Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-05-18

ギターのための触弦認識システムの構築

飛世，速光
竹川，佳成
寺田，努
塚本，昌彦

(Citation)
コンピュータソフトウェア,31(2):2_57-2_66

(Issue Date)
2014-04-24

(Resource Type)
journal article

(Version)
Version of Record

(Rights)
© 2014 日本ソフトウェア科学会

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/90005158

推薦論文● WISS2012

ギターのための触弦認識システムの構築

飛世 速光　竹川 佳成　寺田 努　塚本 昌彦

ギター演奏において運指 (指使い) 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 本の弦上にあるなど，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，ギター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．また，実装したプロトタイプを用いて，システムの認識率を調査する実験を行い，高精度に触弦認識できることを確認した．さらに，本研究の枠組みを利用したアプリケーションを提案した．

In guitar performance, fingering is an important factor, and complicated. In particular, the fingering of the left hand comprises various relationships between the finger and the string, such as a finger touching the strings, a finger pressing the strings, and a finger releasing the strings. The recognition and distinction of the precise fingering of the left hand is applied to a self-learning support system, which is able to to detect strings being muted by a finger, and which transcribes music automatically, including the details of fingering techniques. Therefore, the goal of our study is the design and implementation of a system for recognizing the touch of strings for the guitar. We propose a method for recognizing the touch of strings based on the conductive characteristics of strings and frets. We develop a prototype system, and evaluate its effectiveness. Furthermore, we propose an application which utilizes our system.

1 はじめに

ギター演奏における演奏技術の 1 つとして運指が存在する．本研究で対象とするギターにおいて，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，弦楽器であるベースを対象とし，音響信号処理とカメラから得られた画像を用いて高精度な運指検出を行うシステム [1] を構築してきた．しかし，このシステムでは，撥弦時に音高を決定した運指の情報しか取得できない．ギター演奏では，触弦や押弦，離弦といった状態や，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し，ミュートや予備動作のための指の配置の確認を

Construction of a System for Recognizing Touch of Strings for Guitar.
Hayami Tobise, Masahiko Tsukamoto, 神戸大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Kobe University.
Yoshinari Takegawa, 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.
Tsutomu Terada, 神戸大学大学院工学研究科/科学技術振興機構さきがけ, Graduate School of Engineering, Kobe University/PRESTO, Japan Science and Technology Agency.
コンピュータソフトウェア, Vol.31, No.2 (2014), pp.57–66.
[研究論文] 2013 年 1 月 8 日受付.

含んだ独習支援や，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，ギターのための触弦認識システムの構築を目的とする．提案システムは，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機構をもつ．この方式は楽器自体への改造を必要とせず，アタッチメントを取り付けるだけで既存の楽器に適用できる．また，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必要な認識手法について検討した．

2 設計

本研究ではギター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，ギター初級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っての訓練や，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．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 種類が主に考えられる．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

まず，運指取得のために用いる手法として，MIDI ギターやギターのピックアップから得られる音響信号を用いる手法が考えられる．しかし，音響信号からは音高や発音タイミングなどの演奏情報しか取得することができないため，各指の指板上の位置を認識できず，音響信号のみで運指は取得できない．そこで，筆者らの研究グループでは，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像データによって各指の指板上における位置情報を取得し，音響信号から得られた音高や発音タイミングの情報と組み合わせて用いることで．押弦している指を認識するシステム [1] を構築した．音響信号とカメラを用いる手法は，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．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た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たてている．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．また，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

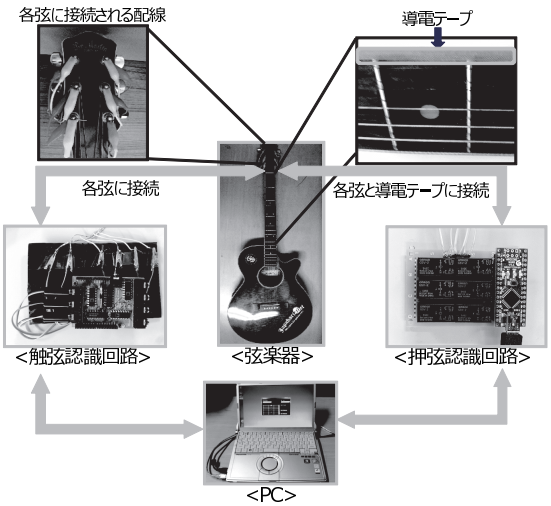

図 1 システム構成

と回路間の配線は，ギターのヘッドに接続されているため，演奏を妨げず，演奏で用いるギター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 図 1 に示すように，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，指が各弦に触れた際の各弦の静電容量変化を検出することで，触弦を認識する．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 Δt 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 Δt が発生する．波形の遅延時間 Δt は，図 2(1) の波形と図 2(3) 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．

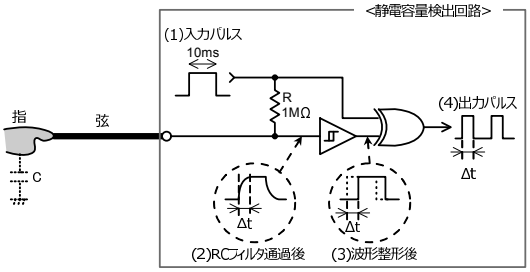

図 2 触弦認識回路

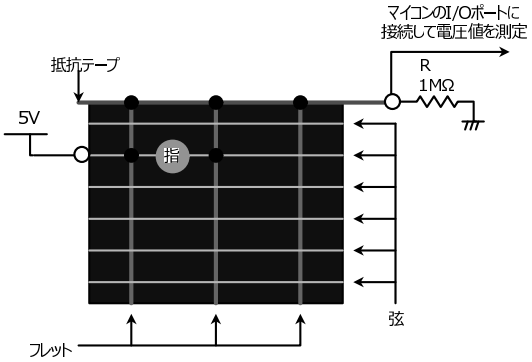

図 3 押弦認識回路の例

押弦認識回路 押弦認識回路はギターの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回路の入出力ポートにそれぞれ接続されており，ギターの各弦には時分割で電圧が印加される．このとき，押弦状態であれば，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，触弦認識回路と押弦認識回路は電気回路として干渉するため同時に用いることができない．そのため，触弦認識回路と押弦認識回路は交互に動作させ，触弦認識回路によって認識を行っている間はリレーを用いて押弦認識回路とギターの各弦との間の配線を開放することで，押弦認識回路が触弦認識に影響を与えない仕組みになっている．

電気回路を用いる手法は，離弦，触弦，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．また，人体と弦の接触を認識するため，右手と弦の接触によって誤認識が生じる．したがって演奏には非導電性のピックを用いる必要がある．

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

表 1　表 2 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	1 本の弦に対して 1 本の指を認識する (注 1)
		2 本以上	1 本の弦に対して配置されている 2 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
	発音に関わらない指	予備動作	発音前に次の発音のために準備している指
		ミュート	各弦をミュートしている指
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		各弦に対して複数の指を認識するときに必要である
	必要※ 2		ハーモニクスが鳴るかどうかも考慮するときに必要である
	必要※ 3		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

で認識できる項目を分析する．また，想定するアプリケーションの例を挙げ，各アプリケーションの構築に必要な認識項目も同時に分析する．さらにアプリケーションと認識手法との対応関係を明らかにし，従来手法と電気回路を用いる手法を組み合わせることで，新たなアプリケーションが構築できることを示す．ここで表 1 は，表 2 で使用される用語を説明している．

2.2.1　各認識手法で認識できる項目

表 2 を用いて，従来手法である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て利用す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る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が，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．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

表 2 電気回路を用いる手法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		
							従来手法のみ			提案手法含む						
							カメラ	音響信号	カメラ 音響信号	電気回路	カメラ 電気回路	音響信号 電気回路	カメラ 音響信号 電気回路	発音に 関わる 指	発音に関わらない指 予備動作	ミュート
押弦/触弦/離弦	発音前	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	-	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	-	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
	発音後	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○			必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○			必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
押弦	発音前	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×		必要※1	必要※3
			1本	有	-	有	×	×	×	×	○	×	○		必要	必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○		必要	必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○		必要	必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×		必要※1	必要※3
			1本	有	-	有	×	×	×	×	○	×	○		必要	必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○		必要	必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○		必要	必要
	発音後	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×		必要※1	必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○	必要	必要	必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○	必要	必要	必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○	必要	必要	必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○	必要	必要	必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○	必要	必要	必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○	必要	必要	必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×		必要※1	必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○	必要	必要	必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○	必要	必要	必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○	必要	必要	必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○	必要	必要	必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○	必要	必要	必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○	必要	必要	必要
触弦	発音前	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	-	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	-	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
	発音後	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○			必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○			必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
離弦	発音前	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	-	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	-	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	-	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
	発音後	2本以上	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○			必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
		1本	2本以上	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×			必要※3
			1本	有	有	有	×	×	△	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	△	×	×	×	○			必要※2,3
					無	有	×	×	×	×	○	×	○			必要※2,3
						無	×	×	×	×	×	×	○			必要※2,3
				無	有	-	×	△	△	○	○	○	○			必要
					無	-	×	×	×	○	○	○	○			必要
各指の位置	-	-	-	-	-	-	×	○	○	×	×	○	○	必要	必要	必要※2,3
発音タイミング	-	-	-	-	-	-	×	○	○	×	×	○	○	必要	必要	必要
音高	-	-	-	-	-	-	×	○	○	×	×	○	○	必要	必要	

表 3　想定されるアプリケーション例と対応する認識手法

想定されるアプリケーション例		認識手法
楽譜の採譜	撥弦時の運指情報のみ	カメラ，音響信号
	発音に関わらない運指情報を含む	現段階では構築できない
次の発音のための指の配置のチェック	各弦に対して 1 本の指のみ認識する	カメラ，音響信号，電気回路
	各弦に対して複数の指を認識する	現段階では構築できない
ミュートのチェック	ハーモニクスを考慮しない	電気回路
	ハーモニクスを考慮する	現段階では構築できない

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．

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を実現するために必要な認識手法を表 3 に示す．表 3 の作成の際には表 2 を用いている．表 2 を用いることで，アプリケーションが認識を必要とする項目の内，最も要求が高い項目を選択していくことで，アプリケーションの構築に対応する認識手法を明らかにできる．表 2 の使い方として，発音に関わる運指情報を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を例に挙げて説明する．このアプリケーションの構築のためには，発音に関わる指の運指のみ認識できれば良いため，表 2 における認識項目 (「指と弦の関係/認識タイミング/指の数/指の特定/弦の制限/指の位置制限」) として，「押弦/発音後/2 本以上/1 本/有/有/無」が最も要求の高い認識項目の組み合わせである．この組み合わせの行を見てみると，認識手法としてカメラと音響信号を組み合わせて用いる従来手法で認識が可能であることが分かる．他のアプリケーションについても，同様の手順で表 2 から対応する認識手法を明らかにした．

次に，提案手法である電気回路による手法を用いて認識できるアプリケーションについて説明する．まず，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．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．同様の理由で，各弦に対して複数の指を対象として次の発音のための指の配置のチェックを行うアプリケーションや，ハーモニクスを考慮したミュートのチェックを行うアプリケーションも現段階では構築できない．以上から，電気回路による手法を用いて，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可能であることが明らかになった．

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．実装したプロトタイプの有効性を示すために，触弦と押弦の基本的な動作を行った場合と，実際の演奏を行った場合それぞれの認識率を調査する実験を行った．なお，プロトタイプシステムにおいて，各回路の応答速度 (回路が動作を始めてから全ての弦に対して認識を終えるまでの速度) を 300 回ずつ計測し，平均値を求めた結果，押弦認識回路が 87.5ms(分散 0.31)，触弦認識回路が 40.8ms(分散 0.21) であった．

3.1　基本動作時の認識率

3.1.1　実験の手続き

まず，システムの基本動作時の認識率を評価するために，各弦の触弦，押弦の認識率を調査した．被験者には，離弦状態から触弦し，次いで押弦するといった試行を各弦に対して 100 回ずつ行ってもらい，システムの認識率を調べた．被験者はギター習熟者 3 名 (被験者 A，B，C) と，ギター初心者 2 名 (被験者 D，E) の計 5 名である．

表 4 基本動作時の認識率

弦	認識率					
	被験者 A	被験者 B	被験者 C	被験者 D	被験者 E	計
	触弦					
第 1 弦	100 %	100 %	99 %	98 %	100 %	99.2 %
第 2 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	96 %	99.2 %
第 3 弦	99 %	99 %	100 %	98 %	99 %	99.0 %
第 4 弦	98 %	99 %	100 %	98 %	100 %	99.0 %
第 5 弦	99 %	100 %	100 %	97 %	100 %	99.4 %
第 6 弦	98 %	100 %	99 %	96 %	98 %	98.2 %
	押弦					
第 1 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
第 2 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
第 3 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
第 4 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
第 5 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
第 6 弦	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %

3.1.2 評価結果および考察

表 4 にシステムの認識率を示す．認識率は触弦に関しては 96 %以上，押弦は 100 %認識するなど，被験者のギターの習熟度に関わらず高精度な認識が行えた．生じた誤認識は全て被験者が触弦を行った際に離弦と認識するものであった．したがって誤認識は全て触弦動作における False Negative であり，ギターの習熟度に関わらず，提案システムにおいて False Positive は生じなかった．誤認識の原因としては，指と弦が接触する面積が小さかったため，検出された静電容量値が触弦を判断する閾値を上回らなかったことが原因だと考えられる．今後，最適な閾値を求め，認識率をさらに向上させる必要がある．

3.2 実際の演奏時の認識率

3.2.1 実験の手続き

次に，システムの実際の演奏時の認識率を評価するために，演奏時における各弦の触弦，押弦の認識率を調査した．

課題曲 課題曲は四種類の基本的なコード演奏を行う曲 A，シンプルなギターリフ演奏を行う曲 B の 2 種類とした．曲 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．音符は全て 8 分音符である．曲 A の和音進行を図 4 に示す．図 4 は，ギターの指板の一部分を模しており，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．曲 B は DEEP PURPLE の smoke on the water の冒頭の 4 小節のギターリフを 10 回繰り返す計 40 小節のフレーズである．発音させない弦はすべて触弦を行い，ミュートするように指示した．演奏テンポは 1 分当たりの 4 分音符数 (BPM) で設定し，曲 A は 120，曲 B は 100 で演奏させた．

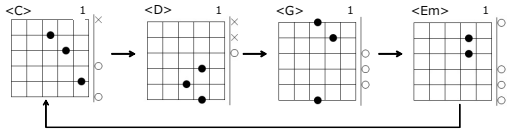

図 4 フレーズ A の和音進行

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．指と弦の関係のデータは演奏における発音タイミングで取得した．動画から目視で正解を判断できないあいまいなデータは除外した．

実験の手続き 被験者に曲 A，曲 B の順に演奏させた．テンポの提示は電子メトロノームを用いた．

3.2.2 評価結果および考察

認識率はいずれの被験者，いずれの曲においてもすべて 100 %であった．誤認識が生じなかったのは，あいまいなデータを除外したことも理由であると考えられるが，実践的な演奏においても高精度な認識ができることが分かった．

また，誤って押弦，触弦，離弦動作を行った場合にも正しく認識が行えており，正しく演奏できている場合と同じく認識精度は 100 %であった．この誤った操作は，ビデオ撮影したデータを目視することで主観的に判断したものであるが，触れているか触れていないか本人にも他者にもわからなかったようなものは評価データから除外しており，実際には基礎的な認識率の

調査の場合と同様，触弦における False Negative が数%含まれると考えられる．

以上から，提案手法における触弦・押弦・離弦認識は高い精度で行えており，初心者などが正しく演奏できていない場合も，高い精度での認識が可能であることが分かった．

4 応用例

電気回路による手法によって構築できるミュートの確認をする独習支援アプリケーションを実装した．また，提案システムの発展的な応用例について示す．

4.1 ミュートチェックアプリケーション

このアプリケーションではマイクを使って発音タイミングを認識している．図 5 に実装したアプリケーションのスクリーンショットを示す．アプリケーションでは，楽譜と現在の演奏箇所，演奏箇所に対応した正しい各弦と指の関係 (図 5 左下)，演奏者の各弦と指の関係 (図 5 右下) を表示する．演奏者の各弦と指の関係が正しい状態で演奏された場合のみ，楽譜上に示した演奏箇所が次の箇所に移動する．特に初心者は，ミュートが正しくできているかどうかを撥弦された音だけで判断することは難しい．本アプリケーションを利用することで，ミュートし忘れや過度なミュートを防止できギター演奏を効率的に学習できる．

4.2 発展的な応用例

これまでで述べたアプリケーション以外に，楽器の導電部に電流を流すという提案システムの枠組みを活用することでさまざまなアプリケーションを構築できる．

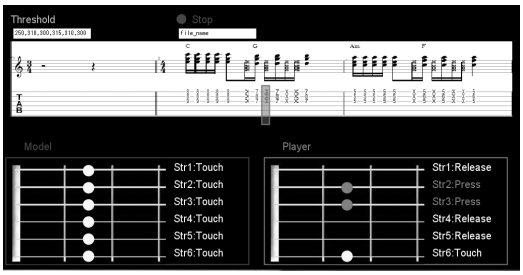

図 5 ミュートチェックアプリケーションのスクリーンショット

演奏の分析：発音に関わらない運指の情報を含んだ運指情報を取得し分析することで，異なる演奏レベル者間，手の大きさなど異なる身体特性，平常時や緊張時といった異なる精神状態における演奏を比較でき，新たな特徴量を用いた演奏分析を行える．

遠隔レッスンへの演奏情報の提供：地理的に離れた教師と生徒がレッスンを行う遠隔レッスンにおいても，映像から判断できない詳細な運指情報を，指導者がリアルタイムで取得することで，生徒の演奏状況を十分に確認でき，より適切な指導が可能になると考えられる．

他の楽器への適用：ウッドベースはフレットをもたない弦楽器であるが，導電テープでフレットを作成することで，本研究で提案したギターと同様のことができる．また，クラリネット，トランペットなどの金管楽器においても「口をマウス部につけているか」,「ピストン部に指が設置しているか」といった細やかな動作を認識できる．

電気ショックによる教示：例えば，誤った演奏をしたときに瞬間的に弦に大電流を流し電気ショックを学習者に提示することで，演奏が間違っていることを提示できる．

触弦によるコマンド入力：譜めくりやエフェクトの適用などのコマンドを，触弦により操作する．押弦と離弦の組み合わせでも同種のことができるが，この操作により不要な音が発生する可能性があるため，触弦の方が適切であると思われる．

5 関連研究

指の位置を計測するデバイスの事例として，Lightglove [2] およびデータグローブ [3] があげられる．Lightglove は光センサと LED を内蔵するリストバンド型デバイスで，データグローブは光ファイバや磁気センサを手袋に内蔵する手袋型デバイスであり，各指の相対的な位置を認識できる．これらのデバイスから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できる．特に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，これらのデバイスは弦楽器演奏を想定していないため，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 [4] 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バストな指認識を行い，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 [5] は，フォ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ず，また触弦状態を識別できない．本研究の触弦認識システムは弦と認識回路をワニ口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 [6] - [9]．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 [10] では，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高くない．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 SmartSkin [11] 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，接触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．

6 おわりに

本研究では，ギター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．

参 考 文 献

[1] 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, Vol. 27, No. 1(2010), pp. 56–66.

[2] Howard, B. and Howard, S.: Lightglove: Wrist-Worn Virtual Typing and Pointing, in *Proc. of the 5th IEEE International Symposium on Wearable Computers* (*ISWC2001*), 2001, pp. 172–173.

[3] データグローブ, http://www.nihonbinary.co.jp/124CyberGlove.html.

[4] Kerdvibulvech, C. and Saito, H.: Real-Time Guitar Chord Recognition System Using Stereo Cameras for Supporting Guitarists, in *Proc. of ECTI Transactions on Electrical Eng, Electronics, and Communications* (*ECTI-EEC 2007*), Vol. 5 No. 2, 2007, pp. 147–157.

[5] 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, 2005, p. 110.

[6] 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), 2007, pp. 153–154.

[7] Kasimi, A., Nichols, E. and Raphael C.: Automatic Fingering System (AFS), in *Proc. of 6th International Society for Music Information Retrieval Conference* (*ISMIR 2005*), poster presentation, 2005.

[8] Radicioni, D., Anselma, L. and Lombardo V.: A Segmentation-based Prototype to Compute String Instruments Fingering, in *Proc. of Conference on*

Interdisciplinary Musicology (*CIM 2004*) , 2004.
[9] 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, 2002, pp. 127–132.
[10] Wimmer, R. and Baudisch, P.: Modular and Deformable Touch-Sensitive Surfaces Based on Time Domain Reflectometry, in *Proc. of ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (*UIST 2011*), 2011, pp. 517–526.
[11] Fukuchi, K. and Rekimoto, J.: Interaction Techniques for SmartSkin, in *Proc. of the ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (*UIST 2002*), demonstration paper, 2002.

飛世速光

2012 年神戸大学工学部電気電子工学科卒業．同年より同大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士前期課程，現在に至る．

竹川佳成

2003 年三重大学工学部情報工学科卒業．2005 年大阪大学大学院情報科学研究科修士課程修了．2007 年同大学院情報科学研究科博士課程修了．同年より神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部助教．2007 年より神戸大学大学院工学研究科助教，CrestMuse プロジェクト共同研究員を兼任．2012 年より公立はこだて未来大学システム情報科学部助教，現在に至る．2011 年には MIT Media Lab. にて Visiting Assistant Professor を兼務．博士 (情報科学)．音楽情報科学，ウェアラブルコンピューティング，教育工学の研究に従事．情報処理学会の会員．

寺田　努

1997 年大阪大学工学部情報システム工学科卒業．1999 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了．2000 年同大学院工学研究科博士後期課程退学．同年より大阪大学サイバーメディアセンター助手．2005 年より同講師．2007 年神戸大学大学院工学研究科准教授，現在に至る．2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事，2005 年には同機構事務局長を兼務．2004 年には英国ランカスター大学客員研究員を兼務．博士 (工学)．ウェアラブルコンピューティング，ユビキタスコンピューティングの研究に従事．IEEE，情報処理学会，電子情報通信学会，日本データベース学会，ヒューマンインタフェース学会の各会員．

塚本昌彦

1987 年京都大学工学部数理工学科卒業．1989 年同大学大学院工学研究科修士課程修了．同年シャープ (株) 入社．1995 年大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻講師，1996 年同専攻助教授，2002 年同大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻助教授，2004 年神戸大学電気電子工学科教授となり，現在に至る．2004 年より特定非営利活動法人ウェアラブルコンピュータ研究開発機構理事長を兼務．工学博士．ウェアラブルコンピューティングとユビキタスコンピューティングの研究に従事．ACM, IEEE 等，8 学会の会員．