

# UnitKeyboard: さまざまな演奏スタイルに適応可能な電子鍵盤楽器

UnitKeyboard: a Musical Keyboard for Various Musical Execution Styles

竹川 佳成 寺田 努 西尾 章治郎\*

**Summary.** 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 intuitive controls using sensors and actuators, we can play music flexibly by using 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。また、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。さらに、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。

以下、2章でユニット鍵盤の概要および要素技術について説明し、3章でユニット鍵盤におけるユニット間の関係性について述べる。4章でプロトタイプシステムについて述べる。5章で関連研究について

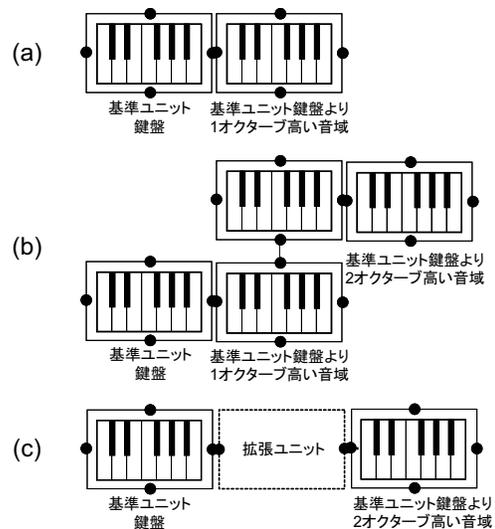


図 1. ユニット鍵盤の構成例

説明し、最後に6章で本研究のまとめを行う。

## 2 ユニット鍵盤

### 2.1 概要

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

Copyright is held by the author(s).

\* Yoshinari Takegawa, Tsutomu Terada and Shojiro Nishio, 大阪大学大学院 情報科学研究科 マルチメディア工学専攻

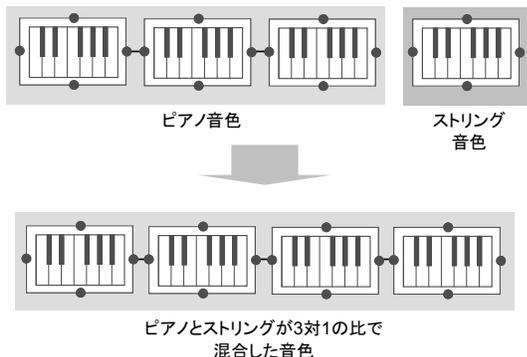


図 2. 音色の混合

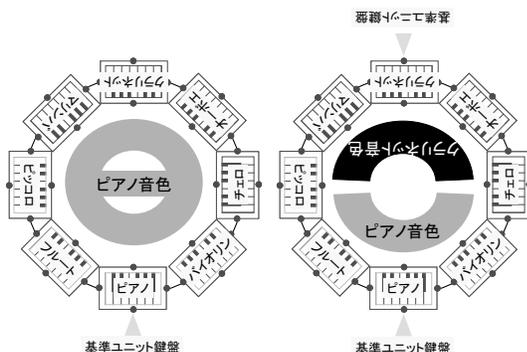


図 3. 環状接続の例

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、次のような利用方法が考えられる。

**最適化** 外出時は、必要な音域の分だけのユニット鍵盤を持ち歩く。

**幼児教育支援** 鍵盤の接続・分離という操作から、音階やオクターブという概念を直観的に理解させる。

**協調演奏** アンサンブルで演奏中、あるパートでユニット鍵盤の音域が足りなくなった場合、同じパートに所属する他の人の鍵盤を接続し、その場をしのご。

**演奏支援** 鍵盤初心者と習熟者が行う合奏演奏において、初心者の演奏が不安定な場合、タイミングやペロシティに関する補正は行わず、初心者の音高の音の出力だけ習熟者のものと差し替えることで、初心者はミスタッチに恐れることなく合奏を楽しめる。

**フュージョン機能** 図2に示すように、ピアノ音色をもつ鍵盤とチェロ音色をもつ鍵盤が結合したとき、その2つの音色が混ざった音色をもつ鍵盤となる。また、音色の混合比は、結合したときの鍵盤の長さに依存する。さらに、ピアノとチェロの音域が異なる場合、どちらかの音域を基準に、連続した音域になるよう設定される。

**環状接続** 図3に示すようなループ状の鍵盤も構築できる。利用例としては図3左に示すように、各ユニット鍵盤に異なる基本音色を割り当てておき、基



図 4. 環状接続したユニット鍵盤の装着

表 1. 関係性の適用される単位

項目	ユニット単位	ユニット群単位
接続位置	○	×
グループ	×	○
ランク	○	○
形状	×	○

準とする鍵盤を変えれば全体の音色が基準鍵盤のものに変わるといった使い方が考えられる。図3右に示すように複数個の基準ユニット鍵盤があれば、音色の領域は等分割される。

**ハイブリッド化** 鍵盤ハーモニカにおいて息の量を計測できる吹口や、アコーディオンの蛇腹を模倣した拡張ユニットを構築することで、88鍵のアコーディオンや2段の鍵盤ハーモニカなど従来の鍵盤楽器の特性や特徴を組み合わせた新たな鍵盤楽器が構築できる。また、ユニット鍵盤は、センサやアクチュエータなど入出力デバイスを搭載でき、例えば、ユーザが図4のように加速度センサ付ユニット鍵盤を装着している場合、腰をふれば各ユニット鍵盤に割り当てられている音色がシャッフルされるといったインタラクションが可能になる。

## 2.2 要素技術

提案するユニット鍵盤および拡張ユニットに必要な要素技術に関して述べる。なお、以後、ユニット鍵盤および拡張ユニットの両方を指す場合「ユニット」と呼ぶ。

**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。鍵盤の構造や鍵盤演奏における関係性に着目することで設定負荷を軽減する。

**リアルタイム性** 鍵盤構造やユニット同士の関係が演奏中や演奏の合間に変化することが考えられるため、リアルタイムでユニット鍵盤の構造認識および関係性の構築が行える必要がある。

**インタラクション性** 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ち、直観的なインタラクションを実現する必要がある。

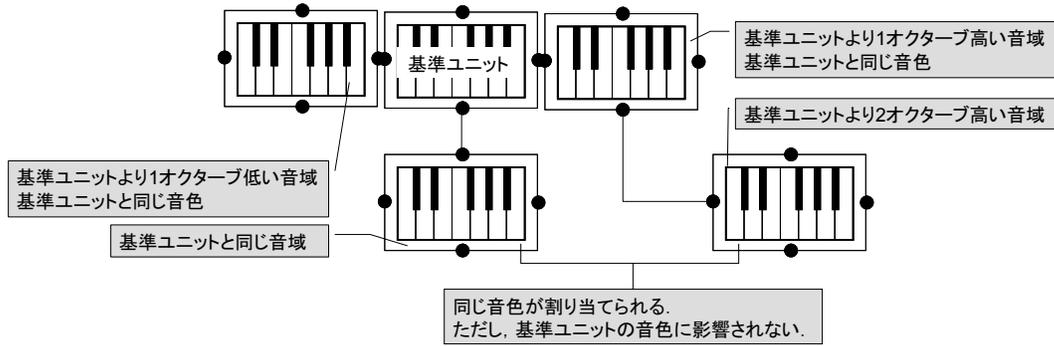


図 5. 接続位置の意味づけ

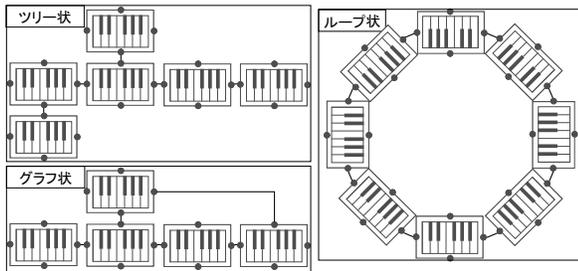


図 6. さまざまな形状

### 3 ユニット鍵盤における関係性

本研究では、複数のユニット鍵盤を同時に用いる場合、ユニットおよびユニット群間に表 1 に示す 4 つの関係性を定義する。なおユニット群とは、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。

**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 5 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、基準ユニットの制約は受けない。

**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。

**ランク** 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鍵盤と呼ぶ。ここでは基準ユニット鍵盤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。また、複数人でアンサンブルを行う場合においても、パートリーダーや指揮者がいるように上下関係が存在する。ユニット鍵盤やユニット群の関係にランクという関係を導入することで、自分より弱いランク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。

**形状** ユニット鍵盤は、これまでの鍵盤のように横長な長方形のような形だけでなく、さまざまな形を実現できる。形状としては、図 6 に示すようループをもたないツリー状や、ループをもつグラフ状、円形に接続された環状などが考えられる。形状ごとに異なる命令を与えたり、上下左右の意味付けを変えたりすることが可能となる。

### 4 プロトタイプシステム

プロトタイプシステムのユニット鍵盤の構成を図 7 に示す。システムは、ホスト、ユニット鍵盤、拡張ユニットからなる。また、実装したプロトタイプシステムを図 8 の右に示す。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社の UM-100 を、ユニット鍵盤はフルサイズ 25 鍵盤をもつ Roland 社の OXYGEN8 を改造して製作した。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。

以下、各構成要素について詳細に説明する。

#### 4.1 ホスト

ホストは、一般的な PC に搭載されているハードウェア以外に、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。プロトタイプではホストコンピュータに PC を用いているがユニット鍵盤の 1 つにホスト機能を兼ねさせることも可能である。ホストの機能は大きく 3 つある。また、図 8 の左に 3 つのユニット鍵盤が横並びに接続された場合におけるホストが管理する情報の詳細を示す。

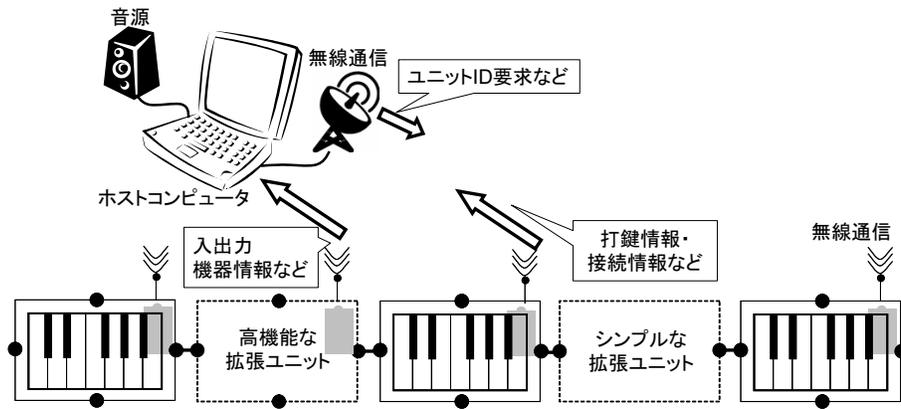


図 7. システム構成

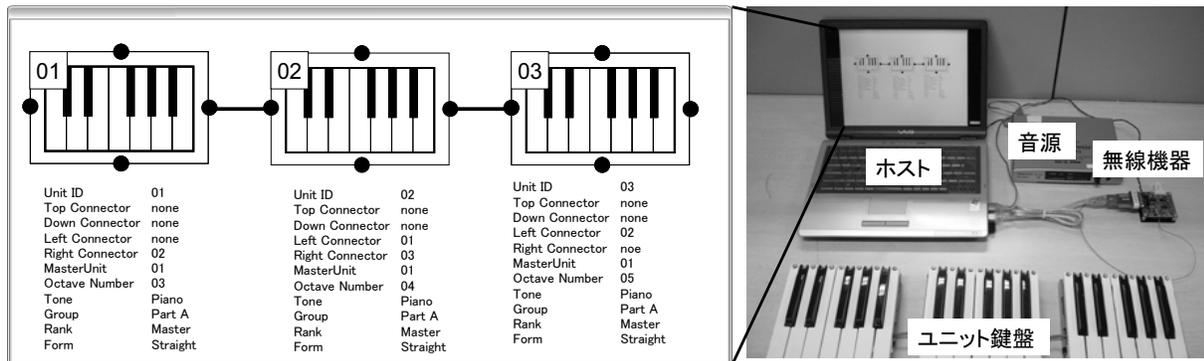


図 8. プロトタイプシステム

表 2. 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
コネクタの場所と接続ユニット ID	配置されているコネクタの場所と個数 接続されている他のユニットの ID
基準ユニット ID	基準ユニット鍵盤の 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
グループ	所属するグループ
ランク	自分のランク
形状	所属するユニット群の形状
搭載入出力機器	搭載する入出力デバイスの種類

表 3. 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
マスターユニット承認	マスターユニット立候補
マスターユニット拒否	打鍵情報通知
	搭載入出力機器情報通知
	入力データ通知

**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 2 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 3 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。接続以外の関係性については、ホスト上のアプリケーションで管理する。

#### 4.2 ユニット鍵盤

ユニット鍵盤のハードウェア構成を図 9 に示す。ユニット鍵盤は、マイコン、1 オクターブの鍵盤、基準ユニット鍵盤になることを要求する基準スイッチ、各側面に接続関係を構築するための接続スイッチおよびコネクタ、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なる。ユニット鍵盤の機能は大きく 3 つある。

**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。

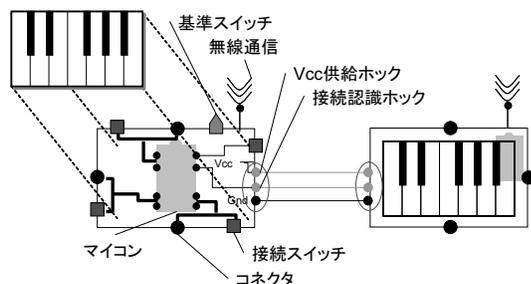


図 9. ユニット鍵盤のハードウェア構成

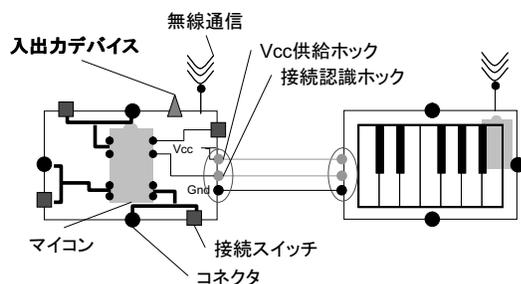


図 10. 拡張ユニットのハードウェア構成

**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** 接続関係を構築する方法は、コネクタを用いて物理的に接続する方法と、接続スイッチを用いて仮想的に接続する方法がある。コネクタを用いる場合、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用ホックの電圧を測定することでユニット鍵盤や拡張ユニットの接続を検出する。一方、接続スイッチを用いる場合、接続関係を築きたい複数のユニットの接続スイッチを同時に押す。物理的な接続は、関連づけが視覚的に確認できるが、ユニットを別々の場所に設置できないといった制約がある。

ユニット鍵盤は、接続関係の変化を検出した場合、ホストに接続情報の更新を通知する。

### 4.3 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、センサやバス、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。

後者の拡張ユニットのハードウェア構成を図10に示す。拡張ユニットのハードウェア構成は、マイコン、接続スイッチ、コネクタ、無線モジュール、入出力デバイスからなり、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。この拡張ユニットは下記の処理を行う。

**ホストコンピュータとの接続の確立** 拡張

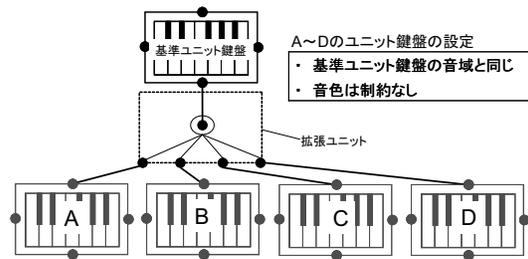


図 11. バスコネクタをもつ拡張ユニット

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コネクションを確立する。

**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。また、拡張ユニットは側面に1つずつコネクタをもつ構成だけでなく、図11に示すような1つの面に複数のコネクタをもつタイプもあり、接続の柔軟性を高められる。

**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。

### 4.4 拡張ユニットの入出力デバイス

現在、試作を進めている様々な入出力デバイスをもつ拡張ユニットの機能について説明する。

**距離センサ** 手のひらや他の物体からの距離を用いることにより、ユーザの操作意図を入力することが可能になる。例えば、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、ユニット鍵盤が離れるほどユニット鍵盤に割り当てられる音域を高くするといったインタラクションが可能になる。

**方位センサ** 方位に合わせて音色を変更するといったインタラクションが可能になる。複数人で演奏している場合、方位によるパート分けなどが可能になる。

**加速度センサ** 拡張ユニットをふるとユニット鍵盤に割り当てられている音色がシャッフルされるといったインタラクションが考えられる。

**LEDおよびディスプレイ** LEDやディスプレイを用いることで、ユニット鍵盤の設定を提示できる。

**モータ** モータの軸の先にプロペラやタイヤなどを装着でき、モータを用いてユニット鍵盤を自律移動させることも可能である。例えば、タイヤ付モータをもつ拡張ユニットが付属したユニット鍵盤があれば、足りない人の鍵盤まで自律移動および接続する。

**振動素子** LEDと同様、ユニット鍵盤の設定の提示に応用できる。これは、ユーザが演奏中など視覚的に余裕がない場合有効である。

## 4.5 使用感

上述したプロトタイプ機能は、現在、ホスト機能および基本的なユニット鍵盤の機能のみである。すべての機能の実装および詳細なユーザビリティ評価は今後の課題であるが、筆者自身がユニット鍵盤を使ったときの使用感について下記に述べる。

**無線化と有線化** プロトタイプでは、ホストとユニット鍵盤間の通信を有線および無線で行う場合の2通りで実装した。無線方式で実現した場合、若干のディレイはあるが、楽器としてのレイテンシや精度はクリアしていると考えられる。しかし、ユニット鍵盤数が増えた場合に、パケット衝突によるパケットロスやディレイが生じると考えられる。無線通信の性能評価は今後の課題である。

一方、有線ネットワークを構築した場合、無線方式と比べて高速な通信が可能となるが、動かせる範囲がケーブル長により制限されるため、柔軟な構成が実現しづらい。

両方式ともに利点・欠点があるため、より詳細な評価を行い、各方式を生かせる状況を整理し、選択的に利用していきたいと考えている。

**1オクターブのユニット鍵盤** 本研究では、鍵盤のユニット化を図るにあたり、Cからはじまる1オクターブを1単位とした。これは、ハ長調やハ短調などCを主音としてもつ調性においては都合が良いが、その他の調においては有効にいかせない場合がある。調に対するミスマッチをカバーする解法の1つにモバイルクラヴィーア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ズを実現した鍵盤楽器)[8]の機構を応用することが考えられる。

## 5 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。

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[7]やすべての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ズを実現した鍵盤楽器[8]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。

## 6 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や、ユニット鍵盤のハードウェア特性の評価実験および試用評価実験を行う予定である。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省21世紀COEプログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」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, J. Yedida: "Tangible Interaction Graphical Interpretation: A New Approach to 3D Modeling", In Proceedings of ACM SIGGRAPH 2000, 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 CHI'98, pp.49-56, 1998.
- [3] S. Hideyuki, K. Hiroshi: "Interaction-level support for collaborative learning: AlgoBlock an open programming language", In Proceedings of CSCW2002, 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 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](http://www.mis.atr.jp/%7Emao/ac/about_j.html)
- [7] 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.
- [8] 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ーアIIの設計と実装," 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 12, pp. 3163-3174, 2005.