

# 弦楽器のための触弦認識システムの構築

飛世 速光<sup>1</sup> 竹川 佳成<sup>2</sup> 寺田 努<sup>1,3</sup> 塚本 昌彦<sup>1</sup>

**概要:** 弦楽器演奏において運指は演奏に影響する重要な要素である。また、触弦(指が弦に触れている状態)や押弦、離弦(指と弦が離れている状態)といった状態や、複数の指が1つの弦上にあるなど、左手の指と弦との関係は多彩である。これらの情報を演奏支援システムが取得することで、ミュート(触弦により弦の振動を防ぎ消音すること)のために弦上に配置された指や、次の発音の準備のために弦上に配置されている指など、発音に関わらない運指情報を判別でき、効率的な独習支援や、細かい演奏技術が盛り込まれた楽譜の自動生成に応用できる。そこで本研究では、押弦、触弦、離弦を認識可能な、弦楽器のための触弦認識システムの構築を目的とする。本研究では弦やフレットの導電性に着目した電気的な機構による触弦認識手法を新たに提案する。実装したプロトタイプを用いて、ギター習熟者に、運指やテンポの異なるフレーズを演奏してもらい、高精度に触弦認識できることを確認した。

## 1. はじめに

演奏家が望む音楽表現を実現するために用いる演奏技術の1つとして運指(指使い)が存在する。本研究で対象とする弦楽器において、運指はフレーズの弾きやすさ、音色などといった音楽表現に大きく影響し、演奏家は、作品の意図を考えた音楽的な運指を選ぶ。意図する音楽表現は演奏家ごとに異なるため、運指の種類は多様である。リアルタイムに運指情報が取得できれば、誤った運指を認識し、修正箇所を提示するといった独習支援や、演奏を行いながら運指を確認できる効率的な演奏学習を行える。これまでに筆者らの研究グループでは、カメラベースのシンプルな画像処理と、鍵盤の演奏特性をもとに定義したルールを組み合わせることで、実時間で高精度にピアノ演奏の運指を取得するシステム [1] や、弦楽器であるベースを対象とし、指に貼り付けたカラーマーカをカメラで読み取り、ベース楽器の演奏特性をルールとして定義し、カメラによる検出結果を補正することで高精度な運指検出を行うシステム [2] を構築してきた。しかし、後者のシステムでは、撥弦時に音高を決定した運指の情報しか取得できない。弦楽器演奏では、触弦(指が弦に触れている状態)や押弦、離弦(指と弦が離れている状態)といった状態や、複数の指が1つの

弦上にあるなど、左手の指と弦との関係は多彩である。これらの情報を取得することで、ミュート(触弦により弦の振動を防ぎ消音すること)や次の発音の準備のために弦上に配置される指など、発音に関わらない運指情報を取得できる。これらの情報を用いることで、ミュートや予備動作のための指の配置の確認といった効率的な独習支援や、細かい演奏技術が盛り込まれた楽譜の自動生成が行える。

そこで本研究では、押弦、触弦、離弦が認識可能な、弦楽器のための触弦認識システムの設計と実装を目的とする。本研究では、まず複雑な弦と指の関係を体系化し、想定するアプリケーションの実現に最適な認識手法について検討する。その結果、従来手法で採用されてきた画像処理では触弦認識で求められる数ミリメートル精度の細かな動きを認識できないことから、本研究では弦やフレットの導電性に着目した電気的な機構による認識手法を新たに提案する。提案手法では、人がもつ静電容量を利用したRCローパスフィルタを持つ回路と各弦を接続することで離弦と触弦を区別し、電圧が印加された弦とフレットでスイッチを形成することで押弦を区別する。これらを組み合わせることで、押弦、触弦、離弦を認識する。また提案手法では指にデバイスを取り付ける必要がなく、各弦に接続する回路も撥弦による弦の振動に影響を与えないため、提案手法によって演奏における指の動きや発音される音に影響を与えない。

以下、2章で触弦認識システムの設計について述べ、3章でシステムの評価と考察について説明する。4章で関連研究について述べ、最後に5章で本研究のまとめを行う。

<sup>1</sup> 神戸大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Kobe University

<sup>2</sup> はこだて未来大学システム情報科学部  
Faculty of Systems Information Science, Future University  
Hakodate

<sup>3</sup> 科学技術振興機構さきがけ  
PRESTO, Japan Science and Technology Agency

## 2. 設計

本研究では、押弦、触弦、離弦を認識可能な、弦楽器のための触弦認識システムを構築する。提案システムを用いたアプリケーションとしては、弦楽器初心者やアマチュアの演奏者を対象として適切なミュートや予備動作が行われているかを確認するための独習支援や、楽譜の作成を行う指導者やプロの演奏者の発音、ミュート、予備動作における運指や指の配置情報の自動採譜などを想定している。

この目的や利用シーンを満たすために、本システムの設計方針として、(1) 演奏を妨げない認識 (2) 高い認識性能、の2点を挙げる。(1)に関しては、独習支援アプリケーションを使つての訓練や、コンサートやレッスンなど演奏者が演奏に集中していても利用できるようにできる限り演奏を妨げない、つまり指に余計なデバイスをつけずにシステムを実現することを目指した。(2)に関しては、本研究では初心者からプロフェッショナルな演奏家までさまざまなレベルの演奏者を対象としている。ギター演奏では、和音(コード)を同時に鳴らす奏法は一般によく使用され、また、プロフェッショナルな演奏家は単音であったとしても高速に演奏する場合もある。独習支援のような応用においては、認識ミスはユーザビリティや信頼性の低下につながるため、高速かつ高い精度で認識できる必要がある。

### 2.1 認識手法の検討

触弦認識を実現する手法として、音響信号とカメラによる画像処理を組み合わせる手法と、電気回路を用いる手法の2種類が考えられる。以下、両手法について説明する。

#### 2.1.1 音響信号とカメラを用いる手法

これは、筆者らの研究グループが構築した押弦している指を認識するシステム [2] で用いられた手法であるが、カメラを用いて取得した弦楽器の指板領域(ネック表面側の弦を指で押さえつける面)と指の爪に貼りつけたマーカの動画データによって各指の指板上における位置情報を取得する。また、ピックアップから得られる音響信号から音高や発音タイミングなどの演奏情報を取得する。この手法は、指板の上にある指の位置の認識や指の特定には適しているが、触弦と押弦の区別のように数ミリメートル精度の細かな動きは認識できない。

#### 2.1.2 電気回路を用いる手法

本手法は、本研究において新たに提案する方法であり、ギターの弦やフレットの導電性に着目したものである。具体的にはこの手法は大きく押弦認識回路および触弦認識回路という2つの回路から構成される。押弦認識回路は弦を導線とみだてて弦に電圧を印加し、触弦認識回路は弦を静電容量センサのアンテナとみだてている。したがって、各回路の入出力ポートと各弦を図1に示すように接続する。

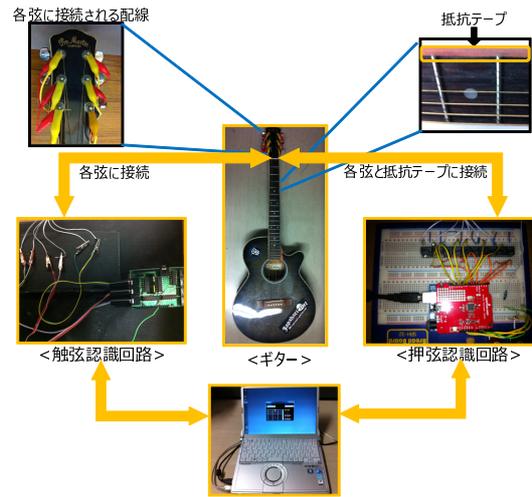


図1 システム構成

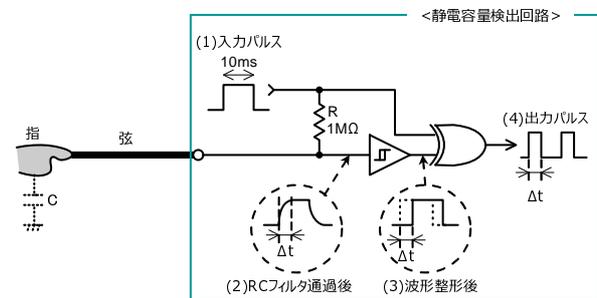


図2 触弦認識回路

また、触弦認識回路は図1に示すように指板の側面に抵抗が含まれた導電性のテープを貼り付け、その抵抗テープと押弦認識回路の入力ポートが接続されている。弦と回路間の配線は、弦楽器のヘッドに接続されているため、演奏を妨げず、演奏で用いる弦楽器の音に影響を与えない。また、指板に貼られた抵抗テープは、指板の片側に細いテープを貼るだけでよい。さらに、指に特殊なデバイスを接続する必要もない。

**システム構成** 電気回路を用いる手法のシステム構成を図1に示す。ギターのヘッド上の各弦と接続された触弦認識回路により指が弦に触れているかどうかを認識する。また、ギターの各弦および全フレット上にまたがるように貼られた抵抗テープと接続された押弦認識回路により押弦を認識する。各回路で検出された情報はシリアル通信によってPCに送信され、触弦認識回路および押弦認識回路のデータを組み合わせることで、押弦、触弦、離弦を認識する。

**触弦認識回路** 触弦認識回路は、指が各弦に触れたときにおける各弦の静電容量の変化を検出することで、指が弦に触れたかどうかを認識する。ここでの触弦とは指が弦に触れることであり、押弦を含む。触弦認識回路を図2に示す。触弦認識回路は、人がもつ静電容量を利用したRCローパ

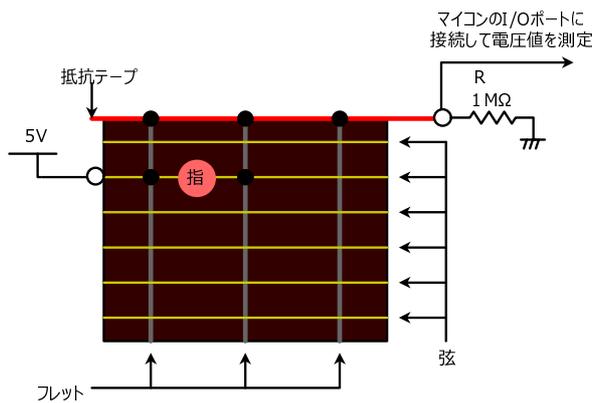


図 3 押弦認識回路の例

スフィルタを用い、入力パルスの応答から静電容量値  $C$  を推定する。図 2(1) のパルスの波形は抵抗  $R$  と静電容量  $C$  によって図 2(2) のように変化し、図 2(2) の波形をシュミットトリガ入力バッファによって整えることにより、図 2(3) のように遅延時間  $\Delta t$  をもつ波形に変化する。静電容量  $C$  が大きな場合、すなわちアンテナ (弦) に指が触れている場合はより長い遅延時間  $\Delta t$  が発生する。波形の遅延時間  $\Delta t$  は、図 2(1) の波形と図 2(2) の波形の排他的論理和を取ることで生成される 2 つの等しい値の一方を用いる。

**押弦認識回路** 押弦認識回路はギター各弦と全フレットにまたがるように貼られた抵抗テープが押弦認識回路の入出力ポートにそれぞれ接続されており、ギター各弦には時分割で電圧が印加される。このとき、押弦された状態であれば、フレットを通じて、抵抗テープにも電圧が印加される。抵抗テープに印加された電圧値により印加されている弦が押弦状態にあるかどうかを認識する。この認識を第 1 弦から第 6 弦まで繰り返し高速に行うことによって、リアルタイムに押弦認識を行う。上から 2 番目の弦に対して押弦認識を行っている場合の回路図を図 3 に示す。

また、押弦の仕方を制限すれば、各弦に対して同時に 2 本の指が押弦されている状態まで認識できる。抵抗テープを用いた場合の回路を図 4 に示す。抵抗テープの抵抗値は長さに比例するため、値が固定された抵抗との分圧値を測定することで最もボディ側と最もヘッド側の押弦位置を認識できる。この手法は、楽器の構造上の問題から同時に隣り合ったフレットで異なる弦が押弦されている場合、押弦認識に誤認識が生じる。本稿では、電気回路を用いる手法のうち、複数指の認識を行わない場合の手法を電気回路 1、押弦の仕方を制限し、複数指の認識を行う場合の手法を電気回路 2 と呼ぶ。

電気回路を用いる手法は、触弦や押弦の区別には適しているが、指板上にある離弦している指の位置や発音タイミングは認識できない。

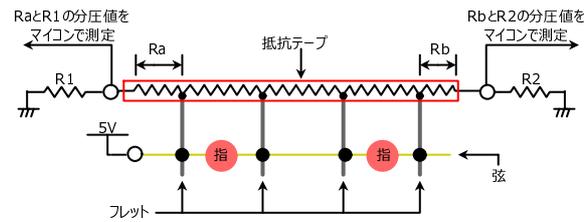


図 4 抵抗テープを用いた回路

## 2.2 認識手法の選定

弦と指の関係は多彩であると同時に、前節で述べたように弦と指の関係を認識する方法には利点、欠点がある。そこで、弦と指の関係を体系化し各認識手法で認識できる弦と指の認識項目を分析する。また、想定するアプリケーションに必要な弦と指の認識項目も同時に分析し、これらをまとめることで、想定するアプリケーションと認識手法との最適な対応関係を明らかにする。ここで表 1 は、表 2 から表 4 で使用される用語を示す。また、説明の都合上、表 2 に示すように、想定するアプリケーションの共通点をまとめ「指と音の関係」として抽象化した。

### 2.2.1 各認識手法で認識できる項目

表 3 および表 4 においてカメラや音響信号を利用して認識できる項目について説明する。カメラは指の位置を、音響信号は音高や発音タイミングをそれぞれ認識するために用いられる。撥弦したとき、指と弦の関係が離弦であれば開放弦の音高の音が鳴り、触弦であればアタック音が鳴り、押弦であれば押弦したフレットの音高の音が鳴る。したがって、音響信号を利用することによって、弾かれた弦については、1 本の指と弦の関係が、押弦、触弦、離弦を区別でき、カメラと音響信号を組み合わせることで指の特定もできる。しかし、発音前の運指の認識や、発音と関係のない弦については運指の認識ができない。このため、発音前に次の発音のために準備している指 (予備動作のための指) の運指は認識できず、ミュートのための指 (弦に触れて弦の振動を止め、消音するための指) の運指についても認識できない。また、ミュートを確認するアプリケーションを構築する場合、発音前にミュートができていのかどうかという情報を提示できない。さらに、触弦の認識について、弦に触れている状態で弦を弾いた場合に発生するアタック音を検出して認識する必要があるため、認識精度の低下が考えられる。

電気回路を利用した手法は、発音前の認識や、発音に関わっていない指の認識に有効である。電気回路 1 は、各弦に対して複数の指の運指や指と弦の関係は認識できない。一方、電気回路 2 は、全フレットにまたがって貼られている抵抗が含まれた導電性のテープを使用することで、押弦のみ、各弦に対して 2 本の指まで運指や指と弦の関係の認識が可能であるが、楽器の構造上の問題から同時に隣り合ったフレットで異なる弦が押弦されている場合、押弦認識に

表 1 表 2 および表 4 における各項目の説明

認識項目		各項目の説明
認識対象	押弦/触弦/離弦	押弦, 触弦, 離弦をそれぞれ区別して認識すること
	押弦	押弦を認識すること
	離弦	離弦を認識すること
	触弦	触弦を認識すること
	各指の位置	各指の位置を認識すること
	発音タイミング	発音されたタイミングを認識すること
	音高	発音された音の音高を認識すること
	認識タイミング	認識を行うタイミング
	弦の数	同時に認識する弦の数
	指の数	1本の弦に対して1本の指を認識する(注1) 1本の弦に対して最もボディ側の指と最もヘッド側の指の計2本の指のみ認識する 1本の弦に対して配置されているn本以上の指をすべて認識する
指の特定	認識する指がどの指か特定すること	
弦の制限	弾かれた弦のみ認識すること	
指の位置制限	同一弦上に複数の指が配置されないこと	
指と音の 関係	発音に関わる指	発音に用いられる指 発音前に次の発音のために準備している指 各弦をミュートしている指
想定される アプリケーション	楽譜の採譜(撥弦時の運指情報のみ) 次の発音のための指の配置の確認 ミュートの確認	音高や押弦位置だけでなく発音に関わる運指情報も含んだ楽譜の自動生成を行う 次の発音のための指の配置が行っているかの確認を行う 各弦をミュート(触弦によって消音)できているかどうかの確認を行う
	楽譜の採譜(撥弦時以外の運指情報を含む)	発音に関わる指, 関わらない指の運指情報を含む楽譜の自動生成を行う
表における 記号や文字	○	その手法で認識できる項目である
	△	その手法では認識精度が低い項目である
	×	その手法では認識できない項目である
	-	結果に影響を与えない項目である
	必要	認識に必要な項目である
	必要※1 必要※2 必要※3	各弦に対して複数の指を認識するときに必要である ハーモニクスが鳴るかどうかを考慮するときに必要である どの指をどこに配置するかまで考慮するときに必要である

注1: 弦に対して複数の指が押弦または触弦状態にあるとき, 最もボディ側の指を認識する

表 2 想定されるアプリケーションと指と音の関係

想定されるアプリケーション	認識したい指と音の関係	
	発音に 関わる指	発音に関わらない指
楽譜の採譜(撥弦時の運指情報のみ) 次の発音のための指の配置のチェック ミュートのチェック	○	予備動作 ミュート
楽譜の採譜(発音に関わらない運指情報を含む)	○	○(必要※1の項目の認識によって各弦に対して複数の指も認識可能) ○(必要※2の項目によってハーモニクスの認識も可能) ○(必要※3の項目の認識が必要)

において誤認識が生じる。電気回路を利用した手法では、音響信号を用いずに1本の指と弦の関係を押弦、触弦、離弦を区別して認識できるため、発音前での認識や、弾かれていない弦に対する認識を行える。したがって、電気回路を利用した手法のみで、各弦がミュートされているかどうかの認識を行え、この手法をカメラおよび音響信号と組み合わせることで、各弦に対して1本の指のみではあるが、予備動作のための指の運指を認識できる。ミュートを行うための指については、フレットの真上で触弦していると、楽器の構造上、ハーモニクスという倍音が鳴るが、カメラと組み合わせることで指の位置を認識することでハーモニクスが鳴るかも認識できると考えられる。また、電気回路2は、隣り合ったフレットでそれぞれ異なる弦が同時に押弦されると、回路の構造上、誤認識が生じる。したがって電気回路2は、隣り合ったフレットでそれぞれ異なる弦が同時に押弦されることがない場合のみ、各弦に対して2本まで予備動作のための指の運指を認識できる。これはベース楽器の

ように、複数弦を同時に弾くことが少ない楽器に対して有効であると考えられる。

### 2.2.2 各アプリケーションで認識すべき項目

想定するアプリケーションの認識手法について表2をもとに説明する。音高や発音タイミング、押弦位置といった従来の楽譜に記載されている情報に加え、発音に関わる運指情報も含んだ楽譜を演奏から自動で生成するアプリケーションは、発音に関わる指の運指のみ認識できれば良く、カメラと音響信号を使う従来手法[2]で対応できる。発音前に次の発音のために配置しておく指の確認をするアプリケーションは、予備動作に関わる指の運指を認識する必要があり、各弦に対して最もボディ側の指のみに限定すれば、従来手法と電気回路を用いる手法を組み合わせることによって実現できる。ミュートの確認をするアプリケーションについては、各弦がミュートされているかどうかを認識できれば良く、電気回路を用いる手法によって実現できる。また、カメラや音響信号を、電気回路を用いる手法に組み

表 3 電気回路 1 により認識できる認識項目

認識項目						認識手法				指と音の関係						
						提案手法のみ		提案手法含む		発音に 関わる 指	発音に関わらない指					
認識 タイミング	弦の数	指の数	指の特定	弦の制限	指の 位置制限	カメラ	音響信号	カメラ	音響信号		カメラ	音響信号	カメラ	音響信号	予備動作	ミュート
押弦/触弦/離弦	発音前	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x		必要※3	
			有	-	有	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			無	-	無	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
		1本	有	-	有	x	x	x	x	○	○	○	○	○	必要※2,3	
			無	-	無	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
	発音後	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※3	
			有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要※2,3	
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要※2,3	
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※2,3	
			-	-	-	x	x	△	○	○	○	○	○	○	必要	
押弦	発音前	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※1	必要※3	
			有	-	有	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※1	必要※3
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
	発音後	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	必要※3
			有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	△	○	○	○	○	○	○	必要	
触弦	発音前	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	必要※3		
			有	-	有	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要※2,3	
			無	-	無	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
	発音後	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	必要※3
			有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
離弦	発音前	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	必要※3	
			有	-	有	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	x	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
	発音後	2本以上	-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	必要※3
			有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
		1本	有	-	有	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			無	-	無	x	x	△	x	○	x	○	○	○	必要	必要※2,3
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	x	x	x	x	x	x	必要	
			-	-	-	x	x	x	○	○	○	○	○	○	必要	
各指の位置	-	-	-	-	-	x	○	○	x	x	○	○	必要	必要	必要	
発音タイミング	-	-	-	-	-	x	○	○	x	x	○	○	必要	必要	必要	
音高	-	-	-	-	-	x	○	○	x	x	○	○	必要	必要	必要	



合わせることでミュート時におけるハーモニクスの検出も可能となる。発音に関わる運指情報だけでなく予備動作やミュートのための運指情報も含んだ楽譜を自動生成するアプリケーションは、弦に対して複数指の押弦、触弦、離弦の区別ができないため、現段階では構築できない。したがって、電気回路を用いる手法によって、発音前に次の発音のために配置しておく指の確認をするアプリケーションやミュートの確認をするアプリケーションの構築が行える。

### 3. 評価

2章で述べた触弦認識システムのプロトタイプを実装した。現段階では、電気回路1のみ実装を行っている。実装したプロトタイプの有効性を示すために、ギター習熟者3名に2種類の基本的なフレーズを演奏させ、触弦認識の認識正答率を調査した。

#### 3.1 実験の手続き

**課題フレーズ** 課題フレーズは和音演奏のみを行うフレーズA、単音での演奏のみを行うフレーズBの2種類とした。フレーズAは小節ごとに演奏する和音を変えていく4小節のフレーズを4回繰り返す計16小節のフレーズであり、押弦だけでなく触弦や離弦することも必要になるような和音を選んだ。フレーズAの和音進行を図5に示す。図5は、ギターの指板の一部を模しており、図中の記号は●が指による押弦箇所を、○が離弦により開放弦を使用する弦を、×が触弦によりミュートし発音させない弦をそれぞれ表す。フレーズBは第6弦から第1弦まで各弦で1小節ずつ演奏していき、第1弦まで演奏した後、第1弦から第6弦まで各弦で1小節ずつ演奏していく計12小節のフレーズである。フレーズAは6本の弦を全て撥弦させ、フレーズBは演奏したい1本の弦のみを撥弦させた。2種類のフレーズはいずれも1分当たりの4分音符数が100, 120, 140, 160, 180, 200の計6種類のテンポで演奏させた。

**被験者** 被験者は課題曲を楽譜に指定されたテンポで十分に弾きこなせるギター歴3年の大学生1名、ギター歴6年の大学生1名、ギター歴5年の大学生1名の計3名である。

**システム構成** プロトタイプシステムを用い、各弦と指との関係(押弦、触弦、離弦)を認識した。被験者の手元をデジタルビデオカメラで撮影した動画より正解データを得た。動画において視覚的に正解データを判断しにくい箇所は被験者にヒアリングを行い、正解データを取得し、判断のできないあいまいなデータは除外した。

**実験の手続き** 被験者にフレーズA、フレーズBの順に全てのテンポで演奏させた。テンポの提示は電子メトロノームを用いた。

#### 3.2 評価結果および考察

表5に触弦認識の認識正答率を示す。認識正答率は平均

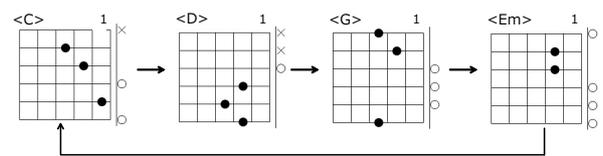


図5 フレーズAの和音進行

表5 認識正答率の結果

フレーズ	演奏テンポ (4分音符=)	被験者		
		被験者A	被験者B	被験者C
フレーズA (和音演奏)	100	99.4%	98.5%	99.3%
	120	98.6%	99.2%	99.6%
	140	97.3%	94.1%	98.5%
	160	97.2%	98.9%	98.9%
	180	96.3%	98.3%	99.2%
	200	97.2%	99.6%	99.6%
フレーズB (単音演奏)	100	99.1%	99.9%	99.6%
	120	99.6%	99.9%	98.4%
	140	99.9%	99.9%	99.5%
	160	99.3%	99.5%	99.6%
	180	98.7%	99.9%	99.9%
	200	99.1%	99.8%	99.4%

して約98%と高く、フレーズやテンポに関わらず高精度な認識を行えた。被験者Aの正答率は被験者Bおよび被験者Cと比べてわずかに低くなっている傾向があるが、これは被験者Aが他の被験者より触弦や押弦の動作が多かったため、誤認識が増加したと考えられる。また、他の弦と比べ、第3弦と第4弦に誤認識が多かった。これは離弦と触弦を区別する静電容量の閾値の設定が、第3弦と第4弦に対して適切でなかったためだと考えられる。今後、最適な閾値を求める調査する必要がある。

### 4. 関連研究

触弦認識に関する研究の事例として、Lightglove [3] およびデータグローブ [4] があげられる。Lightglove およびデータグローブは出力される指先の位置のデータを用いることで運指を取得する。データグローブは触覚の認識を行えるため、触弦の認識に適用できる。しかし、これらは弦楽器演奏を使用目的として考えていないため、指を覆うセンサや手首に固定する回路などが演奏を妨げる。本研究では、手や指に特殊デバイスを装着せず、弦楽器演奏を妨げない箇所に認識回路を設置する。

2台のカメラにより、画像処理を用いたギターのコード検出を行うシステム [5] が開発されている。このシステムはカメラに撮影される色の変動の影響を考慮するなどロボスタな指認識を行い、コード検出において精度の高い認識を実現している。しかし、画像処理のみですべての指を認識することは難しいため、単音の運指検出を行う場合は精度の低下は免れない。また、押弦した指の解析のみを行っているため、弦楽器特有の開放弦の撥弦を検出するのは困難であると考えられる。

運指キャプチャギター [6] は、フォトトリフレクタ方式による撮像システムをギター本体に組み込み、楽器側から運指を認識している。しかし、運指キャプチャギターは楽器本体に特別な装置を埋め込む必要があり、個人が所有している楽器をそのまま使用して運指を認識できない。本研究の触弦認識システムは弦と認識回路をワニロクリップなどで接続し、指板の片側に導電性のテープを貼るだけで良く、個人が所有する楽器を使用できる。

一方、あらかじめ入力しておいた楽曲データをもとに運指を自動生成する試みは多数存在する [8–11]。これらは、手や指に負担をかけない模範的な運指を生成することを目的としており、実際に演奏者が弾いている楽曲の運指を取得することを目的としている本研究とは異なる。また、これらの方式では触弦については考慮していない。

TDR(Time Domain Reflectometry) を用いて、線状の導電物質を組み換えが可能なタッチセンサにするシステム [12] では、アプリケーションの一例として、弦楽器の弦をタッチセンサとし、各弦に対して、指 2 本までの触弦位置の認識を実現している。しかし、TDR メータは感度が非常に高く、無線通信などによりノイズが入り認識精度が低い。また、TDR メータは高価かつ大型のため、一般の利用には適していない。本研究では、RC ローパスフィルタという広く一般に普及している電気回路の仕組みを認識に利用しており、小型軽量、低価格で実現可能である。

また、静電容量センサを用いたシステムとして Smart-Skin [13] やテルミンなどがあげられる。これらのシステムは人が持つ静電容量を利用しており、触弦認識には本研究と同種の技術が使われているが、押弦と触弦を区別する機構がなく、これらの技術をそのまま利用することは難しい。

## 5. おわりに

本研究では、弦楽器における弦やフレットの導電性を利用した触弦認識システムを構築した。提案システムは弦とフレットの導電性や、人が弦に触れた場合の弦の静電容量の変化を利用して押弦、触弦、離弦を認識している。また、触弦を考慮した運指認識技術のアプリケーションについて考察し、カメラと音響信号を組み合わせる従来手法と提案手法との違いを分析した。プロトタイプシステムの評価実験から高精度な触弦認識をできることが明らかになった。

## 謝辞

本研究の一部は、科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業(さきがけ)および文部科学省科学研究費補助金基盤研究(A)(20240009)によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 竹川佳成, 寺田 努, 西尾章治郎: 鍵盤楽器のための実時間運指取得システムの構築, コンピュータソフトウェア(日本ソフトウェア科学会論文誌) インタラクティブソフトウェア特集, Vol. 23, No. 4, pp. 51–59 (2006).
- [2] 澤 光映, 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦: 演奏ルールを用いたウッドベースのための実時間運指取得システムの設計と実装, コンピュータソフトウェア(日本ソフトウェア科学会論文誌) インタラクティブとソフトウェア特集, Vol. 27, No. 1, pp. 56–66 (2010).
- [3] B. Howard and S. Howard: Lightglove: Wrist-Worn Virtual Typing and Pointing, *Proc. of the 5th IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC2001)*, pp. 172–173 (2001).
- [4] データグローブ, <http://www.nihonbinary.co.jp/124CyberGlove.html>.
- [5] C. Kerdvibulvech and H. Saito: Real-Time Guitar Chord Recognition System Using Stereo Cameras for Supporting Guitarists, *Proc. of ECTI Transactions on Electrical Eng, Electronics, and Communications (ECTI-EEC 2007)*, Vol. 5 No. 2, pp. 147–157 (2007).
- [6] 青木直史, 棚橋 真, 岸本英一, 安田星季, 岩越睦郎: 画像処理によるギター運指動作のキャプチャリング, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, p. 110 (2005).
- [7] 林田教裕, 水谷哲也: 楽曲構造に基づくピアノ運指ルールの論理表現, 情報処理学会第 65 回全国大会講演論文集, 第 2 分冊, pp. 203–204 (2003).
- [8] 大河原正憲, 武田正之: 演奏者に合う指使いを学習できる光と振動を活用したピアノ独習支援システム, 第 15 回日本ソフトウェア科学会インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2007), pp. 153–154 (2007).
- [9] A. Kasimi, E. Nichols, and C. Raphael: Automatic Fingering System (AFS), *Proc. of 6th International Society for Music Information Retrieval Conference (ISMIR 2005)*, poster presentation (2005).
- [10] D. Radicioni, L. Anselma, and V. Lombardo: A Segmentation-based Prototype to Compute String Instruments Fingering, *Proc. of Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM 2004)* (2004).
- [11] 三浦雅展, 柳田益造: 単旋律ギター演奏における最適押弦位置決定システムの構築, 情報処理学会研究報告(第 45 回音楽情報科学研究会), Vol. 2002-MUS-45, No. 40, pp. 127–132 (2002).
- [12] R. Wimmer and P. Baudisch: Modular and Deformable Touch-Sensitive Surfaces Based on Time Domain Reflectometry, *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2011)*, pp. 517–526 (2011).
- [13] K. Fukuchi and J. Rekimoto: Interaction Techniques for SmartSkin, *Proc. of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST 2002)*, demonstration paper (2002).