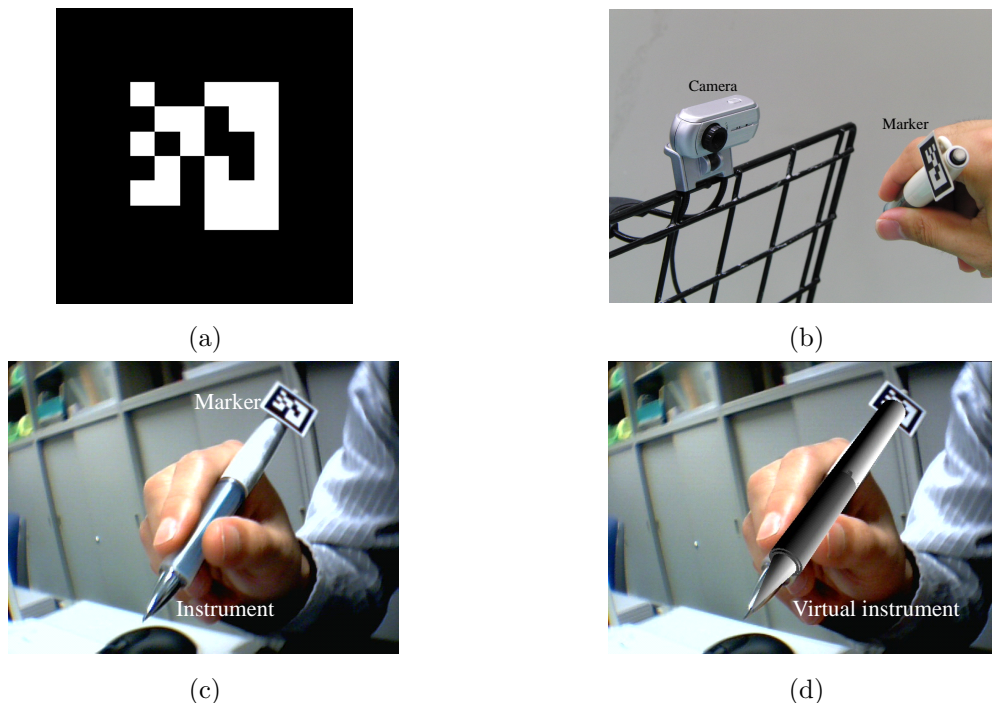


Fig. 6.5: Result of registration: (a) Marker (b) Camera (c) Real environment (d) Augmented environment.

6.2.2 危険回避のための力ベクトル計算

Voxmap-PointShell により仮想物体への侵入に応じた反力の計算を実装した．以下では Voxmap および PointShell の生成，計算された反力について結果を示す．

Voxmap の生成

Voxmap データは 3 次元のポリゴンデータから生成した．また，ポリゴンデータの作成には Autodesk Maya 2010 を用いた．Fig. 6.6 にポリゴンデータから生成された 64 ボクセル四方の Voxmap を示す．同図 (b) において，断面の輝度値は Voxmap のボクセルの値を意味する．また，同図 (c) において，力覚層のボクセルは青色の小立方体で表している．

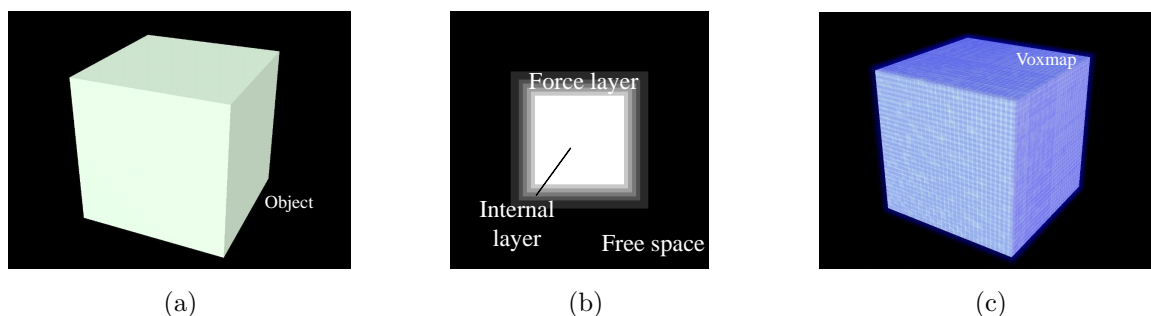


Fig. 6.6: Result of generation of Voxmap: (a) Original object data. (b) Cross section of the box. (c) Result of voxmap in 3D view.

PointShell の生成

PointShell データも Voxmap 同様に道具の 3 次元ポリゴンデータから生成した．Fig. 6.7 にポリゴンデータから生成された PointShell を示す．同図 (b) において，表面上の点が PointShell の点を意味する．



Fig. 6.7: Result of generation of PointShell: (a) Original object data. (b) PointShell.

力ベクトルの生成

道具と対象物の接触により反力計算が可能であることを確認するために生成した Voxmap および PointShell の接触に応じた力ベクトルの可視化を行った．Fig. 6.8 に道具と仮想物体の接触によって生成された反力を矢印で可視化した一例を示す．道具の侵入量に応じて，力ベクトルが大きくなることを確認した．また，値の比較の結果，力ベクトルの方向は対象物の面の法線方向と一致しており，侵入の回避方向の反力計算が正しく行えていることが分かる．

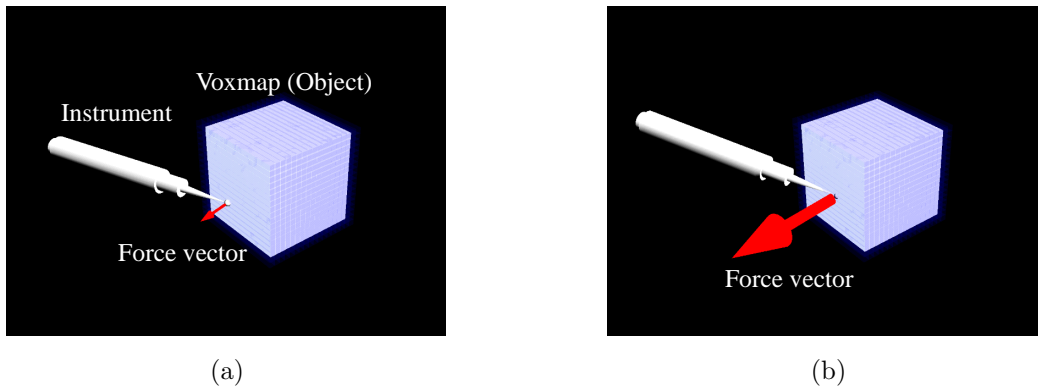


Fig. 6.8: Result of Voxmap-PointShell: (a) When the instrument contacts at left side of the object. (b) When the instrument contacts at top of the object.

6.2.3 触覚提示

電気触覚ディスプレイは回路の電源部・パルス信号生成器・電気刺激回路・電極部から構成される。作製した電気触覚ディスプレイの各構成要素を Fig. 6.9 に示す。回路は 9V の電気駆動とし、USB を用いたシリアル通信によりコンピュータとの通信を行う。電極部は刺激電極間の幅を 15 mm とし、刺激電極と接地電極でそれぞれ別のバンドに取り付けてあり、指への装着を可能にしている。また、作製した電気触覚ディスプレイの仕様を Table 6.2 に示す。コンピュータで指定したパルス頻度および刺激量の波形の出力が可能であることを確認した。刺激波形を計測した結果を Fig. 6.10 に示す。同図 (b) において、出力電圧の波形は皮膚との接触によって変化することが分かる。特に、この電圧の変化は皮膚抵抗の大きさによって変化し、感覚量の較正に重要である。

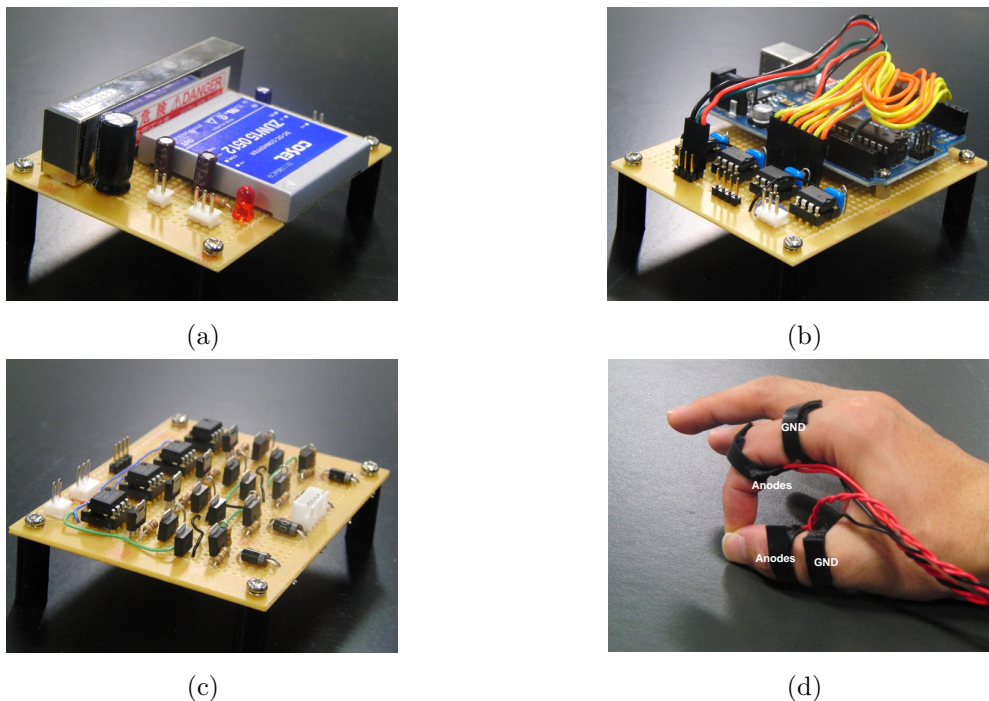


Fig. 6.9: Spatial transparent electrotactile display: (a) Power supply. (b) Pulse generator. (c) Electrical stimulus circuit. (d) Electrodes.

Table 6.2: The specification of the electro-tactile display

Transmission speed	11520 bps
Number of channel	4
Pulse height	-300 - 0 V
Pulse width	150 μ s
Pulse rate	0-100 pps
Resolution (pulse height)	1.17 V/bit
Resolution (pulse rate)	1 pps/bit

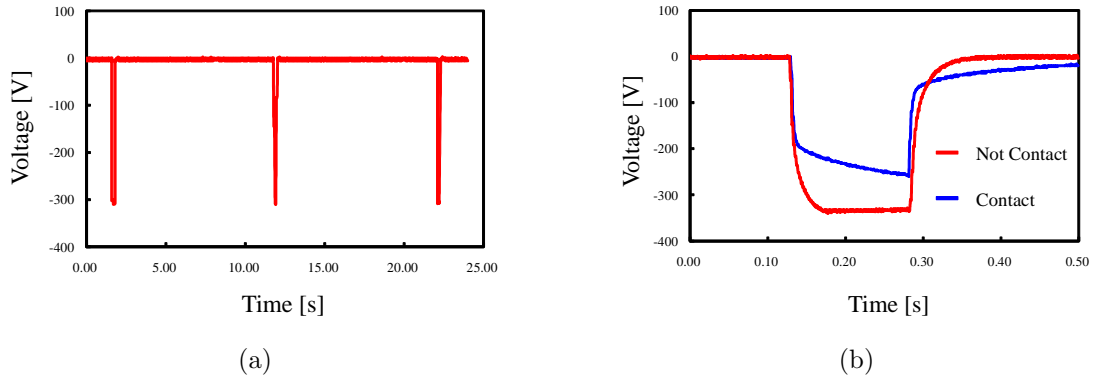


Fig. 6.10: Measured waveform: (a) Wide range of time. (b) One period waveform and the waveform when the electrode is contacting with the finger.

6.2.4 触覚 AR ナビゲーション

構成した各要素を統合することで触覚 AR ナビゲーションを構築した。システムの実装により、実際に力を発生することなく触感のみで仮想物体との接触を知覚させることが可能になった。また、道具の侵入量に応じて、指腹部に加わる触覚分布に変化が生じることを確認した。Fig. 6.11 にシステムの全体像を示す。

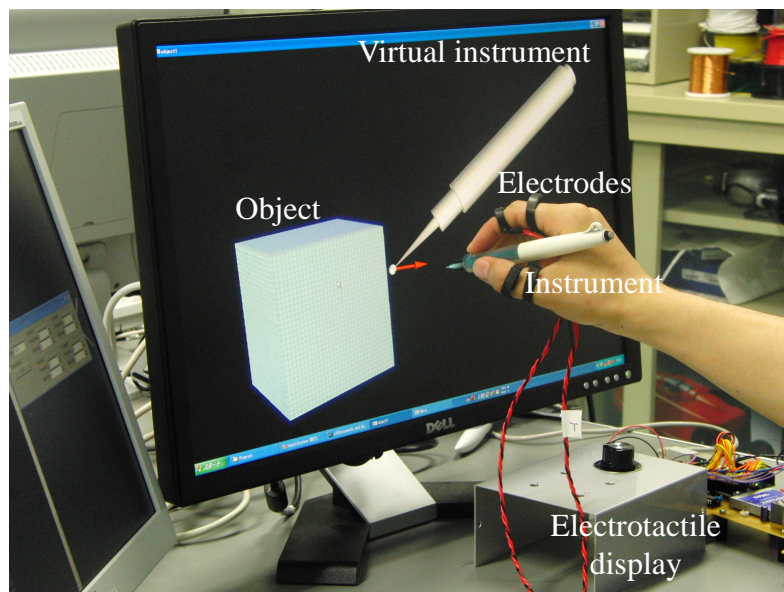


Fig. 6.11: The implementation of tactile AR system: The force vector is presented by the tactile display when users touch the virtual object with the instrument.

6.2.5 考察

変換行列の更新頻度はカメラのフレームレートに依存する．実装では 30 fps(frame per second) のカメラを用いたため，変換行列の更新頻度も 30 Hz 程度であった．視覚においては 30 Hz の描画更新により知覚の遅延は生じないが，触覚においては最低でも 100 Hz 程度の更新頻度は必要であるため十分であるとはいえない [58]．十分な更新頻度を得るためにはフレームレートの高いカメラを用いる必要がある．また，光の反射による安定性が問題である．位置計測の安定性のためにはマーカに用いる材質や周囲の光源を適切に設定する必要がある．

正確な接触判定を行うためには PointShell は対象の表面の点群で構成するべきである．しかし，生成された PointShell は表面近傍の点から構成され，必ずしも対象物表面の点を含むわけではない．従って，PointShell の生成アルゴリズムの改良が必要である．実装した PointShell の生成では空間をボクセルに分割し，面を含むボクセルの中心を PointShell の点に設定しているが，その点から対象物の面におろした垂線が交わる点を PointShell の点の正確な位置として再設定することで問題を解決できると考えられる．

Voxmap-PointShell アルゴリズムによる問題点は，空間の量子化による力ベクトルの不連続性である．力ベクトルの不連続性は Voxmap のボクセルの分解能および PointShell の点群の数にも依存する．両者ともにより数が多いほど精度の高く連続的な力の計算が可能であるが，Voxmap は描画の，PointShell は点の数に応じた力の計算時間を増加させる．また，危険領域への侵入を回避するための力ベクトルの計算には力覚層の厚さが重要である．力覚層への侵入量と力の関係に対応付ける比例定数は力覚層の厚さに応じて決定する必要がある．

6.3 評価実験

触覚 AR ナビゲーションシステムの要件として、(1) 道具の誘導が可能であること、(2) 仮想物体の境界面を知覚できることを挙げた。構築を行った触覚 AR ナビゲーションシステムに対し、両者の評価を得るために基本的な道具操作に関する被験者実験を行った。以下ではそれぞれの実験および評価の詳細を記す。

6.3.1 道具の誘導に関する実験

本実験では、仮想的な力ベクトルを提示することで道具の誘導が可能であることを示す。触覚においては、特に感覚の変化が重要であり、操作に対する感覚フィードバックが誘導を容易にすると考えられる。従って、一定の力ベクトルによって誘導を行う場合と操作者の運動によって力ベクトルが変化する場合について実験を行い、道具の空間誘導に関する評価を行う。また、視覚が誘導に与える影響は大きい、運動制御に与える影響を比較することで触覚が視覚の補助となることを示す。

実験条件 I：対話的な触覚提示なし

いくつかの一定の仮想力ベクトルを提示し、知覚したベクトル方向に道具を移動させることで、その軌跡から知覚した力ベクトル方向と終着地点の評価を得る。特に軌跡の位置計測による誤差を減らすために、0.055 mm の高分解能かつ 1 kHz の高い更新頻度で位置計測が可能な力覚提示装置 PHANToM Omni[59] を用いて操作点の動きを記録することで知覚した方向を解析する。ただし、装置は位置計測にのみ使用し、力覚提示は行わなかった。方向の提示には操作道具の把持が重要であるが、道具座標系と示指座標系の方向が同一となるように Fig. 6.12 に示す把持位置の印を用いて実験を行う。つまり、式 (6.2) における仮想環境から示指座標系への変換行列は単位行列となる。実験手順を以下に示す。

1. 電極を装着し、操作道具に記した把持部を示指と拇指で把持しながら刺激量の較正を行う。
2. ベクトルを表現した矢印を提示する。
3. 操作道具を把持しながら知覚した方向に動かす。
4. 一定の量を移動させ、軌跡の記録を終える。
5. 設定したすべてのベクトルにつき手順 2 から手順 4 を繰り返す。

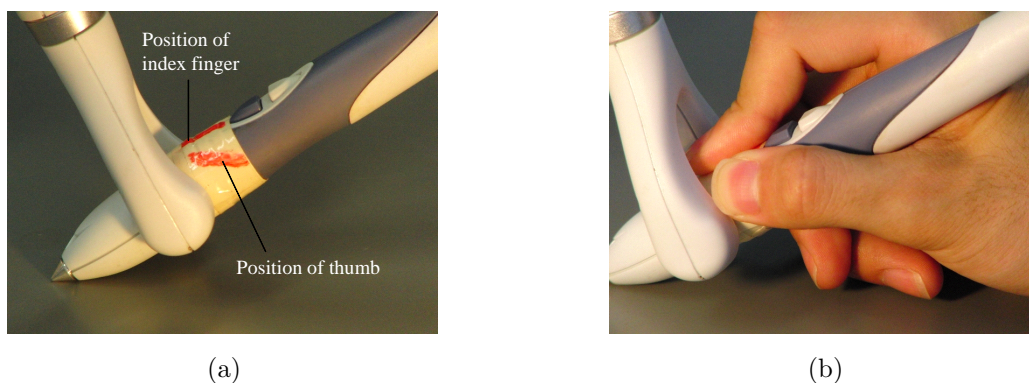


Fig. 6.12: The holding position of the tool: (a) Red lines are holding positions for index finger and thumb. (b) The way of holding tool.

Table 6.3: Candidate of the destination.

Destination	x	y
1	-50	0
2	-50	50
3	0	50
4	50	0
5	50	50

ベクトルの大きさは刺激パルスの頻度が最大で 100 pps となるよう較正し、Table 6.3 に示す位置に向かう方向の力ベクトルの提示を行った。ベクトル方向はモニタ平面上のベクトルに限り（つまり奥行き方向がゼロ）、5.4 節で述べた触覚による提示が可能な方向のベクトルのみ限定している。軌跡の記録の終了を決める操作点の移動量は絶対量で 50 mm とした。また、触覚のみのベクトル表現による誘導の効果を調べるために、視覚効果は与えず触覚のみによる誘導を行った。

実験条件 II：対話的な触覚提示あり

ユーザの操作に応じて提示される力ベクトルを変化させながら道具を正しい方向に誘導させる。実験では仮想空間におけるある終着点と道具の位置を結ぶ仮想的なバネによって生じる力を仮想力ベクトルとして提示することで、ユーザの操作に応じた触覚の変化を生じさせ、変化の情報を頼りに正しい方向へと力覚提示装置の操作点を導けることを調べる。道具の把持に関しては方向知覚に関する実験と同様である。また、実験手順を以下に示す。

1. 電極を装着し、操作道具に記した把持部を示指と拇指で把持する。
2. 刺激量の較正を行う。
3. 終着点からある程度離れた位置に道具の操作点を設定する。
4. 操作を開始し、感覚の変化に基づいて正しい方向に操作道具を誘導する。
5. 操作領域から道具が逸脱すると、軌跡の記録を終える。
6. 設定したすべての終点の位置につき手順 3 から手順 5 を繰り返す。

操作を開始した点を中心とし、開始点から終着点までの距離と力の大きさを関係を表すバネ定数は 0.02 N/mm、さらに力の大きさとパルス頻度の関係を表す比例定数は 50 pps/N とし、Table 6.4 に示す各終着地点について誘導を行った。力の方向は操作点と終着点の相対位置関係によって変化し、距離が近づくにつれて力の大きさは小さくなり、終着点では仮想力ベクトルはゼロとなる。逆に間違った方向に道具を移動させると、提示される力ベクトルは大きくなり、誘導方向が違うことが感覚情報によって知らされる。被験者は提示される力ベクトルがゼロとなるように正しい方向へ随時軌道修正しながら道具を運ぶ。

実験では視覚と触覚の両方について誘導を行った。視覚による誘導には一般的に用いられている矢印を用いた誘導を行い、触覚の場合と同様に道具の軌跡の記録を行った。視覚効果として用いる矢印の例を Fig. 6.13 に示す。また、道具の誘導を行う空間はモニタに水平（地面と垂直）な面上に限定し、100 mm 四方の正方領域を操作の記録を行う領域とすることで記録の終了判定に用いた。

Table 6.4: Destination of the tool.

Destination	x	y
1	-50	0
2	-50	50
3	0	50
4	50	0
5	50	50



Fig. 6.13: Visual effect of force vector: (a) In case of $(F_x, F_y, F_z) = (-1, 0, 0)$. (b) In case of $(F_x, F_y, F_z) = (1, 1, 0)$.

結果 I : 対話的な触覚提示なし

実験は健常者 2 名に対して行い、5 パターンの誘導方向に関する力ベクトルを無作為に提示した際の道具の軌跡を記録した。道具の終着点における x, y 座標の誤差及び誤差 50 mm を超えるまる終着地点に関する結果を誘導の向きとして回答率求め、Fig. 6.14 に示す。多くの場合が 50 mm を超える誤差を有しているのに対し、 x が正方向のベクトル提示で誤差が小さい。つまり、 x が正方向以外で、概して真逆の方向に誘導されていると考えることができる。また誤差 50 mm を超える場合の軌跡を確認したところ、 x で 50 %、 y で 30 % の確率で逆向きに誘導されていることが分かった。

また、記録した軌跡の一部を Fig. 6.15 に示す。Fig. 6.15(b) および (f) のように、正しい向きと逆に誘導された場合が多い。また、提示するベクトルによって誘導された向きが異なることから、それぞれのベクトル間で違いは知覚していることが分かる。

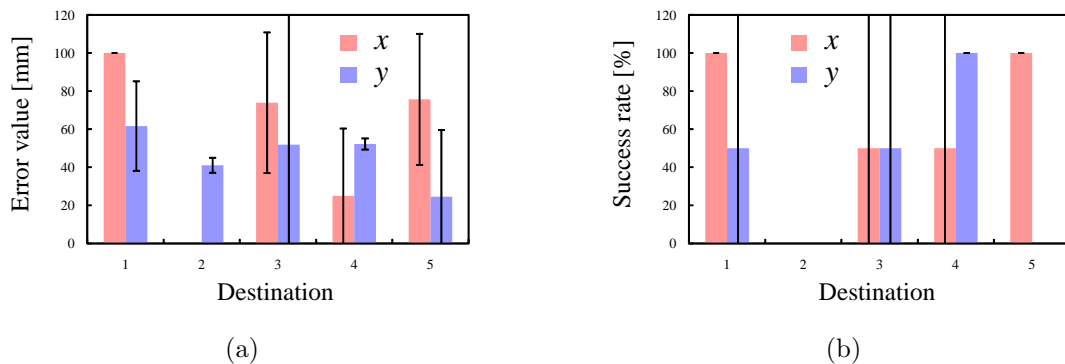
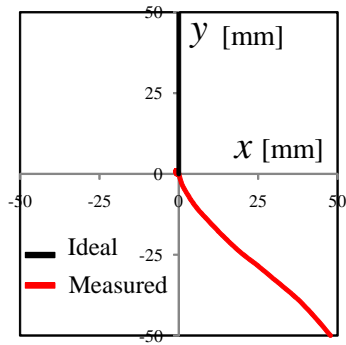
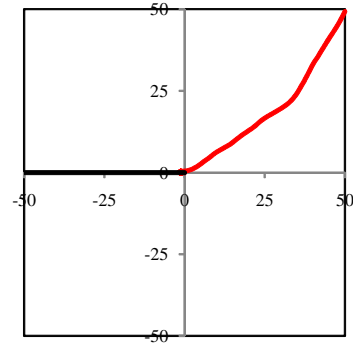


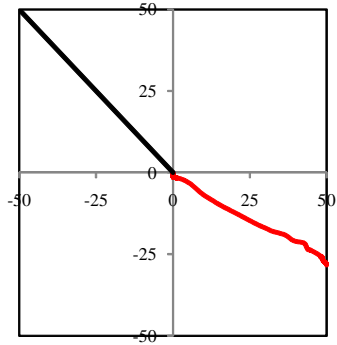
Fig. 6.14: Result of non-interactive navigation: Trial numbers represent each goal position, $(-50, 0)$, $(-50, 50)$, $(0, 50)$, $(50, 0)$, and $(50, 50)$. (a) Error value (b) Success rate (More than 50 mm error).



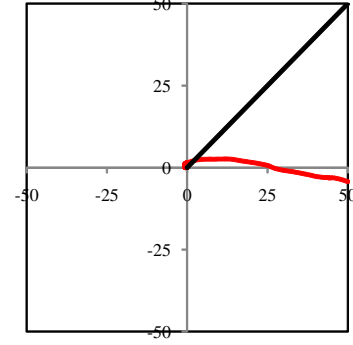
(a)



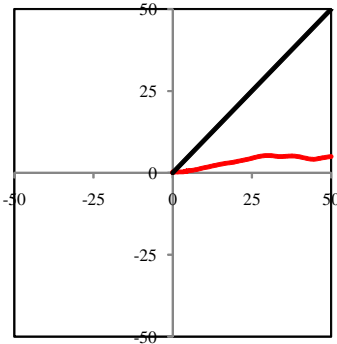
(b)



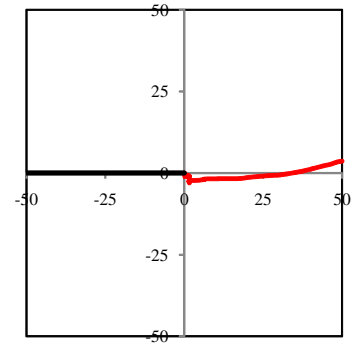
(c)



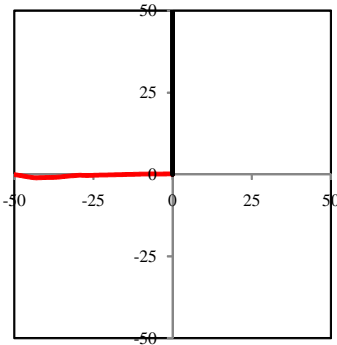
(d)



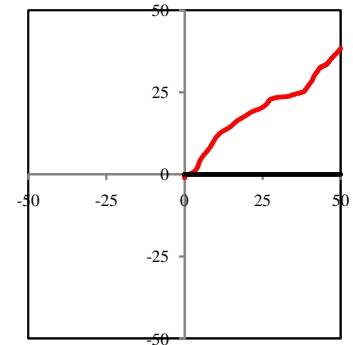
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 6.15: Result of force vector perception: (a)-(d) is the result of subject A, while (e)-(h) is the result of subject B. (a) is in case of Trial 3. (b) is in case of Trial 2. (c) is in case of Trial 1. (d) is in case of Trial 5. (e) is in case of Trial 3. (f) is in case of Trial 1. (g) is in case of Trial 5. (h) is in case of Trial 4.

結果 II：対話的な触覚提示あり

8人の健常者に対して実験を行った．特に被験者にフィードバック情報を理解させるために数回の練習を行った後に実験を行った．五つの全ての試行につき各被験者3セットずつ誘導を行い，結果の解析を行った．Table 6.5 に操作完了までに要した時間の平均および標準偏差を示す．結果より，視覚による誘導よりも触覚による誘導の方が操作を完了するまでに多くの時間を要することが分かる．到達点に関して各被験者で3回の誤差の平均を求め，全被験者間で平均した結果，および誤差を 10 mm 以内として到達点の正答率を求めた結果を Fig. 6.16 に示す．結果より，一部の方向に関しては触覚による誘導が 60 % 程度の正答率あることが示された．一定の力ベクトルを提示した場合と比較すると，真逆の方向に移動させていたベクトル方向についても正しい回答が得られ，フィードバックによる誘導の有効性が示された．

Fig. 6.17 に視覚と触覚におけるいくつかの結果に関して仮想力ベクトルを提示することで誘導された道具の軌跡を示す．視覚は誘導の開始直後から正しい方向に導くことができるが，触覚ではある程度の空間探索の後に正しい方向を見出して操作が達成されることが分かる．また，Fig. 6.18 および Fig. 6.19 に視覚と触覚でそれぞれ x と y 方向の目標値に道具が到達するまでの時間応答を示す．速度の変化から感覚フィードバックによって被験者が道具の操作を微細に制御している様子が確認できる．また，視覚と触覚における運動制御の違いを考察するために，視覚と触覚それぞれのフィードバックによる運動速度の時間に関する離散フーリエ変換を行った結果の一部を Fig. 6.20 に示す．位置計測のサンプリング時間が 5 ms であったため，周波数 100 Hz までのスペクトル解析を行い，絶対値を示している．さらに定量的な評価として視覚と触覚の場合における同一条件のスペクトルの差を求めた結果を Fig. 6.21 に示す．結果のグラフは各被験者ごとに視覚の場合のスペクトルから触覚の場合のスペクトルを差し引いた値を求め，その平均を示している．概して，触覚における周波数成分は視覚よりも高周波のものが多く含まれていることが確認できる．

Table 6.5: Time of completing.

Destination	Time (visual) [s]	Time (tactile) [s]
(-50, 0)	2.12 (0.34)	4.64 (1.48)
(-50, 50)	2.37 (0.40)	6.51 (3.88)
(0, 50)	1.95 (0.49)	6.16 (1.93)
(50, 0)	2.37 (0.32)	7.63 (5.43)
(50, 50)	2.45 (0.46)	6.00 (3.65)

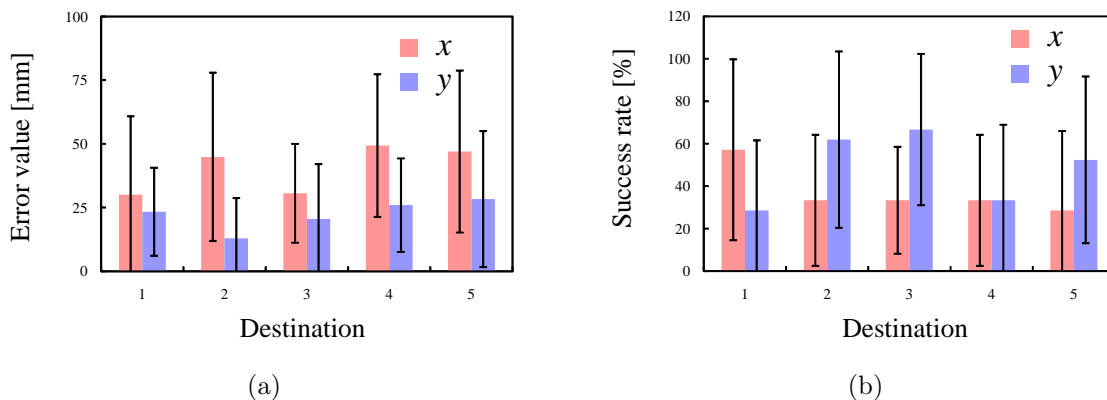
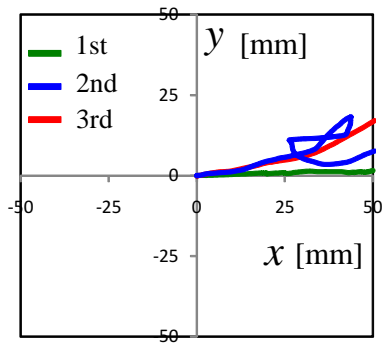
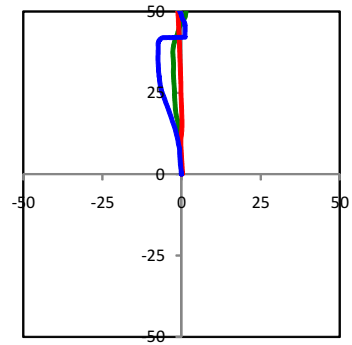


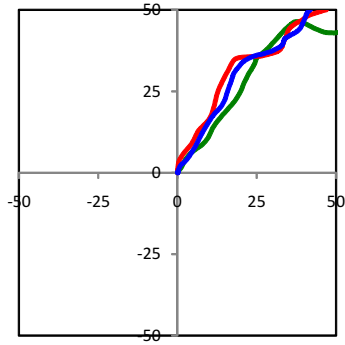
Fig. 6.16: Result of interactive navigation: Trial numbers represent each goal position, (-50, 0), (-50, 50), (0, 50), (50, 0), and (50,50). (a) Error value (b) Success rate (Less than 10 mm error).



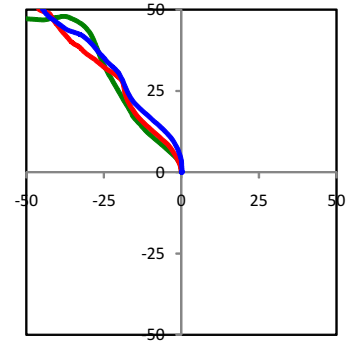
(a)



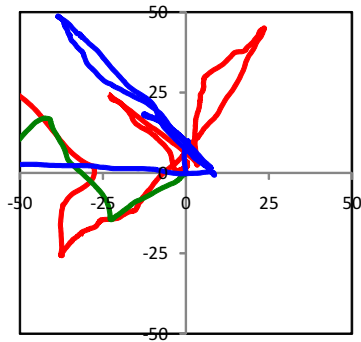
(b)



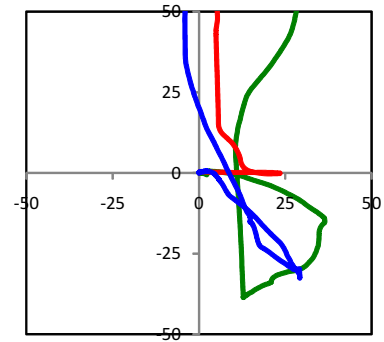
(c)



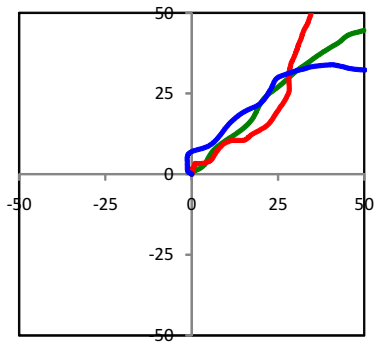
(d)



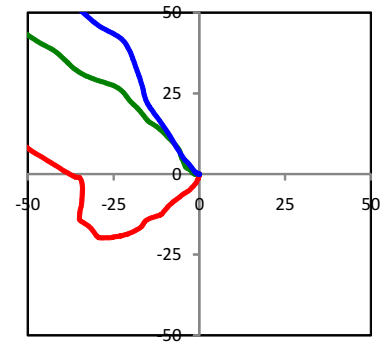
(e)



(f)

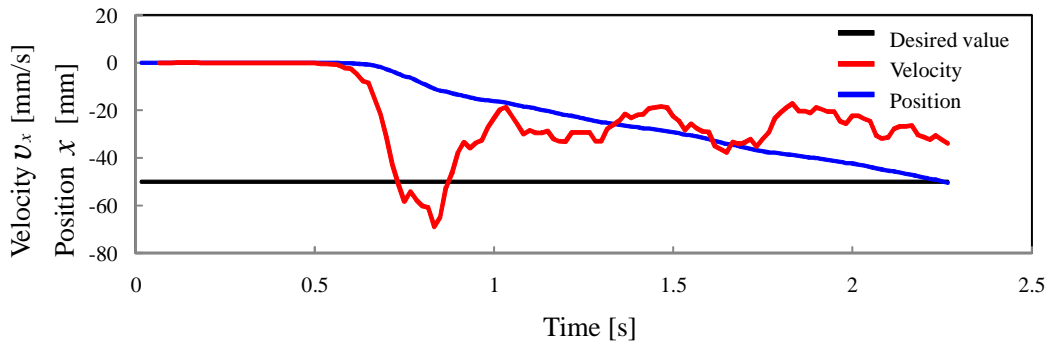


(g)

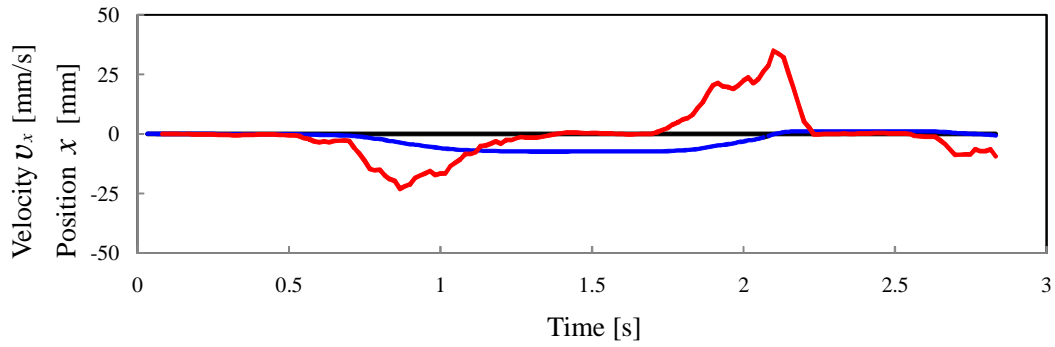


(h)

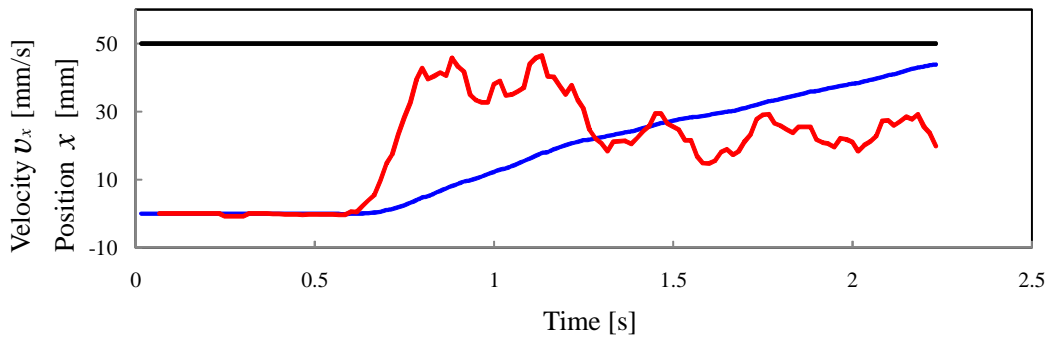
Fig. 6.17: Navigated trajectory: (a)-(d) are visually navigated trajectories while (e)-(h) are tactually navigated trajectories. (a) and (e) are in case of Trial 4. (b) and (f) are in case of Trial 3. (c) and (g) are in case of Trial 5. (d) and (h) are in case of Trial 2.



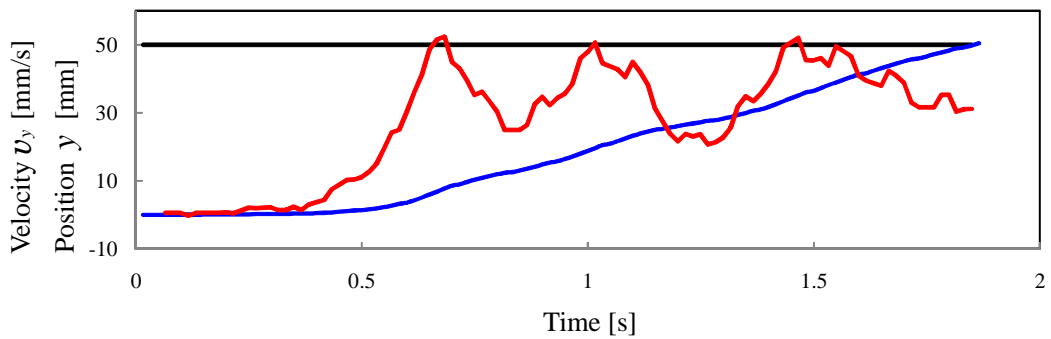
(a)



(b)

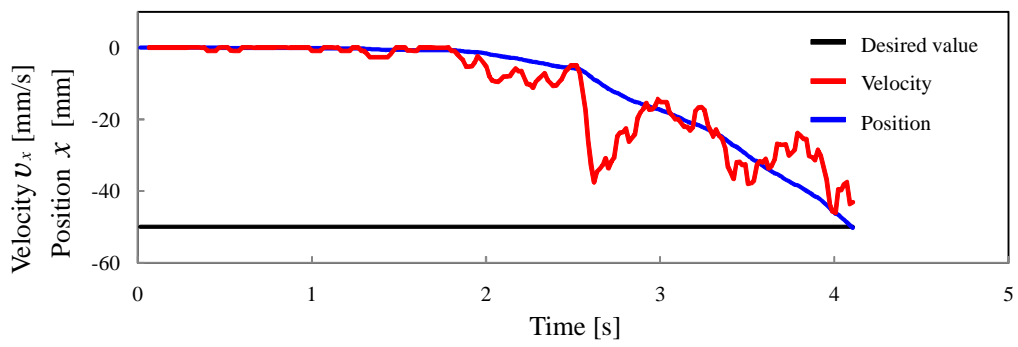


(c)

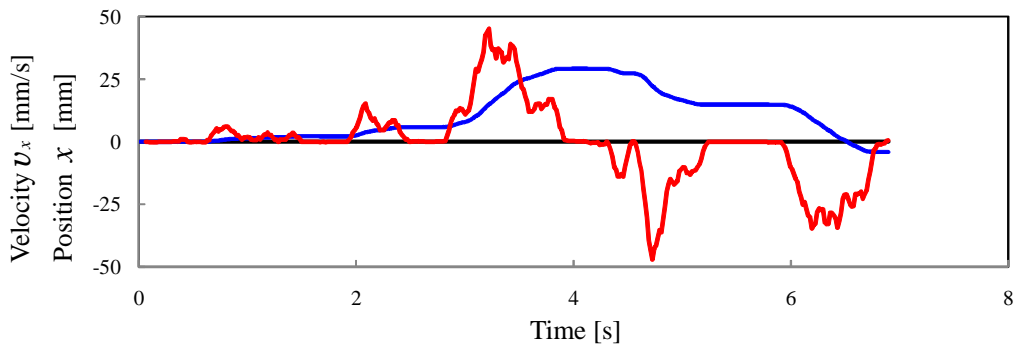


(d)

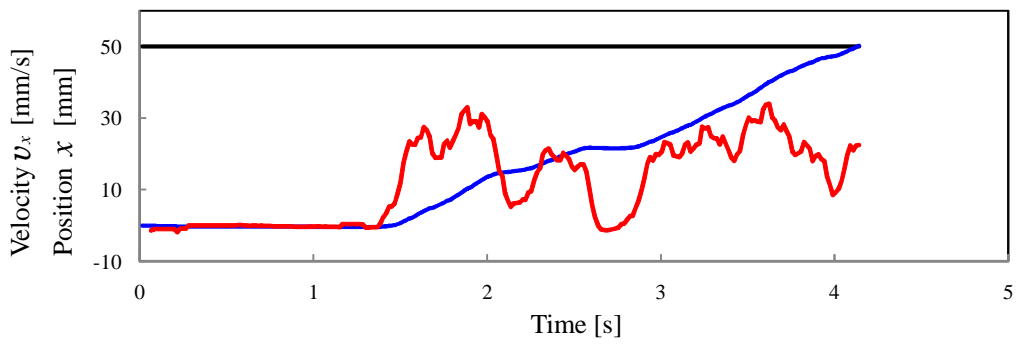
Fig. 6.18: Time response of the visually navigated trajectory: Goal setting is (a) $x=-50$, (b) $x=0$, (c) $x=50$, and (d) $y=50$.



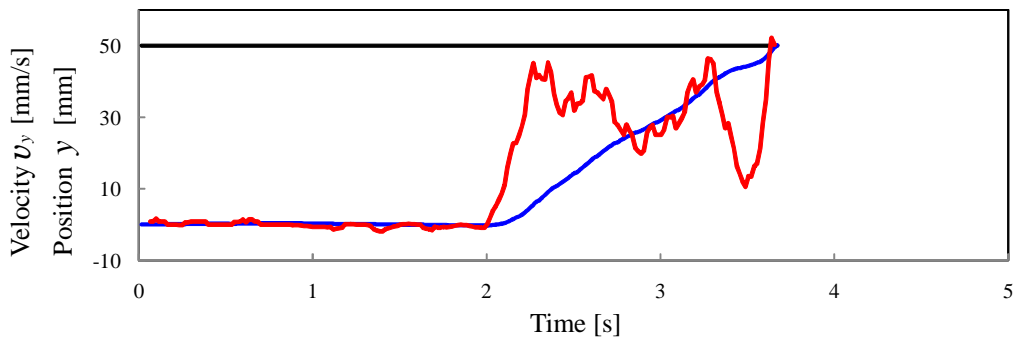
(a)



(b)

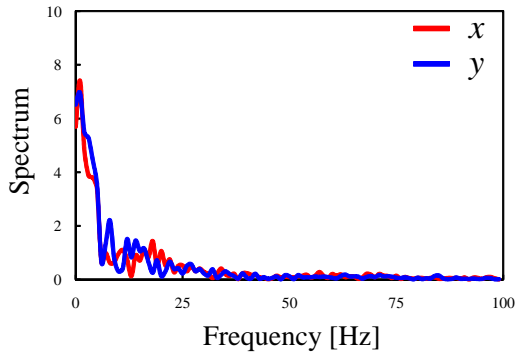


(c)

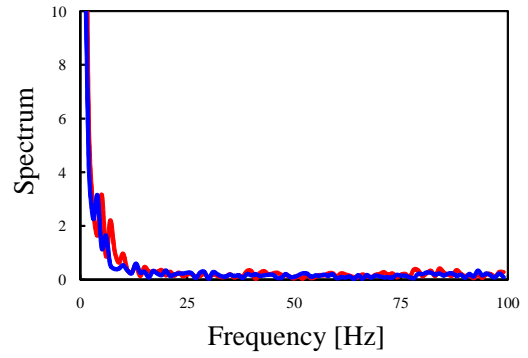


(d)

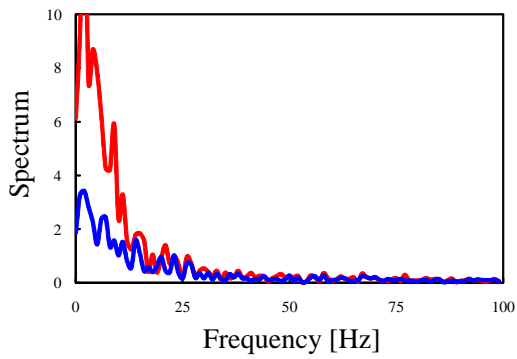
Fig. 6.19: Time response of the tactually navigated trajectory: Goal setting is (a) $x = -50$, (b) $x = 0$, (c) $x = 50$, and (d) $y = 50$.



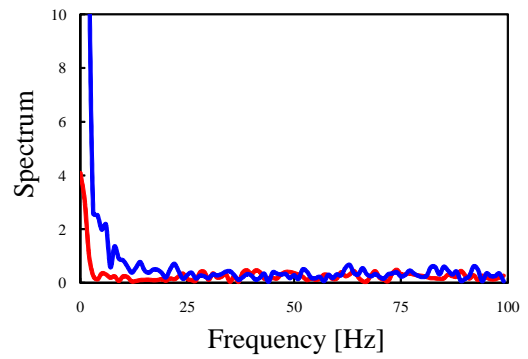
(a)



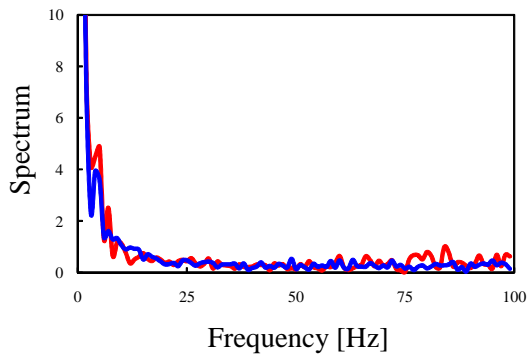
(b)



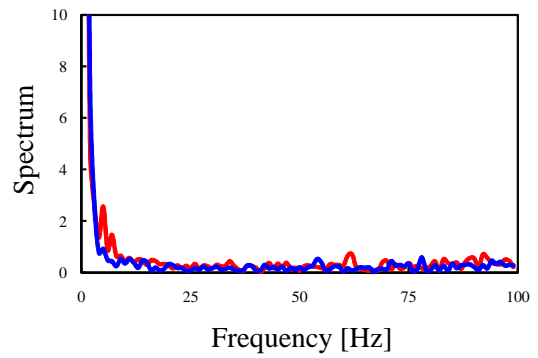
(c)



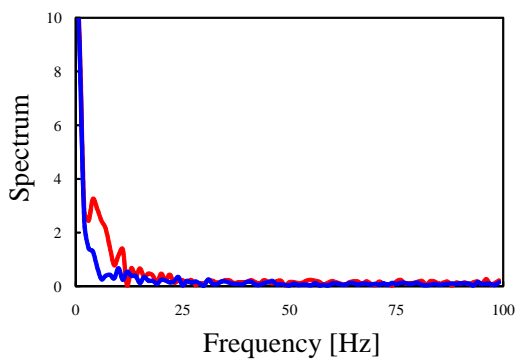
(d)



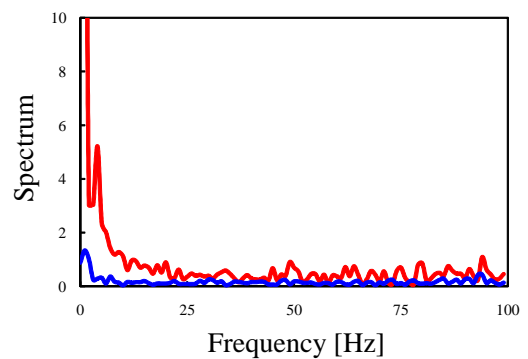
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 6.20: Spectrum of the hand velocity: (a), (c), (e), and (g) is tactually navigated result, while (b), (d), (f), and (h) is visually navigated result. (a), (b) is in case of $(x, y)=(50, 50)$. (c), (d) is in case of $(x, y)=(50, 0)$. (e), (f) is in case of $(x, y)=(0, 50)$. (g), (h) is in case of $(x, y)=(-50, 50)$.

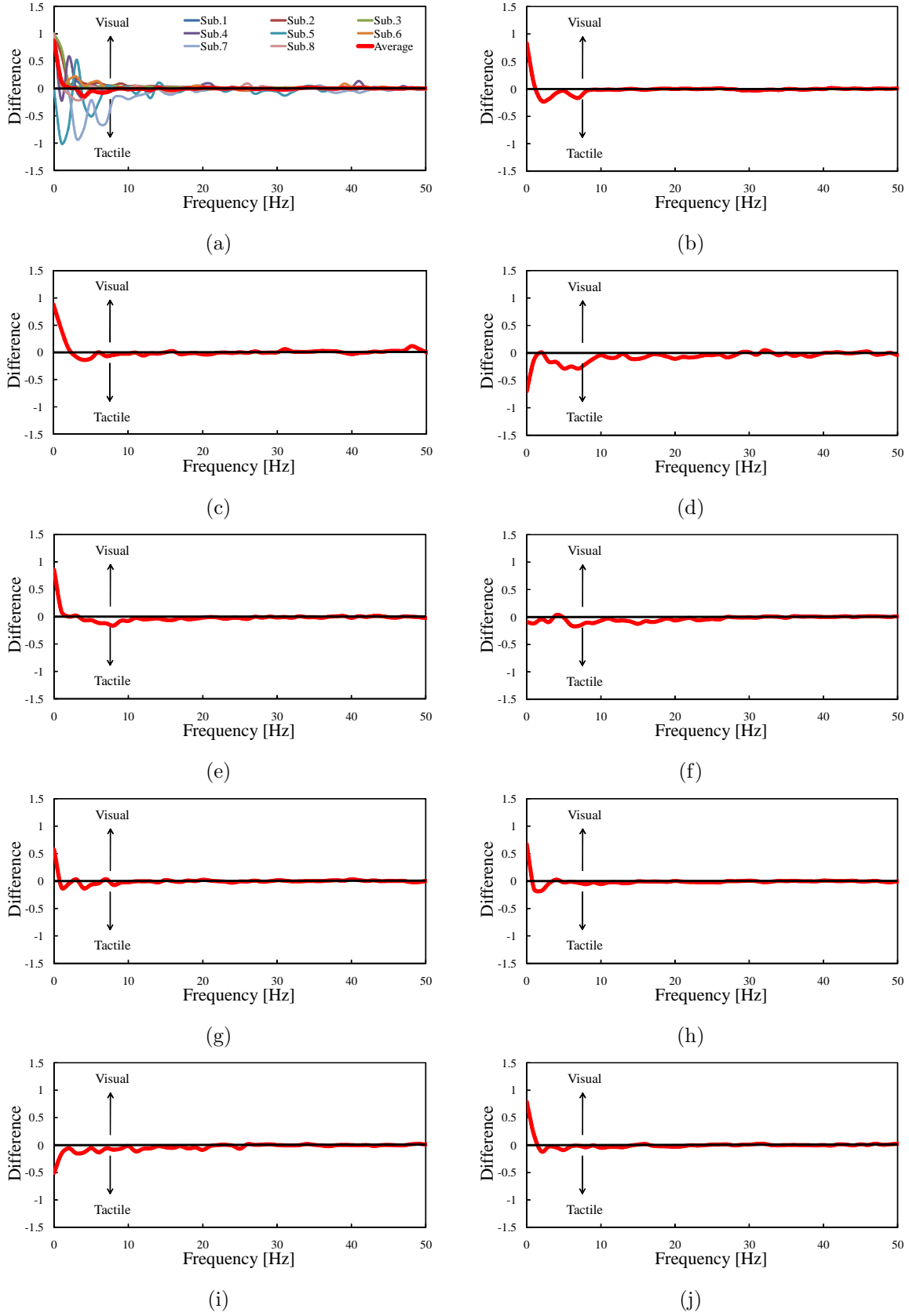


Fig. 6.21: Difference between visual and tactile spectrum: (a), (b) is in case of $(x, y)=(-50, 50)$. (c), (d) is in case of $(x, y)=(-50, 0)$. (e), (f) is in case of $(x, y)=(50, 0)$. (g), (h) is in case of $(x, y)=(50, 50)$. (i), (j) is in case of $(x, y)=(0, 50)$. (a), (c), (e), (g), (i) is x direction, while (b), (d), (f), (h), (j) is y direction.

考察

本実験で得られた結果をまとめ、考察を行う。

(1) フィードバックによる影響

一定の力ベクトルにおいては空間誘導が困難であることが示された。特に一部の方向で提示されている力ベクトルが、牽引を表すか反発を表すか理解できていないために逆向きに誘導されることが分かった。一方でユーザの操作に応じた触覚変化は両者の理解をもたらし、誘導を一部可能にすることが示された。Fig. 6.16 より x が正方向を除き、ベクトルが提示されている（目標の到達場所がゼロではない）場合に高い正答率を示すことが分かる。

一定の力ベクトル提示による方向知覚が困難である理由として考えられる原因は大きく分けて二つ存在する。一つは記憶と学習の要因、もう一つは運動と感覚の要因である。前者に関して、触覚の場合は矢印に相当する概念は存在しない。従って、触覚によってベクトルを表現するためには両者の対応付けを学習させることで正しい方向の知覚が可能になると考えられる。誘導の実験で回数を重ねるごとに精度が高まったのはこの学習のためである。提案するシステムでは空間透明型の触覚ディスプレイを用いることで道具と物体の接触によって生じる把持部の触覚分布を提示し、仮想的な力ベクトルを直感的に知覚させることを狙った。実際に、指腹部に与える触覚分布の違いによって知覚する方向の区別が可能であった。しかし、提示される感覚が牽引力を表すのか反発力を表すのかということ直感的に理解させることは難しいということが分かった。従って、一定の力ベクトルで正しい方向に道具を誘導するためには予め触覚と方向の関係を学習させておく必要があると考えられる。

後者に関しては能動触 [60] という概念が重要になる。能動触とは自らの意志を持って能動的に触ることによって得られる触覚であり、ユーザの意志とは関係なく与えられる受動的な触覚よりも知覚に直接的に影響する。道具の操作においては、道具に加わる力はユーザの操作なしには生じ得ないことから、力ベクトル表現には能動触が重要であることは容易に想像がつく。また、ヒトは触覚の変化に対して極めて敏感であり、特に自らの運動に対する触覚の変化を知覚することで次の運動を制御するというフィードバック系を成していることも、ユーザの操作に応じた触覚の変化が力ベクトルの知覚に重要であることを示している。ユーザの操作の結果感覚の変化が生じないことが方向の知覚を難しくしている。逆に、ユーザの操作に応じた触覚分布の変化を生じさせることで、触覚による道具の誘導が可能になることが示唆された。

(2) 誘導の評価

解析結果から考えられる誘導の評価の指標として、Table 6.5 に示す誘導が達成されるまでの時間、および Fig. 6.16 に示す誘導の精度と正答率が挙げられる。

誘導が完了するまでの時間に関しては視覚に比べ明らかに触覚が不利である。各試行の開始と共に提示される力ベクトル方向を知覚することが難しく、実際に操作を行って初めて方向を理解するために視覚に対して触覚における道具の誘導に長い時間を要したと考えられる。従って、触覚による力ベクトル表現についてある程度学習と訓練を重ねることで、試行の開始とともにベクトル方向を知覚することができ、誘導に要する時間は極端に軽減できると考えられる。

ユーザの操作に応じた力ベクトルの変化によって、およそ正しい方向に道具を導くことができるようになった。特に試行を繰り返すにつれて正解の方向へと近づいていくことが確認できた。従って、触覚においては操作者の運動に応じた感覚の変化が重要であることが示唆される。Fig. 6.16 に示すように、道具の誘導における誤差は x 方向で 50 mm 以下、 y 方向で 25 mm 以下であるが、誤差の主な原因は (1) 刺激の較正 (2) 表現可能なベクトル方向の制限の二つであると考えられる。前者に関して、刺激の較正を正しく行えていない場合は、知覚するベクトル方向が変化し、正しい方向へ誘導する触覚を提示することができ

ない．実験では各被験者ごとに全ての試行の前に一度だけ刺激の較正を行ったのみであるが，試行を重ねるごとに操作と発汗等で電極の接触抵抗が変化し感覚量に変化が生じる可能性がある点が提案する空間透明型触覚ディスプレイの課題である．後者に関しては， y における負方向のベクトル提示ができないために y が正方向以外の場合に誘導の精度が悪くなっている．また，表現可能なベクトル方向に関しては道具と物体の接触によって生じる把持部の触覚分布を有限要素解析等を用いることで正確に解析し，解析結果に基づいた触覚提示を行うことである程度解決できると考えられる．特に受容器活動をも考慮した解析が触覚提示に有効である [61] - [67]．しかし力学法則に基づいた受容器活動解析においては，精度と計算時間のトレードオフが問題となる．

(3) 空間透明性と誘導

Fig. 6.16 に示すように， x 方向に関しては Distination1 以外で著しく正答率が低下しているが，主な違いは拇指の指腹部に触覚が提示されるか否かである．指腹部に垂直方向へのベクトル提示の際に高い正答率が得られることから，基底ベクトルの提示による誘導は有効であるが，ベクトルを合成することによって誘導することが難しいことが示唆される．従って，空間的に道具を誘導するためには，各ベクトル成分を単独で提示することでその精度を高めることが可能であると考えられる．指腹部垂直方向への触覚提示が誘導に有効であることは，空間透明型である必要性を示唆している．Table. 4.4 と合わせて比較すると，感覚の移動量が小さい部位 Pos.7 に刺激が提示される力ベクトルの x 成分が正の領域において，誘導の精度と正答率が低下していることが分かる．従って，示指の拇指側側面に接地する電極においては刺激強度を高め，感覚の移動を確実に発生させることが望ましい．

(4) 制御システムとしての触覚

道具の軌跡の時間応答は，ヒトが明らかに感覚フィードバックをもとに運動制御していることを示している．視覚の場合に 0.5 s 程度の時間で運動を開始するのに対し，触覚の場合は 2 s 程度と運動を開始するまでに時間を要することが分かる．また，触覚の場合においては運動の速度は立ち上がりが緩やかであり，微細に方向を制御しながら目標値に近づけていることが分かる．しかし触覚の場合が高周波成分の振幅が大きく，感覚の変化に敏感に反応して運動を生じていることが分かる．また，周波数解析の結果から視覚と触覚に共通して，軌跡の速度は数 Hz 程度の緩やかな変動を示していることから大まかな方向制御をゆっくりと行い，微量の調整を加えていることが分かる．しかし，両者の決定的な違いとして，周波数成分が 10 Hz 程度の微細な運動変化を生じるか否かである．Fig. 6.21 に示す視覚と触覚の場合のスペクトル差からも，視覚が周波数成分が 5 Hz 以下の運動に寄与するのに対し，触覚の場合は最大で 20 Hz 程度の運動に影響していることが読み取れる．つまり触覚においては，感覚の変化に敏感に反応して運動を生じ，瞬時に運動に反映していることが示唆される．また，同図 (d), (f), (i) の誘導を行わない方向のスペクトル差から触覚が道具操作に影響していることが分かる．この結果は触覚が目標値からの誤差を修正するために働いていることが示唆される．従って，触覚は視覚よりも目標値からのずれを修正する微細な運動制御を得意としており，運動の応答が速いために危険回避などに有効な情報であると考えられる．

6.3.2 仮想物体の境界面知覚に関する実験

仮想的な境界面が認識できることを検証するために、道具を用いた境界面のなぞり操作を行った際の道具の軌跡を計測する。仮想物体の表面を境界面に、内部を重要部位に設定し、物体の境界面と記録されたなぞりの軌跡の誤差及び重要部位への侵入量、さらには操作の経過時間を評価する。

実験条件

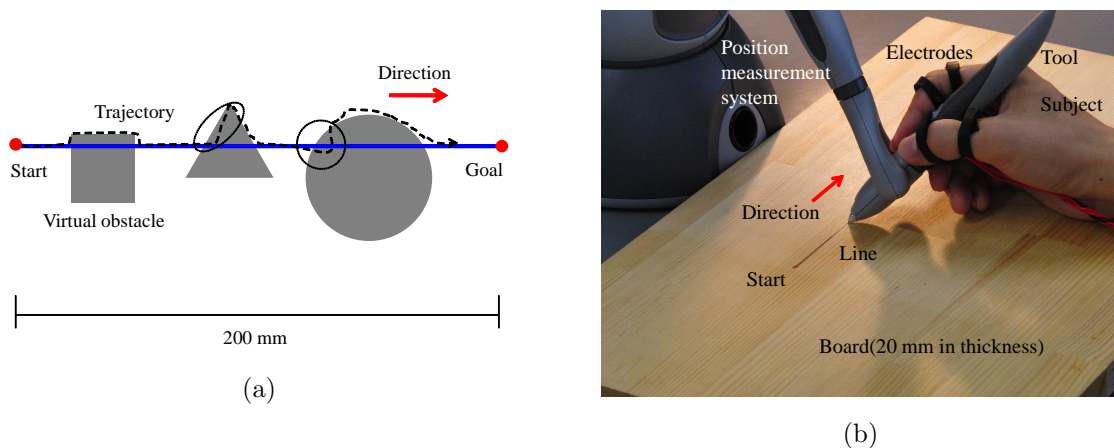


Fig. 6.22: Tracing experiment: (a) Experimental image. (b) The scene of the experiment.

Fig. 6.22 に示すように、2点を結ぶ直線をペンでなぞる際に、途中に配置された仮想的な障害物との接触情報を触覚のみ提示することで、障害物への侵入を防ぐとともにその境界面をなぞることで最短経路を移動させる。操作を行う空間は2次元平面内であるが、物体や提示される力ベクトルは道具の位置姿勢を考慮した3次元情報である。実験手順を以下に示す。

1. 電極を装着し、操作道具を把持する。
2. 刺激量の較正を行う。
3. 始点に道具の先端を接触させ、開始の合図とともに慎重に直線上をなぞる。
4. 接触を知覚すると、板上に道具の先端を付けた状態で物体の境界面をなぞりながら終点を目指す。
5. いくつかの障害物をよけ、終点に到達すると、その試行を終える。
6. 設定したすべての障害物につき手順3から手順5を繰り返す。

ペンの先端と仮想物体との接触によって生じる反力はVoxmap-PointShellアルゴリズムによって計算を行った。Table 6.6に反力計算に関する各パラメータの設定を示す。

Number of voxels (voxmap)	64
Number of voxels (pointshell)	64
Number of force layer	15 voxel
Shape of pointshell	Sphere with the radius 1 mm

障害物に用いた三つの物体を Fig. 6.23 に示す．障害物の大きさとして設定した値は，各物体の底面に関して，円柱が半径 20, 10, 5, 2, 1 mm，正三角柱が一辺 40, 20, 10, 4, 2 mm の，正四角柱が一辺 40, 20, 10, 4, 2 mm である．実験ではそれぞれの物体の中から無作為に一つずつ選び，直線上に 500 mm 間隔で無作為に配置した際の探索を全ての物体が提示される 5 回につき行い，道具先端の軌跡を記録した．また，ペンの重要部位への侵入量とパルス頻度の関係を表す比例定数は 10 pps/mm とした．

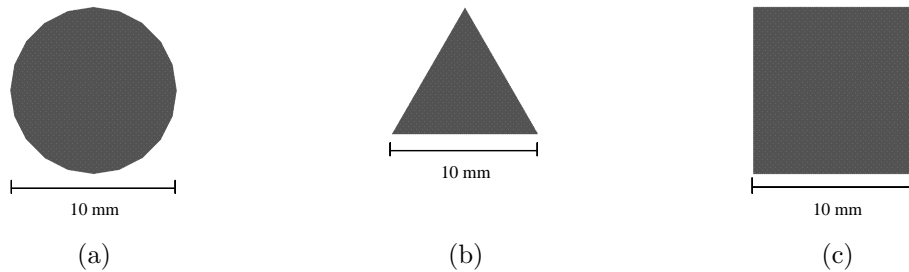


Fig. 6.23: Obstacle patterns: (a) Circle (b) Triangle (c) Square.

実空間と仮想空間の位置合わせのために，操作道具の先端でなぞり操作を行う線分の中心と終着点をそれぞれ指示することで両空間での点を対応付けて変換行列を求める．また，PHANToM によって計測される道具の位置は道具の先端の位置ではない．実際には先端よりも道具の軸上で 40 mm 離れた点を計測しているため，予め両者の関係に対応付ける変換行列を求めておくことで計測位置を道具先端の位置に変換する．

結果

6 人の健常者に対して実験を行い，結果を分析した．Fig. 6.25 に計測された道具の軌跡と，各軌跡の物体への侵入量及び物体表面からの誤差を示す．被験者は仮想物体を認識し，操作に反映していることが分かる．特に大きな形状の障害物に関してはその境界面を正しくなぞることができているが，Fig. 6.25(d) に示すように被験者によっては障害物深部への侵入が確認できる．また，Fig. 6.24 に提示物体の大きさと誤差および侵入量の関係を示す．誤差が提示物体の半径（または一辺の半分）よりも小さい場合は表現が可能であると考えられるため，各物体に関して表現可能な最小の物体の大きさを求めた結果を Table 6.7 に示す．

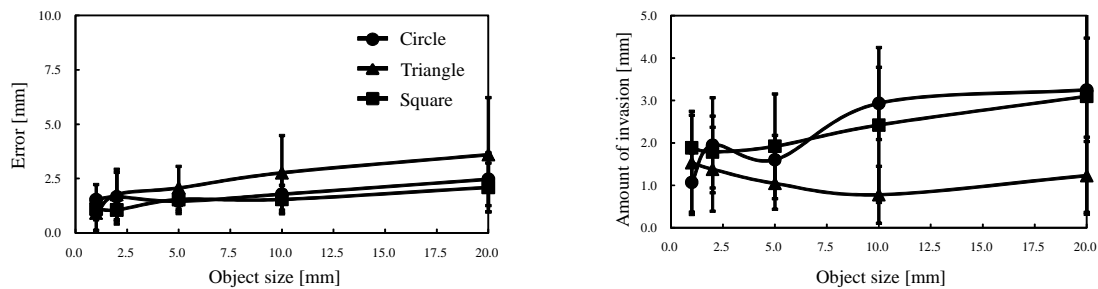
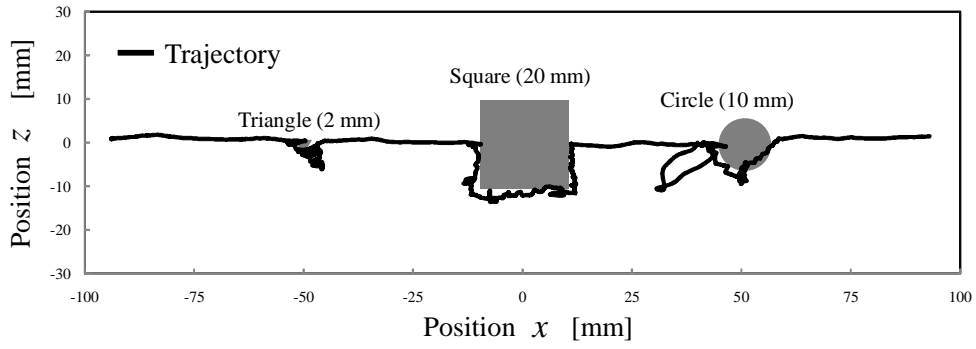
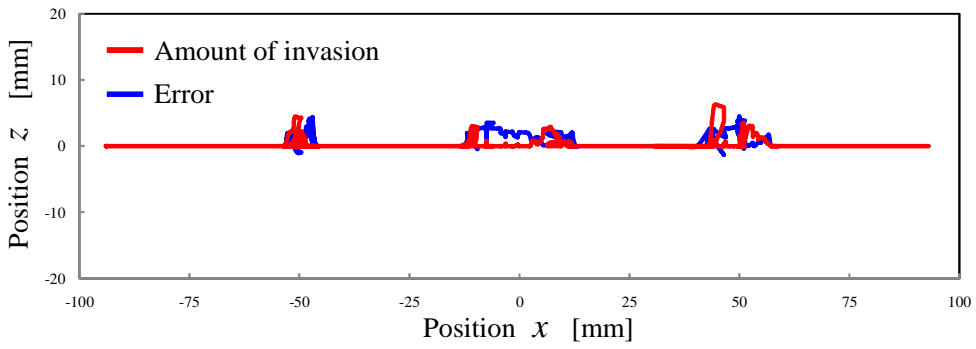


Fig. 6.24: Analysis of tracing: (a) Error value (b) Amount of invasion.

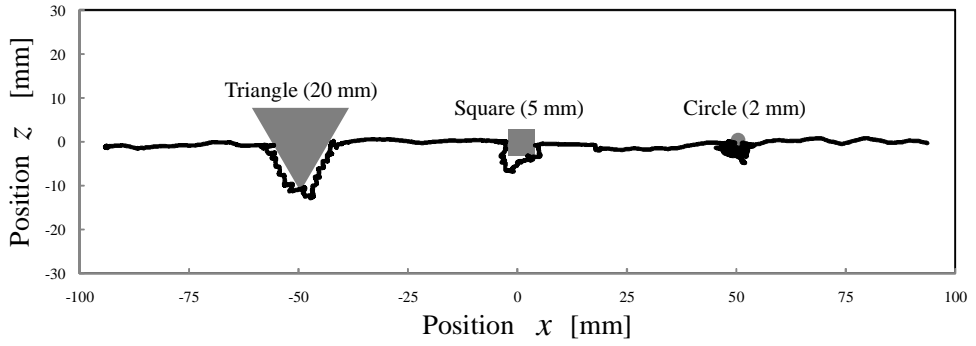
Circle [mm]	Triangle [mm]	Square [mm]
2.22	3.80	3.14



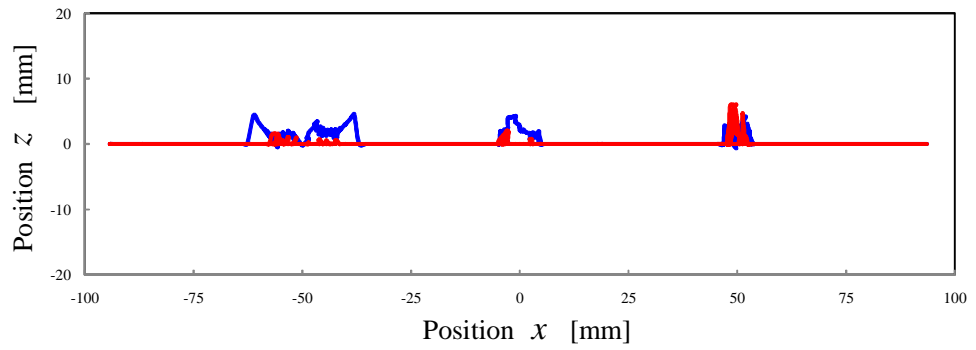
(a)



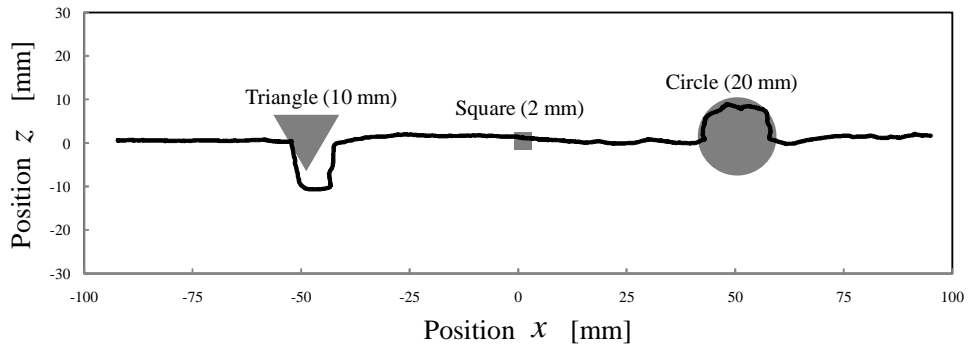
(b)



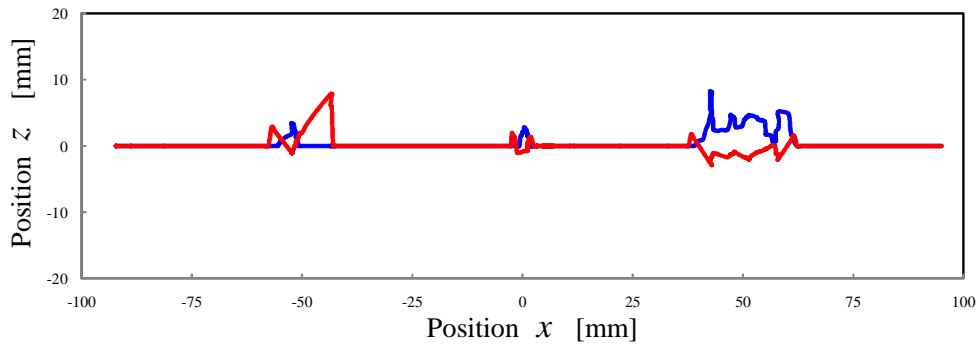
(c)



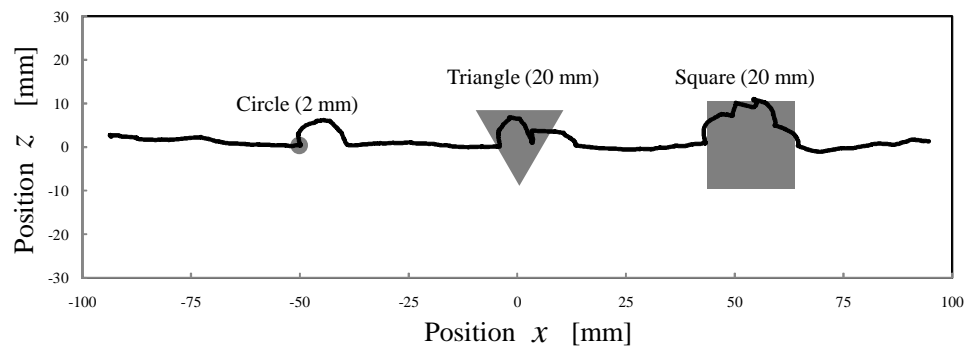
(d)



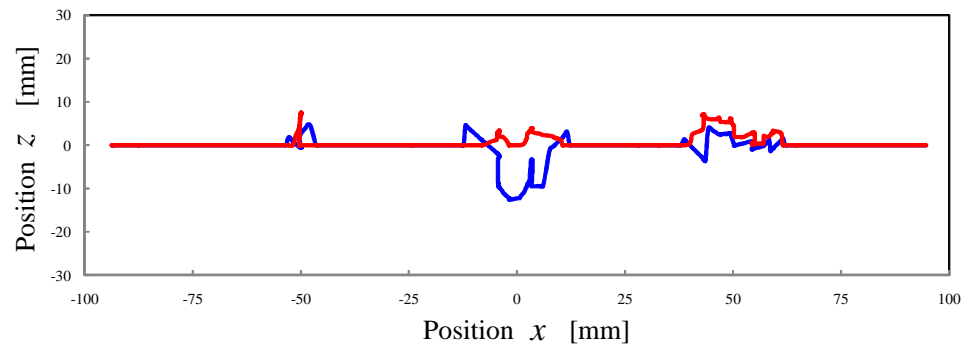
(e)



(f)



(g)



(h)

Fig. 6.25: Result of tracing: (a), (b) is the condition of Circle with the radius mm, Triangle mm on the side, Square mm on the side. (c), (d) is mm, mm, and mm. (e), (f) is mm, mm, and mm. (g), (h) is mm, mm, and mm.

考察

以下では重要部位への侵入回避における実験結果をまとめ、考察を行う。

(1) 重要部位侵入回避

Fig. 6.25 を観察すると、被験者は仮想物体との接触を知覚すると、まず接触した方向と逆の方向に道具を動かし、少し直線から外れた位置に軌道を修正した後、再び進行を試みようとするために不連続に変化する軌跡で物体の境界面をたどっていることが分かる。また、三角形と四角形の形状では物体の凸部で一度行き過ぎ、周辺の探索を行うことで再び物体を見つけ、境界面をなぞるという動作を繰り返している。視覚効果を提示していないため凸部で物体を見失うことは当然であり、連続領域だけで見ると、物体の形状がある程度なぞれていることが伺える。特に物体が大きいほど形状を正しく認識できていることが確認できる。この境界面の探索は物体の存在位置をある程度把握するために仮想力ベクトルの大きさと方向の知覚が重要となる。侵入を防止する方向の力が提示されるために、被験者は物体の存在する位置を認識することができると考えられる。特に触覚の知覚部位が指腹部であることから、操作空間と提示部位が一致しており、操作による触覚の変化が明確であるために物体の形状を認識できたと考えられる。逆に、被験者によっては触覚分布が意味する力ベクトルの方向を予測することが難しいという回答も得られ、物体境界面の探索の精度も悪かった。誘導の実験結果と同様に、力ベクトルによる方向知覚の学習が力学に基づいた指腹部の触覚解析を行い、提示することで精度を向上させることが可能であると考えられる。

(2) 物体の形状による影響

Fig. 6.24 から、三角形の物体が最も誤差が大きい一方で、侵入量に関しては三角形の物体が最も少ないことが分かる。また円と正方形ではいずれの結果も同程度の値を示している。境界面からの誤差の多くが障害物への侵入ではなく、界面を見失ったことによる自由空間の探索から生じている。従って、凸角の角度が小さい形状の物体ほど回避が困難であると考えられる。特に、最小 2 mm の直径を有する円状の障害物に関しては、0.1 mm 程度の侵入に抑えて回避することが可能であった。

(3) 誤差に関する考察

実験によって得られた境界面探索の誤差の結果に関して、力覚提示装置による位置計測誤差が 1 mm 程度、PointShell の大きさが 1 mm であることから実際には両者の誤差の合計が実験によって得られた誤差の主要な原因であると考えられる。従って、本実験で得られた値が下限ではなく、両者をさらに小さくすることで物体境界面探索の精度をさらに向上させることが可能であると考えられる。

(4) システムの性能

衝突の瞬間に遅延なく提示できることが電気触覚における大きな特徴の一つである。仮想物体に接触した瞬間に刺激パルスが一つでも与えられるとユーザは接触感として知覚できる。他のアクチュエータを用いる刺激の場合は接触判定後、制御装置から駆動の信号が送られて実際の刺激が与えられるまでに時間を要するために知覚に遅延が生じる。また、電気刺激が実際に運動を生じないことも微細な操作を可能とする要素である。機械的な刺激によって接触感を生じるためにはある程度大きなエネルギーが与えられる必要があるため、実際の運動を生じてしまう可能性が高くなる。さらに力覚の場合は力を大きくすると振動が生じやすくなり、細かい操作の支援には不向きである。従って、従来の触覚提示装置では提示が困難であった微小物体との接触情報および境界面を、提案する触覚提示デバイスによって知覚させることが可能になったと考えられる。本システムでは最小 2 mm の基本的形状の物体を知覚させることが可能であることが分かった。また、物体の大きさによらず道具の重要部位への侵入量を大きくても 3 mm に抑えることが可能であると分かった。特に重要部位の壁に囲まれた部位において、侵入を回避しながら道具を進行させる際に効果を発揮すると期待される。

第7章 結論

提示空間の制限や実際の力による操作の抑制を生じさせない道具の操作支援として、触覚の重畳による仮想的な力ベクトルの表現を目指した。示指と拇指の触覚分布を刺激装置の介在なしに生成するために空間透明型触覚ディスプレイを開発し、道具に加わる力ベクトルを把持部の触覚分布として提示することを目的とした。さらに、力ベクトルの表現の実際の応用例として、道具の誘導および危険領域への侵入を防ぐための触覚 AR ナビゲーションシステムの構築を目指した。

空間透明型の触覚ディスプレイを開発するに当たり、経皮的電気刺激による感覚の移動現象に着目し、指中節側面への電気刺激によって末節の指腹部に触覚を生じることで刺激部位と知覚部位を分離させる方法を提案した。さらに、ベクトルの提示として示指および拇指の触覚分布の生成を2部位の同時刺激により中間位置に現れる触覚像を利用することで、あたかも中間位置にアレイ状の電極が存在するかのよう知覚させる方法を提案した。両者の提案は、被験者実験により刺激部位と知覚部位の関係を調べることで検証した。被験者の回答により指の中節側面に電気刺激を与えることで触覚像を指末節に生じ、刺激電流量に応じて感覚の移動量が異なることが有意に示された。さらに、指への触覚分布の生成として、短軸方向の知覚部位を測定した結果、提案する PhS のモデル式に当てはまることが示され、各指における短軸方向の触覚提示部位の選択が可能であることが分かった。次に示指と拇指に指の相対位置を考慮した触覚分布を生成することで道具に加わる力ベクトルの表現を行った。道具を把持する際の示指と拇指の相対位置関係を利用することで、独立した二つの2次元ベクトルの線形和によって3次元の力ベクトルの提示を行うことで、3次元空間における道具の操作支援が一部可能になった。

次に道具操作支援システムの構築として、位置計測・力ベクトル計算・触覚提示から成る触覚 AR ナビゲーションの実装を行った。光学式の位置計測を可能にし、ボクセルに基づいた接触判定による道具に働く侵入回避方向の力ベクトル計算を可能にした。さらに、開発した空間透明型電気触覚ディスプレイによって触覚として提示することで、実際に力を発生することなく感覚のみで仮想物体と接触した際の反力ベクトルを知覚させることを可能にした。特に道具の侵入の度合いに応じた反力計算と触覚提示が可能であることが確認された。評価実験として、ユーザの操作に応じて変化する力ベクトルによって道具の誘導を行ったところ、50%程度の正答率で誤差10mmの正しい位置に道具の誘導が可能であることが示された。特に基底ベクトルを提示した場合について有効であり、指腹部への触覚提示が可能な空間透明型触覚ディスプレイを用いることの有効性が示唆された。さらに、仮想物体との接触を知覚させ境界面を認識できることを調べるために、なぞり操作を行った際に障害物を最短距離で回避する実験を行ったところ、最小で2mmの直径の円を侵入量0.1mm以内で回避しながら道具を操作可能であることが分かった。また、物体の大きさによらず最大で3mmの侵入量に留めることが可能であった。従って、提案する触覚 AR ナビゲーションシステムによって道具の空間的誘導と仮想物体の境界面を知覚させることが可能であり、道具操作を支援することが可能であることが示唆された。

本システムは外科手術や化石研磨、さらには文具や工具など日常の道具操作支援への応用が期待される。

謝 辞

本研究は、大阪大学大学院基礎工学研究科大城研究室で行ったものである。

修士の生活においては、学会発表等を通していくつかの受賞に歓喜すると共に、研究を進める上で未熟な点が多数存在することを痛感しました。特に物事の本質を見抜く力の必要性に問われているように思います。また、修士の初めから模索しながら進めてきた本研究を少し短めの修士の期間でまとめ上げることは、日頃お世話になっている方々の協力なしには成し得なかったように思います。

研究の機会を与えて頂き、日々の進捗報告での鋭い御指摘を始めとして本研究の遂行並びに本論文の執筆までの確な御指導をいただいた大阪大学大学院基礎工学研究科 大城 理 教授に深く感謝し、篤く御礼申し上げます。大阪大学大学院基礎工学研究科 野村 泰伸 教授には、本研究をまとめるにあたり副査として御指導頂きました。大阪大学大学院基礎工学研究科 井村 誠孝 准教授には、IVRC を始めとして研究に夢中になるきっかけを与えていただき、修士課程の生活を有意義なものとして過ごすことができました。大阪大学大学院基礎工学研究科 黒田 嘉宏 助教には、研究テーマの設定から本論文をまとめるに当たり、多大なご指導をいただき他、博士課程への進学を決意する後押しをしていただきました。研究室生活において様々な助言をいただいた臨床医工学融合研究教育センタ 鍵山 善之 特任助教に感謝致します。

日頃から互いに支えあい切磋琢磨してきた同研究室の同期である奥村 陽介 氏、重枝 慧 氏、末竹 哲也 氏、田中 翔太 氏、徳井 隆博 氏、濱田 友貴 氏に感謝します。賑やかな研究生生活を共にしてきた大城研究室の先輩ならびに後輩の皆様に感謝します。ありがとうございました。

最後になりましたが、日頃様々な面で支えてくれた多くの方々に深く感謝致します。

本研究における被験者実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認 (21-4) を得て行ったものである。

業績

● 国内論文

1. 吉元 俊輔, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 鍵山 善之, 大城 理, “空間透明型電気触覚ディスプレイの開発と道具操作支援への応用”, 生体医工学シンポジウム 2010 論文 (投稿中).

● 国際会議

1. S. Yoshimoto, Y. Kuroda, Y. Kagiya, T. Kuroda, O. Oshiro, “Tactile Mapping Approach using Electrical Stimulus Pattern”, In Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN '09), Toyama, pp.460-465, October, 2009.
2. S. Yoshimoto, Y. Hamada, T. Tokui, T. Suetake, M. Imura, Y. Kuroda, O. Oshiro, “Haptic Canvas”, Demonstrations in Laval Virtual ReVolution 2010, Laval, April, 2010 (Laval Virtual Award 2010).
3. S. Yoshimoto, Y. Hamada, T. Tokui, T. Suetake, M. Imura, Y. Kuroda, O. Oshiro, “Haptic Canvas: Blending stickiness, hardness, roughness with dilatant fluid based haptic device”, In Proceedings of the 12th International Conference on Virtual Reality (VRIC '10), Laval, April, 2010.
4. S. Yoshimoto, Y. Hamada, T. Tokui, T. Suetake, M. Imura, Y. Kuroda, O. Oshiro, “Haptic Canvas: Dilatant fluid based haptic interaction”, In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2010, Emerging Technology, ET321, Los Angeles, July, 2010.

● 国内発表

1. 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 末竹 哲也, 徳井 隆博: “ダイラタノシー”, Demonstrations in International collegiate of Virtual Reality Contest 2009 (IVRC'09), 東京, 2009 年 10 月 (日本 VR 学会賞・未来観客賞受賞).
2. 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 末竹 哲也, 徳井 隆博, 井村 誠孝, 大城 理, “ダイラタノシー”, In Proceedings in Symposium of i-Tokyo2009, 東京, 2009 年 10 月.
3. 吉元 俊輔, 黒田 嘉宏, 鍵山 善之, 井村 誠孝, 黒田 知宏, 大城 理, “電気刺激パターンを用いた触覚生成”, 日本バーチャルリアリティ学会研究報告, Vol.014, pp.3-6, 大阪, 2009 年 10 月.
4. 吉元 俊輔, 黒田 嘉宏, 鍵山 善之, 井村 誠孝, 大城 理, “指構造と受容器活動の解析に基づいた触覚フィルタの設計”, 電気関係学会関西支部連合大会, G265, 大阪, 2009 年 11 月 (奨励賞受賞).
5. 吉元 俊輔, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 鍵山 善之, 大城 理, “指先の神経求心路刺激による空間透明型電気触覚ディスプレイ”, 第 49 回日本生体医工学学会大会, 大阪, 2010 年 6 月.
6. 吉元 俊輔, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 鍵山 善之, 大城 理, “空間透明型電気触覚ディスプレイの開発と道具操作支援への応用”, 生体医工学シンポジウム 2010, 札幌, 2010 年 9 月 (発表予定).
7. 吉元 俊輔, 黒田 嘉宏, 井村 誠孝, 鍵山 善之, 大城 理, “カベクトル重畳のための空間透明型電気触覚ディスプレイ”, 第 15 回日本バーチャルリアリティ学会大会, 金沢, 2010 年 9 月 (発表予定).

8. 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 徳井 隆博, 末竹 哲也, 井村 誠孝, 大城 理, “ダイラタント流体を用いた力触覚インタラクション”, エンタテインメントコンピューティング 2010, 京都, 2010 年 10 月 (発表予定).

- 受賞

1. 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 徳井 隆博, 末竹 哲也, “IVRC 2009 準優勝 (日本 VR 学会賞)”, 2009 年 10 月.
2. 吉元 俊輔, 濱田 友貴, 徳井 隆博, 末竹 哲也, “IVRC 2009 未来観客賞”, 2009 年 10 月.
3. S. Yoshimoto, Y. Hamada, T. Tokui, T. Suetake, M. Imura, Y. Kuroda, O. Oshiro, “Laval Virtual Awards 2010 Category: Interfaces and Material”, April, 2010.
4. 吉元 俊輔, “平成 21 年度電気関係学会関西支部連合大会 奨励賞”, 2010 年 4 月.

- その他

1. 吉元 俊輔, “機械受容器の活動解析に基づいた電気触覚生成手法とその応用”, 平成 22 年度生体工学領域研究交流会, 大阪, 2010 年 5 月.
2. 黒田 嘉宏, 吉元 俊輔, 大城 理, “. 空間透明型触覚提示装置および道具操作支援システム”, 特願 2010-143074, 2010 年 6 月 23 日.

参考文献

- [1] S. Botden, and J. Jakimowicz, “What is going on in augmented reality simulation in laparoscopic surgery?”, *Surgical Endoscopy*, Vol.23, pp.1693-1700, 2009.
- [2] R. Araujo, O. Mateus, A. Walen, and N. Christiansen, “Preparation Techniques Applied to a Stegosaurian Dinosaur from Portugal”, *Journal of Paleontological Techniques*, pp.1-23, 2009.
- [3] S. Schosteka, M. Schurra, and G. Buessb, “Review on aspects of artificial tactile feedback in laparoscopic surgery”, *Medical Engineering & Physics*, Vol.31, pp.887-898, 2009.
- [4] L. Moody, A. Waterworth, A. McCarthy, P. Harley, and R. Smallwood, “The feasibility of a mixed reality surgical training environment”, *Virtual Reality*, Vol.12, pp.77-86, 2008.
- [5] C. Basdogan, S. De, J. Kim, M. Muniyandi, H. Kim, and M. Srinivasan, “Haptics in Minimally Invasive Surgical Simulation and Training”, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.24, pp56-64, 2004.
- [6] O. Meijden, and M. Schijven, “The value of haptic feedback in conventional and robot-assisted minimal invasive surgery and virtual reality training: a current review”, *Surgical Endoscopy*, Vol. 23, pp.1180-1190, 2009.
- [7] R. T. Azuma, “A Survey of Augmented Reality”, *Presence, Teleoperators and Virtual Environments* Vol.6, No.4, pp.355-385, 1997.
- [8] P. Milgram, H Takemura, A Utsumi, and F Kishino, “Augmented Reality: A Class of Displays on the Reality-Virtuality Continuum”, In *Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies (SPIE1994)*, Vol.2351, pp.282-292, 1994.
- [9] E. Costanza, A. Kunz, and M. Fjeld, “Mixed Reality: A Survey”, *Human Machine Interaction*, LNCS 5440, pp.47-68, 2009.
- [10] P. Milgram, and F. Kishino, “A Taxonomy of Mixed Reality Virtual Displays”, *IEICE Transactions on Information and Systems*, E77-D, No.9, pp.1321-1329, 1994.
- [11] M. Zahariev, and C. Mackenzie, “Auditory contact cues improve performance when grasping augmented and virtual objects with a tool”, *Experimental Brain Research*, Vol.186, pp.619-627, 2008.
- [12] W. Grimson, G. Ettinger, T. Kapur, M. Leventon, W. Wells, R. Kikinis, “Utilizing Segmented MRI Data in Image-Guided Surgery”, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, Vol.11, pp.1367-1397,1997.

- [13] V. Coenen, S. Dammert, M. Reinges, M. Mull, J. Gilsbach, V. Rohde, "Image-guided microneurosurgical management of small cerebral arteriovenous malformations: the value of navigated computed tomographic angiography", *Neuroradiology*, Vol.47, pp.66-72, 2005.
- [14] T. Nojima, D. Sekiguchi, M. Inami, and S. Tachi, "The SmartTool: A system for augmented reality of haptics", In *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, 2002.
- [15] W. Vogl, B. Ma, and M. Sitti, "Augmented Reality User Interface for an Atomic Force Microscope-Based Nanorobotic System", *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol.5, pp.397-406, 2006.
- [16] Cagdas D. Onal, and Metin Sitti, "A Scaled Bilateral Control System for Experimental One-dimensional Teleoperated Nanomanipulation", *International Journal of Robotics Research*, Vol. 28, No, 4, pp. 484-497, 2009.
- [17] F. Robineau, F. Boy, J. Orliaguet, J. Demongeot, and Y. Payan, "Stimulus Array on the Tongue: A Feasibility Study", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.54, pp.711-717, 2006.
- [18] C. King, M. Culjat, M. Franco, C. Lewis, E. Dutson, W. Grundfest, and J. Bisley, "Tactile Feedback Induces Reduced Grasping Force in Robot-Assisted Surgery", *IEEE Transactions on Haptics*, Vol.2, pp.103-110, 2009.
- [19] M. Brell, and A. Hein, "Positioning Tasks in Multimodal Computer-Navigated Surgery", *IEEE Multimedia*, Vol.14, No.4, pp.42-51, 2007.
- [20] V. Ghouvardas, A. Miliou, M. Hatalis, "Tactile displays: Overview and recent advances", *Displays*, Vol.29, pp.185-194, 2008.
- [21] M. Hafez, "Tactile interfaces: technologies, applications, and challenges", *The Visual Computer*, Vol.23, pp.267-272, 2007.
- [22] H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, "Electro-Tactile Display with Tactile Primary Color Approach", the workshop of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), 2004.
- [23] K. Tanie, S. Tachi, K. Komoriya, M. Abe, "Basic Study on Discriminability of Mental Location of Electrocutaneous Phantom Sensation", *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, vol.15, no.4 , pp. 91-98, 1979.
- [24] Innomed Orthopedic Instruments, "Capsule Scissors", <http://www.innomed.net>.
- [25] M. Cohen, "Surgical Video: The Cutting Edge", *Creative COW Magazine: Non-Broadcast Production Issue*, <http://magazine.creativecow.net>.
- [26] Crystal World and Prehistoric Journey's, "Fossil Preparation Tools", <http://www.crystal-world.com>.
- [27] E. R. Kandel, J. H. Schwartz, T. M. Jessell, "Principles of Neural Science, 4th edition", Appleton&Lange, San Mateo, 2000.

- [28] G. A. Gescheide, Stanley J. Bolanowski, K. R. Hardick, "The frequency selectivity of information-processing channels in the tactile sensory system", *Somatosensory & Motor Research*, Vol.18, No.3, pp.191-201, 2001.
- [29] R. Johansson, and J. Flanagan, "Coding and use of tactile signals from the fingertips in object manipulation tasks", *Nature Reviews, Neuroscience*, Vol.10, pp.345-359, 2009.
- [30] M. A. Qasaimeh, S. Sokhanvar, J. Dargahi, and M. Kahrizi, "A micro-tactile sensor for in situ tissue characterization in minimally invasive surgery", *Biomedical Microdevices*, Vol.10, pp.823-837, 008.
- [31] Ubiquitous Entertainment, "ARider", <http://www.uei.co.jp>.
- [32] T. Aoki, H Mitake, S. Hasegawa, and M. Sato, "Wearable Haptic Device to Present Contact Sensation Based on Cutaneous Sensation Using Thin Wires", *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan*, Vol.14, pp.421-428, 2009.
- [33] Y. Ikei, K. Wakamatsu, S. Fukuda, "Vibratory tactile display of image-based textures", *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications*, Vol.17, No.6, pp.53-56, 1997.
- [34] S. C. Kim, C. H. Kim, T. H. Yang, G. H. Yang, S. C. Kang, D. S. Kwon, "SaLT: Small and Lightweight Tactile Display using Ultrasonic Actuators", In *Proceedings of IEEE RO-MAN'08*, pp.430-435, 2008.
- [35] C. R. Wagner, S. J. Lederman, R. D. Howe, "Design And Performance of a Tactile Shape Display Using RC Servomotors", *The Electronic Journal of Haptics Research*, Vol.3, No.4, pp.1-6, 2004.
- [36] D. Allerkamp, G. Bottcher, F. E. Wolter, A. C. Brady, J. Qu, I. R. Summers, "A vibrotactile approach to tactile rendering", *The Visual Computer*, Vol.23, No.2, pp. 97-108, 2007.
- [37] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando, S. Tachi, "Surface Acoustic Wave Tactile Display" *IEEE Transactions on Computer Graphics and Applications, Virtual Reality*, pp.56-63, 2001.
- [38] A. Yamamoto, Hiroaki Y, T. Higuchi, "Electrostatic Tactile Display with Thin Film Slider and Its Application to Tactile Telepresntaion Systems", *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol.12, No.2, pp.168-177, 2006.
- [39] Y. Makino, N. Asamura, H. Shinoda, "A Cutaneous Feeling Display using Suction Pressure", In *Proceedings of SICE Annual Conference 2003*, pp.2096-2099, 2003.
- [40] V. Hayward, J. M. Cruz-Hernandez, "Tactile Display Device Using Distributed Lateral Skin Stretch", In *Proceedings of ASME-IMECE '00*, Vol.DSC-69-2, pp.1309-1314, 2000.
- [41] H. Ando, J. Watanabe, M. Inami, M. Sugimoto, and T Maeda, "A Fingernail-Mounted Tactile Display for Augmented Reality Systems", *Electronics and Communications in Japan, Part II* Vol.90, No.4, pp.56-65, 2007.
- [42] K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. Bach-y-Rita, W. J. Tompkins, "Electrotactile And Vibrotactile Displays For Sensory Substitution Systems", *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Vol.38, No.1, pp.1-16, 1991.

- [43] H. Kajimoto, N. Kawakami, S. Tachi, "Electro-Tactile Display with Tactile Primary Color Approach", In Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2004), 2004.
- [44] H. Kajimoto, N Kawakami, S Tachi, and M Inami, "SmartTouch: Electric Skin to Touch the Untouchable", IEEE Computer Graphics and Applications, Vol.24, No.1, pp.36-43, 2004.
- [45] D. R. McNeal, "Analysis of a model for excitation of myelinated nerve", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.23, No.4, pp.329-337, 1976.
- [46] F. Rattay, M. Aberham, "Modeling axon membranes for functional electrical stimulation" IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Vol.40, No.12, pp.1201-1209, 1993.
- [47] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, S. Tachi, "Tactile Feeling Display using Functional Electrical Stimulation", In Proceedings of the 9th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT1999), 1999.
- [48] K. A. Kzczmarek, "Electrotactile Adaptation on the Abdomen:Preliminary Results", IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, Vol.8, No.4, pp.499-505, 2000.
- [49] S. Yoshimoto, Y. Kuroda, Y. Kagiya, T. Kuroda, O. Oshiro, "Tactile Mapping Approach using Electrical Stimulus Pattern", In Proceedings of the 18th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN '09), pp.460-465, 2009.
- [50] T. Kuiken, P. Marasco, B. Lock, R. Harden, and J. Dewald, "Redirection of cutaneous sensation from the hand to the chest skin of human amputees with targeted reinnervation", In Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, NEUROSCIENCE, Vol.104, No.50, pp.20061-20066, 2007.
- [51] T. Iwamoto, T. Hasegawa, and H. Shinoda, "Measuring middle phalanx neural signals generated by mechanoreceptors", In Proceeding of 23th Sensing forum, pp289-292, 2006.
- [52] eOrthopod, "Hand Anatomy, A Patient's Guide to Hand Anatomy", <http://www.eorthopod.com/content/hand-anatomy>, 2009.
- [53] K. Sato, and S. Tachi, "Design of Electrotactile Stimulation to Represent Distribution of Force Vectors", In Proceedings of IEEE Haptics Symposium 2010, pp.121-128, 2010.
- [54] P.Besl, N.McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes, IEEE Transactions on Pattern and Analysis Machine Intelligence", Vol.14, pp.239-256, 1992.
- [55] H.Kato, M. Billinghurst, "Marker Tracking and HMD Calibration for a Video Based Augmented Reality Conferencing System", In Proceedings of the 2nd IEEE and ACM International Workshop on Augmented Reality, 1999.
- [56] M. Renz, C. Preusche, M. Potke, H. Kriegel, G. Hirzinger, "Stable Haptic Interaction with Virtual Environments Using an Adapted Voxmap-Pointshell Algorithm", in Proceedings of Eurohaptics, pp.149-154, 2001.

- [57] Tomas Akenine-Möller, “Fast 3D Triangle-Box Overlap Testing”, *Journal of graphics, gpu, and game tools*, Vol.6, No.1, pp.29-33, 2001.
- [58] S. Lederman, “Skin and Touch”, *Encyclopedia of Human Biology*, Vol.7, pp51-63, 1991.
- [59] SensAble, “PHANToM Omni”, <http://www.sensable.com>.
- [60] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda, and S. Tachi, “Active Touch in Electrocutaneous Display”, In *Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan, 6th Annual Conference*, pp.489-490, 2001.
- [61] T. Maeno, S. Hiromitsu, and T. Kawai, “Control of Grasping Force by Detecting Stick/Slip Distribution at the Curved Surface of an Elastic Finger”, In *Proceedings of IEEE Robotics and Automation*, 2000.
- [62] T. Maeno, K. Kobayashi, “FE Analysis of the Dynamic Characteristics of the Human Finger Pad in Contact with Objects with/without Surface Roughness”, In *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, DSC-Vol.64* , pp.279-286, 1998.
- [63] T. Maeno, T. Kawai, and T. Kawai, “Analysis and Design of a Tactile Sensor Detecting Strain Distribution Inside an Elastic Finger”, In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* , pp.1658-1663, 1998.
- [64] T. Maeno, S. Hiromitsu, and T. Kawai, “Relationship between the Structure of Human Finger Tissue and the Location of Tactile Receptors”, *Bulletin of JSME International Journal*, Vol.41, No.1, C, pp.94-100, 1998.
- [65] J. Z. Wu, K. Krajnak, D. E. Welcome, and R. G. Dong, “Analysis of the Dynamic Strains in a Fingertip exposed to Vibrations: Correlation to the Mechanical Stimuli on Mechanoreceptors”, *Journal of Biomechanics*, Vol.39, pp.2445-2456, 2006.
- [66] J. Z. Wu, D. E. Welcome, K. Krajnak, and R. G. Dong, “Finite Element Analysis of the Penetrations of Shear and Normal Vibrations into the Soft Tissues in a Fingertip”, *Medical Engineering & Physics*, Vol.29, pp.718-727, 2007.
- [67] S. Shimawaki, N. Sakai, “Quasi-static Deformation Analysis of a Human Finger using a Three-dimensional Finite Element Model Constructed from CT Images”, *Journal of Environment and Engineering*, Vol.2, No.1, pp.56-63, 2007.