

さまざまな演奏スタイルに適応可能な 電子鍵盤楽器 UnitKeyboard の設計と実装

竹川佳成 寺田 努 西尾章治郎

鍵盤楽器の歴史は古く、ピアノ、オルガン、アコーディオン、鍵盤ハーモニカなど目的や状況に応じて鍵盤数、段数など鍵盤構造が異なるさまざまな鍵盤楽器が提案されてきた。しかし、従来の電子鍵盤楽器は、鍵盤数固定の単一楽器であったため、手軽さの問題や求められる鍵盤構造に柔軟に適応することが難しかった。そこで、本研究では1オクターブを基本単位とする鍵盤を組み合わせることでさまざまな鍵盤構造に適応できるユニット鍵盤 (UnitKeyboard) を構築する。また、鍵盤演奏における鍵の関係に関する特性を用いることで設定負荷を軽減する。さらに、このようなユニット鍵盤の枠組みを利用したアプリケーションを提案する。

Musical keyboard instrument has a long history, then we have many kinds of keyboards (ex. piano, choir organ, and accordion). Since conventional keyboards cannot change their hardware configuration such as the number of keys they have, we have to carry with a too big keyboard for playing music that requires only small diapason. To solve this problem, the goal of our study is to construct UnitKeyboard, which has only 12 keys (7 white keys and 5 black keys) and connectors to dock other UnitKeyboard. We can build various kinds of keyboard configurations by connecting UnitKeyboard to others. Moreover, since UnitKeyboard has various functions such as the automatic settings considering the relationship among multiple keyboards, and we discuss applications using this framework of UnitKeyboard.

1 はじめに

鍵盤楽器の歴史は古く、ピアノ、オルガン、アコーディオン、鍵盤ハーモニカなど目的や状況に応じて鍵盤数、段数など鍵盤構造が異なるさまざまな鍵盤楽器が提案されてきた。また、1つのパートから構成される楽曲を1人で演奏する独奏や、複数人で演奏する合奏、複数のパート (パートとは、アンサンブルを構成する各楽曲のこと) から構成された曲の各パート

を1人で演奏する重奏や複数人で演奏するアンサンブル、1つの楽器を複数人で演奏する連弾などさまざまな演奏形態が用いられてきた。

一方、電気・電子技術の進展に伴い、電子オルガンや電子ピアノをはじめとする電子鍵盤楽器が開発されてきた。これらは、音量や音高、音色を設定できるなど多彩な機能をもつ。

しかし、従来の電子鍵盤楽器は、鍵盤数固定の単一楽器であったため、「必要な音域が2オクターブの楽曲を演奏するだけのために、88鍵のキーボードを持ち歩く必要がある」といったように手軽さの問題があった。また、「88鍵のキーボード1台では2段の鍵盤をもつエレクトーンのための楽曲を演奏できない」「エレクトーンで、必要な音域が88鍵のピアノ楽曲を演奏できない」など、求められる鍵盤構造に柔軟に適応することが難しかった。

そこで、本研究では1オクターブを基本単位とする鍵盤を組み合わせることでさまざまな鍵盤構造に適応できるユニット鍵盤 (UnitKeyboard) を構築する。

Design and Implementation of UnitKeyboard for Various Musical Execution Styles

Yoshinari TAKEGAWA*, Tsutomu TERADA** and Shojiro NISHIO***, *神戸大学自然科学系先端融合研究環, Organization of Advanced Science and Technology, Kobe University, **神戸大学大学院工学研究科, Graduate School of Engineering, Kobe University, ***大阪大学大学院情報科学研究科, Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

コンピュータソフトウェア, Vol.16, No.5 (1999), pp.78-83.

[論文] 1999年8月3日受付.

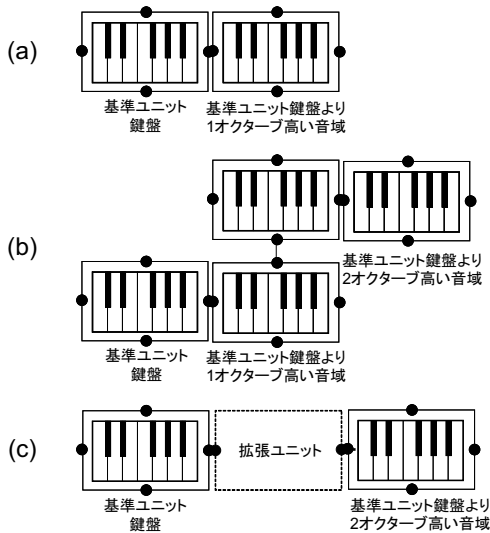


図1 ユニット鍵盤の構成例

また、鍵盤演奏における鍵の関係に関する特性を用いることで設定負荷を軽減する。さらに、センサやアクチュエータなど入出力機器を搭載した拡張ユニットを用いることで直観的なユニット鍵盤の操作を実現する。

このように鍵盤をユニット化し、センサやアクチュエータと連携できるユニット鍵盤の特性を活かすことで新たな鍵盤操作方法やパフォーマンスなどさまざまな応用が考えられる。本論文では、ユニット鍵盤の枠組みを利用した応用について議論する。

以下、2章でユニット鍵盤の設計について説明し、3章で実装について述べる。4章で応用について説明し、5章で評価について述べる。6章で関連研究について説明し、最後に7章で本研究のまとめを行う。

2 設計

ユニット鍵盤は、1オクターブの鍵盤を組み合わせることでさまざまな鍵盤構造を構築できる鍵盤楽器である。例えば、図1-(a)に示すように、ユニット鍵盤2個を横並びに接続することで、2オクターブの音域をもつ鍵盤楽器となる。また、図1-(b)に示すように、2オクターブのユニット鍵盤を1オクターブ分ずらして縦並びに接続すると、エレクトーンのような2段の鍵盤をもつ構造となる。接続と音域の関係につい

ては後の章で詳しく説明するが、基本的に縦方向で重なっている2つのユニット鍵盤は上下で結ばれているため同じ音域となる。また、図1-(c)に示すように仮想的なユニット鍵盤である「拡張ユニット」を挟むことで、仮想的に1オクターブ音域を高くすることもできる。このように、ユニット鍵盤は組み合わせ次第でさまざまな鍵盤構造を構築できる。

2.1 要素技術

提案するユニット鍵盤に必要な要素技術に関して述べる。

関係性 ユニット鍵盤はさまざまな鍵盤構造を実現できる一方、結合した鍵盤全体の振る舞いを設定するために個々のユニット鍵盤を設定する必要がある。そこで、鍵盤の構成における関係性に注目することで設定負荷を軽減する。本研究では、ユニットおよびユニット群に「接続位置」、「プライオリティ」、「グループ」の3つの関係を定義する。以下、それぞれについて説明する。

なお、ユニットとはユニット鍵盤および拡張ユニットの総称であり、ユニット群とは2つ以上のユニット鍵盤から構成される単一の鍵盤のことである。

(a) 接続位置 1オクターブの鍵盤であるユニット鍵盤は四方にコネクタを搭載し、ユニット鍵盤同士を直接あるいはケーブルで接続できる。ユニット鍵盤同士がどの側面で接続されたかで、音色や音域などの設定が変化する。接続関係に関する意味づけの一例として既存の鍵盤楽器のモデルを適用した場合について説明する。一般に鍵盤は左の鍵ほど割当て音が低く、右の鍵ほど高くなり、音色はすべての鍵において同じである。したがって、図2に示すように、横方向に接続された鍵盤は、基準ユニットの音色を継承し、音域は1オクターブずつ低/高くなる。一方、縦方向に接続された鍵盤は、音域は基準ユニットと同じになり、音色は、同じ行のユニット鍵盤から制約を受けるが、基準ユニットからの制約は受けない。

なお、この接続位置の規則にもとづく場合、図3に示すように一部のユニット鍵盤に設定の競合が

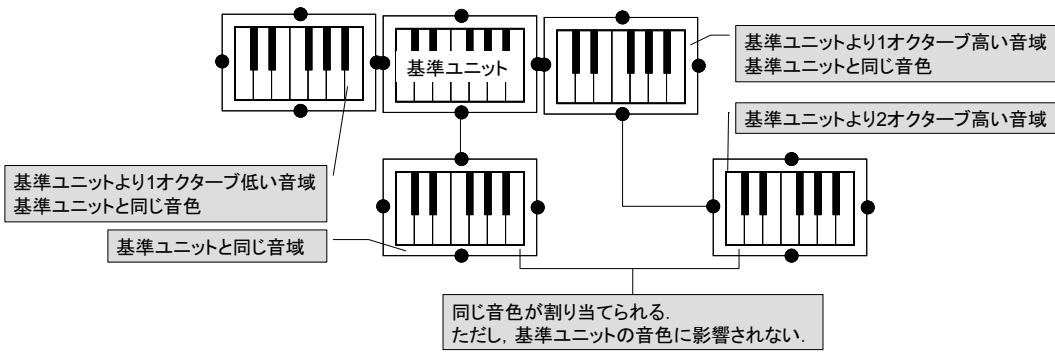


図2 接続位置による音色や音域の割り当て

生じてしまう。この競合を避けるために、本システムではループを許容しない。

(b) プライオリティ 複数のユニット鍵盤が接続されている場合、ユニット群全体の音高や音色の基準となる鍵盤を基準ユニットと呼ぶ。ここでは基準ユニットの設定がその他の鍵盤に継承されるという親子関係が見られる。ユニット鍵盤やユニット群の関係にプライオリティという関係を導入することで、自分より弱いプライオリティをもつユニット群の設定を制御できるといった操作が可能となる。

(c) グループ 「1人で複数の鍵盤楽器を使う」「複数人でアンサンブルを行う」「コンサートで複数の楽曲を演奏する」など一度に複数の楽器を使う、複数の楽曲を演奏する、といった場合、音色やパート、演奏形態、演奏する楽曲などさまざまなグループが形成される。ユニット群にグループという関係を付与することで、グループ単位で音色や音域を一括制御できる。

接続性 ユニット鍵盤を使用する場合、ユーザは楽曲に合わせて鍵盤構成を変更できる。また、「異なる鍵盤構成の楽曲を連続して演奏する」といったように楽曲と楽曲の合間に鍵盤構成を変更する場合や、「演奏しながら鍵盤構成を変更する」場合も考えられる。したがって、できる限りユニット鍵盤間の脱着作業は負担とならないことが望ましい。

ユニット鍵盤の物理的な構成変更方法としては、演

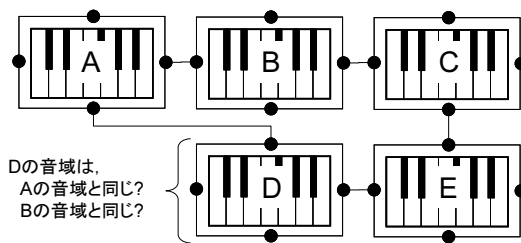


図3 競合している音域の例

奏者自身が手動で行う方法とモータなどのアクチュエータを用いて自動的に行う方法が考えられる。

鍵盤構成の自動的な変更は、システム構成が複雑になる一方、鍵盤移動に要する手間が軽減され、演奏に専念できる。移動させる鍵盤の指定方法として、あらかじめ鍵盤構成や移動経路をプログラムしておきタイミングだけを指定する方法や、移動させる鍵盤やその移動経路をその都度、指定する方法が考えられる。前者の指定方法は演奏者に負担をかけないが、後者は状況に応じて自由に鍵盤構成を変更できる。それぞれ利点・欠点があるため、本研究では選択的に利用する。さらに、移動させる鍵盤の指定をスムーズに行うためにセンサデバイスを活用する。

一方、演奏者が手動で鍵盤を動かす場合、演奏を中断せずに行うことは難しい。しかし、シンプルなシステム構成で信頼性が高く、演奏の合間に鍵盤構成の変更を行うことも可能であるため、何らかのトラブルで自動的に行えない場合の代替方法として有効である。したがって、鍵盤移動において自動/手動ともに

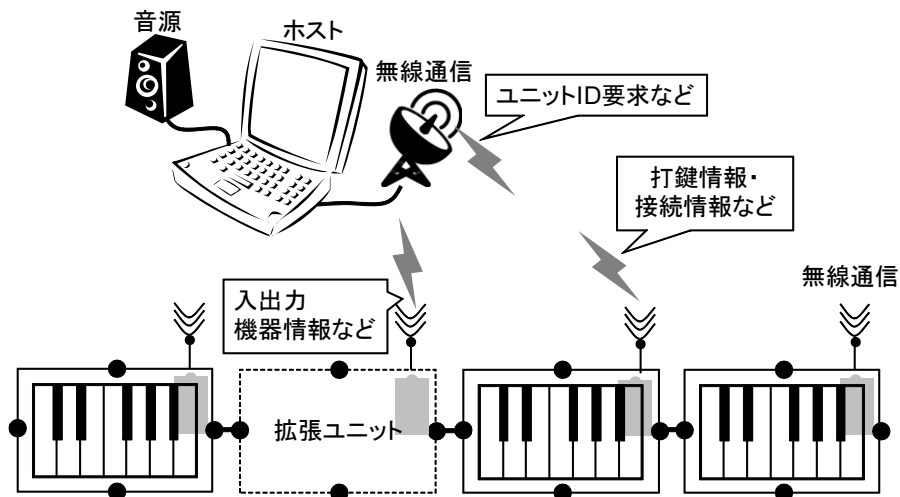


図4 システム構成

利点・欠点があるため、両手法とも使えるシステム設計をめざす。

このように、ユニット鍵盤は、スイッチやセンサなどの入力デバイス、ディスプレイやアクチュエータなどの出力デバイスをもつ「拡張ユニット」と連携することでスムーズなユニット鍵盤操作を実現する。

リアルタイム性 鍵盤構成が演奏中や演奏の合間に変化するため、リアルタイムに鍵盤構成の解析および関係性の構築を行う必要がある。また、データの中には接続に関する情報だけでなく、打鍵情報といったシビアにリアルタイム性が求められる情報も含まれている。

高いリアルタイム性を実現するためのシステム設計についてデータ管理およびネットワーク構成の観点から議論する。

(a) データ管理 システム内でやりとりされるデータは、あるユニットが脱着したときに生成される接続データ、各ユニットのためのコンフィギュレーションデータ、ユニット鍵盤が生成する打鍵データ、拡張ユニットが生成するセンシングデータやアクチュエータを制御するためのアクチュエーションデータが考えられる。

各ユニットでコンフィギュレーションデータや接続データを管理する場合、鍵盤構成の変更が生

じたとき、すべてのユニットに接続関係の更新情報を通知し、更新情報を受信したユニットは鍵盤構成の解析や自身のコンフィギュレーションを再計算する必要がある。一般にユニットは、計算リソースの乏しいマイコンで動作するため、これら通信にかかる処理や再計算は、大きな負荷となってしまうリアルタイム性に欠けてしまう。したがって、本研究では、接続データやコンフィギュレーションデータを一括に管理し、形状認識や全ユニットのコンフィギュレーションを計算する「ホスト」を用意する。

(b) ネットワーク構成 ホストへの接続データの通知には、ホストと通信できるユニットまで接続データを伝搬させホストに通知する方法と、ユニットすべてに通信機能をもたせ直接ホストとやりとりする方法がある。前者の方法は、全てのユニットにホストと通信する特別な通信モジュールは必要ないが、接続データが伝送経路上の各マイコンを通るため、通信のオーバーヘッドが大きくなりリアルタイム性に欠けてしまう。したがって、本研究では、各ユニットにホストと通信可能な機能をもたせ、ユニット間でやりとりするデータをできる限り少なくするように設計する。



図5 プロトタイプシステム



図6 ユニット鍵盤の概観

3 実装

3.1 ハードウェア構成

プロトタイプシステムのユニット鍵盤の構成を図4に示す。システムは、ホスト、ユニット鍵盤、拡張ユニットから成る。また、実装したプロトタイプシステムを図5に、ユニット鍵盤の概観を図6示す。ホストは、SONY社のノートパソコン(VGN-S92PS)を使用し、PC上のソフトウェアの開発は、Windows XP上でVisual C++ .NET 2003を用いて行った。また、無線モジュールはアローセブンのUM-100を使用し、ユニット鍵盤および拡張ユニットの制御はPIC16F873Aを用いて行い、プログラミングは、MICROCHIP社のMPLAB上でCCS社のPIC Cコンパイラを用いた。

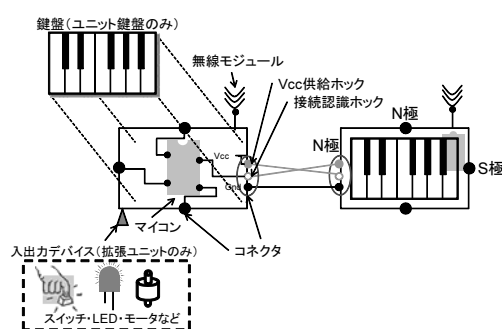


図7 ユニットのハードウェア構成

以下、各構成要素について詳細に説明する。

3.2 ホスト

ホストは、各ユニットのコンフィギュレーションデータの管理や形状認識などを行うためのCPUやメモリ、他ユニットと通信するための無線モジュール、発音を行うための音源モジュールをもつ。ホストの機能は大きく3つある。なお、ホストにユニットのコンフィギュレーションなどシステムステータスを表示する機能を必須としない。したがって、プロトタイプではホストとしてPCを用いているがユニット鍵盤の1つに高機能なマイコンをもたせることでホスト機能を兼ねさせることも可能である。

デバイス情報の管理 各ユニットのデバイス情報を管理する。ユニットのデバイス情報を表1に、ホストとユニット間でやりとりされる制御コマンドを表2に示す。

発音処理 ユニットのデバイス情報と、受信した打鍵情報をもとに、音源モジュールを用いて発音する。

関係性の付与と管理 ホストは、各ユニットが検出した接続情報をもとにユニット間の関係性を管理する。ホストから独自に接続関係を付与することも可能である。

3.3 ユニット鍵盤

ユニット鍵盤のハードウェア構成を図7に示す。ユニット鍵盤は、マイコン、1オクターブの鍵盤、各側

表 1 デバイス情報

項目	説明
ユニット ID	一意に割り当てられる ID
コネクタの場所と数	配置されているコネクタの場所と個数
接続ユニット ID	接続されている他のユニットの ID
基準ユニット ID	基準ユニットの ID
音域	割り当てられている音域
音色	割り当てられている音色
プライオリティ	自分のプライオリティ
搭載入出力機器	搭載する入出力デバイスの種類

表 2 制御コマンド

ホストからユニット	ユニットからホスト
ユニット ID 要求	新規参加通知
コネクタ情報要求	ユニット ID 通知
入力データ要求	コネクタ情報通知
出力デバイス制御	接続情報更新
	打鍵情報通知
	搭載入出力機器情報通知
	入力データ通知

面に接続関係を構築するためのコネクタ、ホストコンピュータと通信するための無線モジュールから成る。また、スムーズな脱着操作を実現するために、コネクタはマグネット式コネクタを自作した。図 7 に示すように、各コネクタの極性は、左右および上下でそれぞれ極性が異なるように配置した。これにより、一般的な鍵盤構造に習い接続した場合、引力が働き接続を助長し、鍵盤構造に反する場合、斥力が働き接続を拒否する。

ホストコンピュータとのコネクションの確立 ユニット鍵盤は電源投入直後「新規参加通知」をブロードキャストし、ホストからの返信に対して、プリセットされている自身の ID とコネクタに関する情報を送信してコネクションを確立する。

打鍵情報の通知 打鍵や離鍵イベントが発生したとき、ホストコンピュータに打鍵情報を送信する。

接続の監視および通知 ユニット鍵盤は、コネクタを用いて接続関係を構築する。ユニットの脱着は、ユニット鍵盤内にあるマイコンが、コネクタ内の接続認識ホックの電圧を測定することで検出する。具体的には、通常 Low レベルにある接続認識ホックが、接続

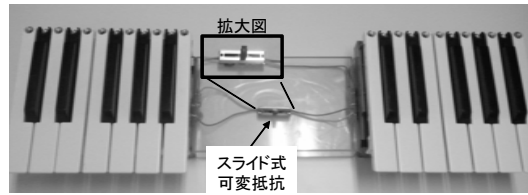


図 8 可変抵抗をもつ簡易ユニット

先のユニットの V_{CC} 供給ホックと接続し High レベルに変化することで検出する。また、接続認識ホックの変化を検出したユニットは、「状態変化があった接続認識ホックのコネクタ」を接続情報更新コマンドに含めホストに通知し、ホストは、連続した 2 つの接続情報更新コマンドを 1 セットとし、2 つのユニットを接続したとみなす。

このように物理的に接続関係を築くことで、ユニット鍵盤どうしが縦横に接続されている様子を眺めれば、ユニット鍵盤どうしの接続関係として視覚的に理解できる。また、ユニット鍵盤はホストとのみ通信し、ユニット鍵盤同士では通信しない。

なお、提案方式では複数の接続が同時に行われた場合に誤検出が起り得る。これは、脱着時にコネクタを介して互いにユニット ID を伝送し合うことでこの競合を回避できるが、マイコンは受信データがあるか頻りにチェックする必要があり、リアルタイム性が求められる打鍵情報の処理の影響が出てくる。一方、提案方式による接続の監視および通知はリアルタイムに処理でき、実際の演奏で同時に複数の脱着が行われる状況は少ないと考え、ユニット鍵盤では提案方式を採用した。

3.4 拡張ユニット

拡張ユニットには、音域を調整するための単純なものと、センサ、通信機器を備えた高機能なものがある。前者は、ユニット鍵盤の間に挟みこんで音域的な距離を作りたいときに使用するもので、2 つのコネクタとコネクタ間の抵抗のみからなるシンプルな構造(図 8)をもつ。この抵抗によりユニット鍵盤は接続されている鍵盤との間に挿入されている拡張ユニットの存在及び個数を計測できる。

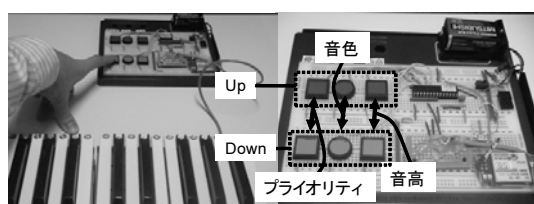


図 9 複数のスイッチをもつ拡張ユニット

後者の拡張ユニットのハードウェア構成を図7に示す。拡張ユニットのハードウェア構成は、マイコン、コネクタ、無線モジュール、入出力デバイスから成り、鍵盤構成の変更、音域や音色の変更、関係性の付与といった鍵盤操作を直観的に行える。

ホストコンピュータとの接続の確立 拡張ユニットはユニット鍵盤と同様、電源投入直後「新規参加通知」をブロードキャストしホストとの接続を確立する。

接続の監視および通知 拡張ユニットは、ユニット鍵盤と同様、コネクタや接続スイッチの状態を監視し、変化があればホストコンピュータに通知する。

入力デバイスのデータ取得および通知 ホストコンピュータからの要求に従い指定の入力デバイスのデータを取得および通知する。

出力デバイスの制御 ホストコンピュータの命令に従い出力デバイスを制御する。

活用事例 拡張ユニットはさまざまなセンサやアクチュエータを始めとする入出力デバイスを搭載でき、入力デバイスを活用し鍵盤構成の変更やユニット鍵盤のコンフィギュレーションを直観的に操作できる。また、出力デバイスを活用することで鍵盤の自律移動や、ユニット鍵盤の設定情報や現在のモードの提示を行える。

本項では、実際に実装し運用した入出力デバイスの活用事例について述べる。

(a) スイッチ ユニット鍵盤の音域、音色、プライオリティの各種設定を拡張ユニット上のスイッチ(図9)で操作する機能を実現した。これにより、

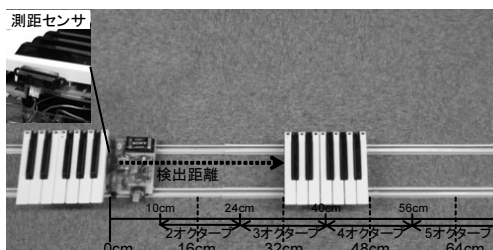


図 10 測距センサをもつ拡張ユニットと利用例

表 3 距離と音域の関係

検出距離	オクターブ
10cm ~ 24cm	2
24cm ~ 40cm	3
40cm ~ 56cm	4
56cm ~ 80cm	5

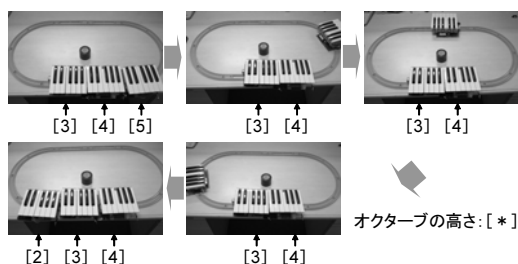


図 11 モータをもつ拡張ユニットと利用例

演奏者が演奏している手元でユニット鍵盤の設定を手軽に変更することができるようになった。

(b) 測距センサ 測距センサを搭載した拡張ユニットとユニット鍵盤との物理的距離を計測することで、図10に示すように、ユニット鍵盤が離れるほどユニット鍵盤の音域がオクターブ単位で変化する音高設定機能を実現した。実装では、測距センサとしてSHARP社のGP2Y0A21YKF6を使用した。また、検出距離と音域の割当ては、既存の鍵盤楽器のモデルを適用し、ユニット鍵盤1個分の長さ(約16cm)を基準に1オクターブずつ音域を変化させるようにした。また、使用した測距センサの検出距離は10cm~80cmであったため、検出距離と音域の関係は表3のように



図 12 協調演奏の様子

設定した。

測距センサを用いることで、ケーブルなどを使用せずにユニット鍵盤の音域を変更でき、可変抵抗をもつ簡易ユニットと異なり、物理的なユニット鍵盤の位置関係から視覚的に音域を確認できるようになった。

(c) モータ タイヤ付モータをもつ拡張ユニットを用いて、ユニット鍵盤を自律的に移動させ不足している音域の補完を行った(図 11)。モータユニットは、LEGO 社のマインドストーム RCX を使用した。実装したモータユニットの速度は約 7cm/s と遅く瞬時に鍵盤構成を再構築することは難しいが、手動で鍵盤を移動させる場合と比べて鍵盤移動にかかる負荷が軽減され演奏に集中できた。

4 応用

1 オクターブの鍵盤を組み合わせ、センサやアクチュエータと連携できるユニット鍵盤の枠組みを利用することでこれまでにないパフォーマンスや鍵盤操作を実現できる。実際に実装した応用事例について述べる。

4.1 新たなパフォーマンス

ユニット鍵盤の 1 オクターブごとに分離できるという特性を活かし、ユニット鍵盤を使って新たな演奏形態によるパフォーマンスを試みた。例えば、図 12 に示すようにキーボードの音域が不足したとき、他の演奏者から借りるといったパフォーマンスや、図 11 に示すようにユニット鍵盤を自律的に移動させること

で足りない音域を補間するパフォーマンスが考えられる。これらは、演奏に音楽的な要素だけでなく視覚的な面白さを付加でき、被験者から好評であった。

4.2 動きによる鍵盤操作

加速度センサを搭載した拡張ユニット(図 13)を用いて、ユーザの 4 種類の演奏姿勢を認識し音色を自動的に割り当てる機能を実現した。加速度センサは ATR で開発している無線 3 軸加速度センサユニット B-Pack を使用した。また、地磁気センサを搭載した拡張ユニット(図 14)を用いて、4 つの方位を認識し方位に合わせて音色を変更する音色設定機能を実現した。地磁気センサは、Geosensory 社のデジタルコンパス RDCM-802 を使用した。両センサともに教師データとのマッチングにより認識を行っている。

加速度センサや地磁気センサを利用することで、動きに関連付けた鍵盤操作を提案できた。これは、直観的な鍵盤操作や、第三者が鍵盤設定を視覚的に把握できるといった利点があり、例えば、楽器の音色設定を理解できない幼児が利用したり、マーチングバンドなどで、方位や演奏姿勢によって音色や音高を変化させることで、見物人が演奏内容を視覚的に理解できる演出などに応用できる。

5 評価

本章ではプロトタイプの実用性に関する評価結果および鍵盤習熟者に実際に試奏してもらった使用感からユニット鍵盤の演奏性に関して検証した。また、拡張ユニットを利用した応用事例に関して評価を行い提案手法の有効性について調査した。



図 13 姿勢による音色の割当て



図 14 地磁気センサをもつ拡張ユニットと利用例

5.1 ユニット鍵盤に関する評価

5.1.1 リアルタイム性に関する評価実験

演奏者がユニット鍵盤を使って演奏する場合、ユニット鍵盤とホスト間の通信やホスト PC の処理などにより操作から応答が返るまでに遅延が発生する。リアルタイム性は、楽器において重要な要素であるため、プロトタイプに関して打鍵が行われてから発音するまでの発音応答時間および脱着操作が行われてから脱着処理が完了するまでの脱着応答時間について調査した。また、脱着操作は 3.3 節で述べたように連

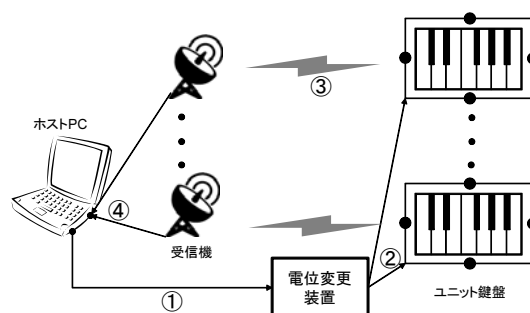


図 15 評価実験のシステム構成

続した 2 つの接続情報で判断している。2 つの接続情報の到着間隔が長ければ誤検出の原因になってしまうため、2 つの接続情報の到着タイミングについても調査した。

システム構成 実験のシステム構成を図 15 に示す。実験で用いたシステム機器構成は 3.1 節で述べたハードウェア構成とほとんど同じであるが、電位変更装置をホスト PC とユニット鍵盤間に新たに設置した。電位変更装置はユーザの代わりに打鍵/離鍵操作や接続操作を電気的に行う装置である。また、電位変更装置は、ホスト PC と通信できる機能を持ち、ホスト PC は任意のタイミングで擬似的に打鍵/離鍵操作や接続操作を制御できる。電位変更装置を用いることで、実際の操作をできるだけ忠実に再現し、かつ、タイミングなどが正確に制御可能な実験環境を確保できる。

実験ではホスト PC として SONY 社のノートパソコン (VGN-S92PS) を使用し、ユニット鍵盤の無線モジュールはアローセブン社の UM-100 を使用した。実験で使用するユニット鍵盤は 5 個で、ホスト PC 側に受信機を 5 個用意し、ユニット鍵盤の無線モジュールとホスト PC 側の受信機は 1 対 1 で通信するように設定した。また、ホスト PC-ユニット鍵盤間およびホスト PC-電位変更装置間の通信速度は 57.6kbps に設定した。なお、ホスト PC-電位変更装置間は有線で接続している。

実験の手続き

実験システム全体の流れを以下に示す。なお、以下

表 4 平均発音応答時間

		単一のユニット鍵盤における同時打鍵数						
		1	2	3	4	5	6	7
1	平均	30.0	31.1	31.1	30.9	30.8	30.8	31.5
	標準偏差	8.5	8.7	6.6	5.4	6.9	7.0	6.0
2	平均	32.6	34.9	34.2	34.8	35.7	35.5	35.2
	標準偏差	8.1	4.9	4.5	3.8	4.5	4.9	4.7
3	平均	36.9	38.1	37.9	38.6	37.9	38.6	38.9
	標準偏差	6.9	5.0	5.1	4.7	3.9	4.7	3.8
4	平均	39.0	40.6	40.1	40.4	42.8	40.6	41.5
	標準偏差	7.7	4.1	3.8	3.5	3.2	3.6	4.0
5	平均	41.1	42.2	44.0	43.5	44.1	45.3	44.6
	標準偏差	5.1	5.0	4.3	4.9	4.7	5.6	4.7

単位：msec

の数字は図 15 の白抜き丸数字に対応している。

1. ホスト PC が電位変更装置に操作命令を送信する。
2. 電位変更装置は、受信した命令に従い、ユニット鍵盤の打鍵/離鍵や脱着を検出しているピンの電位を変更する。
3. 電位の変更を検出したユニット鍵盤は、ホスト PC に打鍵情報や接続情報を通知する。
4. ホスト PC は、受信したメッセージを解析し命令処理を行う。

打鍵/離鍵操作は、ホスト PC が操作命令を送ってから命令が処理されるまでを応答時間とした。なお、脱着操作は該当するユニット鍵盤の接続関係およびデバイス情報が更新されるまで、打鍵/離鍵操作は MIDI 音源に MIDI メッセージが送信されるまでを処理としている。

接続情報の受信タイミングは、1 つ目の接続情報を受信してから 2 つ目の接続情報を受信するまでの時間を計測した。

また、脱着操作命令はある 2 つのユニット鍵盤の脱着を想定し、打鍵/離鍵操作命令は使用するユニット鍵盤数を 1 個から 5 個まで、各ユニット鍵盤の同時打鍵数を 1 鍵から 7 鍵まで変化させた。また、それぞれの場合において 50 回試行した。

実験の結果

表 4 に、打鍵/離鍵操作を行った場合における平均発音応答時間を示す。

使用する鍵盤数が増加するにつれ平均発音応答時間の増加がみられた、単一のユニット鍵盤における同時打鍵数が増加しても平均応答時間に影響はなかった。また、標準偏差も大きければつきはみられなかった。鍵盤数が 1 個、打鍵数が 1 鍵の場合、発音処理が完了するまでに 30msec であった。これは、4 分音符 = 120 の速度における 8 分音符 1000 個分の 1 個に相当し、発音遅れを感じるかどうかは個人差に依存する程度で、その速度で連続打鍵することは不可能であるため、実際の演奏における連続打鍵には十分耐えうる性能だと考える。

この遅延は、マイコンの打鍵検出処理、ユニット鍵盤とホスト PC 間の通信遅延が主な原因として考えられる。具体的には、チャタリングを防止するためにマイコンのプログラム内で 5msec の時間待ちをして鍵盤の状態判定を行っている。また、1 鍵の打鍵情報を伝送するために必要な約 2.0msec(理論値)の伝送時間に加え、無線モジュール間で送受信のタイミングを合わせるために十数 msec 必要である。通信遅延を改善する方法としては、チャタリング検出をハードウェア回路によって行うことや、より高速に通信できる無

線通信モジュールおよび高速に動作するマイコンの利用などが考えられる。

また、単一のユニット鍵盤における同時打鍵数が増加しても平均応答時間に影響が出なかった理由は、ユニット鍵盤では鍵盤内で同時打鍵を検出した場合、一般の MIDI キーボードのように個別に打鍵情報を送るのではなく、まとめて送ることで、データ量を削減し個々のパケット伝送遅延に影響を受けない処理を実現しているためである。

さらに、使用する鍵盤数が増加したときに増える遅延は、ホスト PC が各受信機から送られてくる打鍵情報を個別に処理するためである。発音応答時間の最悪値は、鍵盤数 5 個、各鍵盤の同時打鍵数が 7 個の場合で 56msec であった。この遅延の軽減として、複数のホストによる負荷分散が有効であると考えられる。

一方、脱着処理に関しては、平均速度が 31.9msec(標準偏差 6.4msec) という結果が得られた。脱着にかかる時間は短く、ばらつきも小さく、自然なインタラクションを実現しているといえる。また、2 つの接続情報の受信間隔は平均 2.6msec(標準偏差 0.4msec) で他の接続コマンドの割り込みはほぼ起こらない。

5.1.2 鍵盤習熟者による主観評価実験

4.1 節の実験結果および 20 名のさまざまなレベルの鍵盤習熟者にプロトタイプを使って演奏してもらったコメントから、プロトタイプの演奏性について考察する。

リアルタイム性 ピアニストに実際に試奏してもらったところ「1 つの鍵を打鍵したときの発音遅れは感じない」「トリルのように単音から成るフレーズを高速に演奏しても発音遅れは感じない」「単一のユニット鍵盤上で複数同時打鍵をしても、発音のばらつきは気にならない」と遅延に関する問題の指摘はなかった。

可搬性 ユニット鍵盤は、演奏で必要な音域の鍵盤だけ持ち歩けることで可搬性の向上を実現した。我々の主張するコンセプトは他の演奏者からも「自由自在に鍵盤構成を変更できるため、屋外で演奏できる楽曲のパラエティが広がって良い」「必要な鍵盤数は、演奏する楽曲や、作曲するときは 2 オクターブあれば十

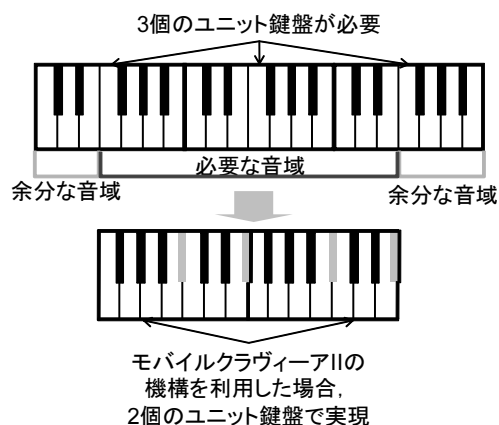


図 16 モバイルクラヴィア II の応用例

分など目的によって異なるため、必要な鍵盤数だけ持ち歩けるのは便利である。」など賛同を得られた。しかし、根本的に必要とする鍵盤領域が広げれば必要なユニット鍵盤数も多くなってしまふ。この問題に対しては、演奏中に鍵盤構成を変更することで緩和できると考えられる。例えば、鍵盤の右端/左端周辺の音域は演奏で使用する頻度が低いなど、楽曲によって、使用頻度が低く、使用頻度が高い音域から外れている演奏領域が存在する。このような音域に対して一時的に鍵盤構成を変更することで補完できる。

また、筆者らが開発したモバイルクラヴィアII(白鍵間に黒鍵を挿入することで小型鍵盤におけるスムーズなキートランスポートを実現した鍵盤楽器) [9] の機構を応用することで、図 16 に示すように持ち運ぶ鍵盤領域を削減できる。

接続性 ユニット鍵盤同士の脱着に関しては「接続操作は直感的でわかりやすく、音色や音高の再設定もスムーズに行えている。」「鍵盤同士を離すときに少し力が必要で、片手で外せるようになるまでに慣れが必要である。」といったコメントが得られた。マグネット型のコネクタを用いることで、ユニット鍵盤を近づけると極性の異なるコネクタ間に引力が生じ、スムーズな接続が実現できた。また、接続状況の変更もリアルタイムに反映されることを確認した。マグネットの引力は、演奏中に接続しているユニット鍵盤が崩れるこ

とを防止し、ユニット全体の形の維持にも役立っている。ユニット鍵盤の離脱においては、マグネットの引力を引き離す必要があるため、離脱操作は接続操作より少し時間がかかってしまうが、演奏に支障をきたさない程度であった。しかし、着脱したユニット鍵盤を他のところへ移動させる作業においては、演奏を一端中断する必要がある。

一方、自動で移動させる場合、鍵盤移動の手間がかからず演奏に集中できるが、実装したタイヤ付モータの速度は遅く瞬時に鍵盤構成を再構築することは難しい。今後は、よりハイスピードなモータを使ったり、より効率的な移動アルゴリズムを提案することで、スムーズな鍵盤移動を実現していきたい。

視認性 ユニット鍵盤に割り当てられる音高や音色は、基準ユニットの設定を中心として決まる。したがって、基準ユニットの設定が把握できてさえいれば、ユニット鍵盤や拡張ユニットの接続関係を眺めるだけで各ユニット鍵盤の設定を認識できる。しかし、被験者から「基準ユニットの場所がわからないため、鍵に割り当てられている音高がわからない」といった指摘を受けた。実装では、基準ユニットの場所や、基準ユニットに割り当てられている音高や音色を視覚的に把握できず、PCに表示されているアプリケーション画面から設定を確認したり、各ユニット鍵盤を実際に打鍵してその出力音から設定を確認する必要があった。

今後は、LED・セグメントLED・ディスプレイを搭載した拡張ユニットを構築し、基準ユニットに目印をつけたり、基準ユニットの設定情報を提示することで、よりスムーズな鍵盤操作をめざしていきたい。

5.2 拡張ユニットに関する評価

拡張ユニットを用いて実装した以下の事例について評価実験を行った。

測距センサ 測距センサによる音高設定の確度を調査した。評価実験は、図 10 のシステムを使用し、3名の被験者に対して、図 10 の左の鍵盤を基準に指示する鍵盤数分だけ手動でユニット鍵盤(図 10 における

右の鍵盤)を配置してもらった。鍵盤 1 個分から 4 個分まで各 5 回、計 20 回の試行を各被験者に対して行い、離してもらう鍵盤数はランダムに指示した。被験者には「感覚を頼りにできるだけ正確に行ってほしい」と指示した。実験は練習なしで開始した。

実験結果は、全被験者に対して全試行において正しくオクターブが割り当てられた。また鍵盤は、図 10 に示す各オクターブ範囲の中心値から $\pm 3\text{cm}$ 以内に配置されていた。

オクターブ設定が不安定になる範囲を計測したところ、各オクターブの境界部分を中心に最大 $\pm 1.5\text{cm}$ の範囲であったため、実際の使用において、ユーザが鍵盤を感覚的に動かしたとしても、誤ってオクターブが設定されることは極めて低いと考えられる。また、被験者自身が設置した鍵盤(たとえ中途半端な距離に設置されていたとしても)で実際に演奏してもらったところ、「特に問題なく演奏できる」というコメント得られた。

以上より、提案システムは、実際の演奏において活用できるといえる。

加速度センサおよび地磁気センサ 加速度センサおよび地磁気センサを用いた音色変更の認識精度を調査した。評価では、4.2 節で述べたシステムを使用し、3名の被験者に対し「4つの演奏姿勢を行ってもらう」とおよび「4つの方位を向いてもらう」という動作をそれぞれ 10 回ずつ行ってもらった。また、演奏姿勢に関しては被験者ごとに特性があるため、実験の前に各被験者の演奏姿勢をシステムに学習させた。被験者には「できるだけ正確に行ってほしい」と指示し、練習なしで実験を開始した。なお、各試行ごとに姿勢や方向を決めてからであれば、打鍵することを許し、被験者は打鍵による出力音から正しく音色が割り当てられているか確認できる。

加速度センサによる平均姿勢認識精度は 95%(標準偏差 5%) となり、地磁気センサによる平均認識精度は 96%(標準偏差 5%) と高い認識精度を示した。誤認識は、実験の初期段階で、姿勢や向きが中途半端な場合に生じていた。また、被験者は、打鍵による出力音から姿勢や向きを補正していた。したがって、数回訓

練すれば、ほとんど誤認識は生じないと考えられる。

以上より、提案システムは、実際の演奏において十分活用できる精度であるといえる。

6 関連研究

ユニットを組み合わせて高機能化を図る試みは多く行われている。例えば、LEGO 型ブロックを組み立てることで、その形状をゲーム内で利用できるシステム[1]や、三角形の板を組み合わせてある形状を作成すると、形状に応じた Web ページを開いたり、物語を展開するシステム[2]が報告されている。他にも、ブロックを組み合わせてプログラミングを行うもの[3]や、入出力デバイスが搭載されたブロックを利用してその3次元形状によりさまざまなインタラクションを行えるもの[4]がある。これらは、いずれも直観的なコンピュータとのインタラクションを目指し、本研究のような音楽利用を目的としたものではない。

一方、音楽利用を目的とした研究に、ブロックに効果音などを割り当て、それをつないで様々な音楽を創り出すシステム[5]や、音の強弱、長短、音色などを調節できるカードを並べ音楽を生成するもの[6]がある。これらは、いずれも音楽生成を目的とし、楽器演奏支援を目的としていない。また、DOEPFER 社の d3 Modular Organ Master Keyboard[7]は、ユニット鍵盤のように鍵盤を組み合わせて鍵盤構成を柔軟に変更することが可能であるが、本研究のような鍵盤特性の異なる鍵盤のダイナミックな入替は想定されていない。

従来の楽器演奏スタイルを守りつつ楽器の小型化を目指した研究として、タッチパネル式の PDA を用いたベース楽器[8]や前述したモバイルクラヴィア II [9]がある。これらは、楽器のサイズを変えずに、さまざまな楽曲を演奏できるかを目指し、適宜組み合わせることで解決する本研究とは異なる。

7 おわりに

本研究では、1 オクターブの鍵盤を組み合わせることでさまざまな鍵盤構造に適応できるユニット鍵盤を

構築した。ユニット鍵盤の接続構造は、リアルタイムに認識され、入出力デバイスをもつ拡張ユニットも利用できるため、直観的な鍵盤操作が行える。

今後の課題としては、ユニット群における直観的な関係性構築方法の提案を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は、中山隼雄科学技術文化財団研究助成の支援によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] D. Anderson, J. Frankel, J. Marks, A. Agarwala, P. Beardsley, J. Hodgins, D. Leigh, K. Ryall, E. Sullivan and J. Yedida: "Tangible Interaction Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling", In Proceedings of ACM International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH2000), pp.393-402, 2000.
- [2] M. Gorbet, M. Orth, and H. Ishii: "Triangles: Tangible Interface for Manipulation and Exploration of Digital Information Topography", In Proceedings of ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI1998), pp.49-56, 1998.
- [3] S. Hideyuki, K. Hiroshi: "Interaction-level support for collaborative learning: AlgoBlock an open programming language", In Proceedings of International Conference on Computer Supported Collaborative Learning (CSCL2002), pp.349-355, 2002.
- [4] 伊藤雄一, 北村喜文, 河合道広, 岸野文郎: "リアルタイム 3 次元形状モデリングとインタラクションのための双方向ユーザインタフェース ActiveCube", 情報処理学会論文誌, vol. 42, no. 6, pp.1338-1347, 2001.
- [5] N. D. Henry, H. Nakano, and J. Gibson: "Block Jam", In Proceedings of ACM International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH 2002), pp.67, 2002.
- [6] The Music Table のホームページ
http://www.mis.atr.jp/%7Emao/ac/about_j.html
- [7] d3 Modular Organ Master Keyboard のホームページ
<http://www5f.biglobe.ne.jp/fukusan/products/doepfer/d3/d3.html>
- [8] 寺田 努, 塚本昌彦, 西尾章治郎: "二つの PDA を用いた携帯型エレキベースの設計と実装," 情報処理学会論文誌, Vol. 44, No. 2, pp. 266-275, 2003.
- [9] 竹川佳成, 寺田 努, 塚本昌彦, 西尾章治郎, "追加黒鍵をもつ小型鍵盤楽器モバイルクラヴィア II の設計と実装," 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 12, pp. 3163-3174, 2005.