

笙の物理モデルにおける制御パラメータの影響の検討

引地 孝文^{†‡} 小坂 直敏[†] 板倉 文忠[‡]

[†]NTT コミュニケーション科学基礎研究所
〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1
046-240-3514 hikichi@brl.ntt.co.jp

[‡]名古屋大学 統合音響情報研究拠点 (CIAIR)
〒464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町

本稿では、笙の物理モデルの音合成システムへの適用を念頭に、時間変化を伴う制御パラメータを与えた時の合成波形の特徴量の変化について述べる。笙の物理モデルに時変パラメータを入力し、立ち上がり時間、発音周波数、スペクトルの変化等について検討した。その結果、立ち上がり時間は吹鳴圧力の時間変動に依存し、吹鳴圧力と発振波形の振幅の間にはヒステリシスが存在することが明らかになった。また、本方式により材質のパラメータを操作することで、ビブラートなど、周波数が時間と共に変化する音の合成が可能であることが示された。

Influence of Input Parameters on Synthesized Sounds of the Physical Model of the Sho

Takafumi Hikichi^{†‡} Naotoshi Osaka[†] Fumitada Itakura[‡]

[†]NTT Communication Science Laboratories
3-1, Morinosato Wakamiya, Atsugi, Kanagawa 243-0198 Japan
046-240-3514 hikichi@brl.ntt.co.jp

[‡]Nagoya University, Center for Integrated Acoustic Information Research(CIAIR)
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, Aichi 464-8603 Japan

This paper describes the variation of the attributes of synthesized sounds when time variant control parameters are given to the physical model of the sho, with intention of applying the model to sound synthesis system. Based on the proposed model, the variation in the rise time, sounding frequency, and spectra are investigated using time variant input. As a result, the rise time depends on variation in blowing pressure, and hysteresis is found between the blowing pressure and the oscillation amplitude. It is shown that the proposed method can synthesize sounds with time variant frequency components, such as vibrato, by controlling material parameters.

1 はじめに

物理モデルに基づく音合成手法は、楽音を合成する上で有望である。適切に構築されたモデルに適切な制御パラメータが与えられれば、実際の楽器音と同様の特徴を有する合成音が生成できると考えられる。これまで我々は、笙の発音機構に基づく物理モデルを提案し、楽器を用いた計測実験を通じてモデルの妥当性を検証してきた [1]。ここでは、竹管の共鳴周波数と

発音周波数(音の基本周波数)の関係、管の共鳴周波数と吹鳴圧力の閾値の関係等、静特性について類似した結果が得られている。

本報告では、提案モデルに基づく音合成アルゴリズムを利用した仮想楽器システムの実現を念頭に、その動特性を検討する。時間変化を伴う制御パラメータが入力された場合の立ち上がり時間、振幅包絡、発音周波数、スペクトルの変化等を検討した結果について述べる。

楽器の制御パラメータに関する歴史的な研究例として、擦弦楽器における、安定した発振が得られるためのボーイングのパラメータ範囲の研究が挙げられる [2]. これを踏まえ、仮想擦弦楽器についても「演奏しやすさ (playability)」に与えるアタックパラメータの影響が検討されている. ここでは、短時間で Helmholtz 波形、すなわち安定した発振状態が生じるためのボーイングのパラメータ範囲を求め、これを用いることにより、仮想楽器の演奏しやすさの向上が可能であると述べている [3]. 本モデルにおいても、安定な発振が早く得られる制御パラメータを知ることは重要である.

また、物理モデルによる音合成方式の利点として、モデルパラメータが改変自由である点が挙げられる. すなわち、仮想楽器においては管の長さやリードの固有周波数等も制御パラメータとして利用できる. この点を利用し、他の楽器に見られる代表的奏法を付与する合成ができれば、笙の新しい奏法や装飾音を拡張するという意味で、音楽創作における表現力の向上が期待される. このようなサウンドハイブリッド (混成音) を実現する技術は、新たな音楽表現を作曲家に提供できる. ここで奏法とは、ビブラート、ポルタメント、フラッター等を指す. 幾つかの奏法はピッチの微細変化を伴うが、笙の通常の奏法では、ピッチの意図的な制御は、発音させる管の選択以外不可能である. 本稿では、ピッチを変化させるパラメータを適切に操作することにより、ビブラート、及びポルタメント等の奏法が実現できることを示す.

2 笙の物理モデル

本章では笙の物理モデルについて説明する (用いたパラメータ値等、詳細は文献 [1] 参照). 図 1 に笙の構造と簡略化されたモデルを示す. 演奏者は左側の吹口より息を吹き込み、^{かしら} 匏と呼ばれる空胴内部の空気圧 (以降吹鳴圧とも呼ぶ) を制御していると考えられる. ここでは 1 本の管のみを考慮して定式化するが、多数の管がある場合には、それぞれの管について後に述べる方法で管内圧力を計算すれば良く、容易に拡張が可能である. なお、リード振動及びリードを流れる空気流のモデル化については [4] を参考にした.

2.1 リード振動のモデル化

リードの上流側圧力 (すなわち、匏内圧力) $p(t)$ 、下流側圧力 (管内圧力) $p_2(t)$ 、及び、リードの固定端からの距離 s の位置における変位を $\xi(s, t)$ とすると、リードの運動方程式は次式で表わされる.

$$\rho W h \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} + R \frac{\partial \xi}{\partial t} + K \frac{\partial^4 \xi}{\partial s^4} = W(p(t) - p_2(t)) \quad (1)$$

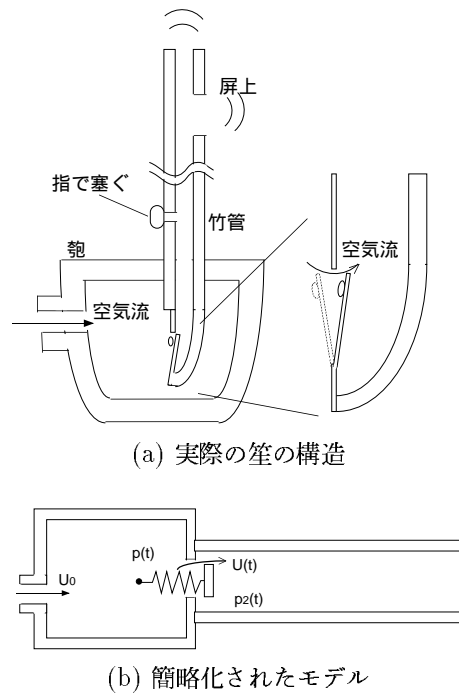


図 1: 実際の笙の構造と簡略化された物理モデル

ここで、 ρ はリードの密度、 W は幅、 h は厚さ、 K は曲げ剛性係数であり、 R は減衰係数である. リードは基本モードで振動すると仮定すると、リード先端部の変位を x とし、リードの運動方程式は次のように書ける.

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2k \frac{dx}{dt} + \omega_r^2 x = \frac{1.5WL}{m}(p(t) - p_2(t)). \quad (2)$$

ここで、 k はリードの減衰係数、 L は長さ、 m は質量である.

2.2 リードを流れる空気流

匏内圧力 $p(t)$ 、管内圧力 $p_2(t)$ 、及び、リード振動により生じる間隙を流れる体積速度 $U(t)$ の関係は、Bernoulli の法則より以下の様に表される.

$$p(t) = p_2(t) + \frac{\rho}{2} \left[\frac{U(t)}{CF(x)} \right]^2 + \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\rho U(t) \delta}{CF(x)} \right], \quad (3)$$

ここで、 C はくびれの係数 (flow contraction coefficient) であり、形状の違いによる影響を表す係数である. また、リード振動により生じる隙間面積 $F(x)$ は次式で表される (図 2 参照).

$$F(x) = W[x^2 + b^2]^{\frac{1}{2}} + 2L[a(x)^2 + b^2]^{\frac{1}{2}}$$

ここで $a(x)$ はリード側面の平均変位であり、片持ち梁の基本振動モード形状より、

$$a(x) \approx 0.4x$$

と求められる。

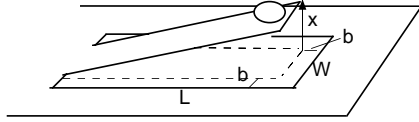


図 2: 笙のリード

2.3 管の反射関数

管の音響特性は入力インピーダンス $Z_{in}(f)$ により特徴づけられる。入力インピーダンスとは、管端における音圧と体積速度の比であり、周波数 f の関数として記述される。入力インピーダンス $Z_{in}(f)$ と管の特性インピーダンス Z_0 とを用いて、反射係数 $R(f)$ は以下の式で定義される。

$$R(f) = \frac{Z_{in}(f) - Z_0}{Z_{in}(f) + Z_0}.$$

反射関数 $r(t)$ は、反射係数 $R(f)$ の逆フーリエ変換により定義される。反射関数は、時刻 $t = 0$ でインパルス音圧を入力した際に、管端に反射し返ってくる圧力波形を表している。

この反射関数を用いると、管内圧力 $p_2(t)$ は次式より求められる。

$$\begin{aligned} p_2(t) &= Z_0 U_{in}(t) \\ &+ r(t) * (p_2(t) + Z_0 U_{in}(t)). \quad (4) \\ U_{in}(t) &= U(t) + 0.4WL \frac{dx}{dt} \end{aligned}$$

ここで $U_{in}(t)$ は管に入力される正味の体積速度であり、 $*$ は畳み込みを表す。通常、開放端においてエネルギーの一部が放射されるため、反射関数はインパルスとはならず広がりを持つ波形となる。ここでは従来用いられているモデルとしてガウス型関数を用いた [5]。

(2)~(4) 式をサンプリング周波数 48kHz で離散化して差分方程式を求め、入力として管内圧力 p を与え、リード変位 x 、管内圧力 p_2 、及び体積速度 U 、 U_{in} の各変数を計算する。

なお、本稿では、放射の過程のモデル化は行っていないが、放射音を求める際には、体積速度がそのまま管の開放端へ達して放射音源となると仮定し、体積速度を高域通過フィルタに通したものを合成音として扱う。以降で吹鳴圧力との対応関係を検討する際には、フィルタリングによる遅延の影響を避けるため、体積速度波形をそのまま用いる。

3 制御パラメータの影響の検討

3.1 吹鳴圧力の影響

前章で述べたモデルを用いて、制御パラメータとして吹鳴圧力を様々に変化させ、合成音波形への影響を検討する。ここでは、得られた体積速度波形 $U_{in}(n)$ の次の特徴量に着目する。

- 立ち上がり時間
- 時間包絡
- ピッチ (基本周波数)
- スペクトル

3.1.1 立ち上がり部の過渡時間の影響

立ち上がり部分について、直線的に増加する吹鳴圧圧を用い、その増加率、すなわち過渡部分の時間長を変化させ、体積速度波形が発振し始める振る舞いの違いを比較する。過渡部の時間長として 1000ms から 20ms までの値を用い、0.8kPa に達するまで直線的に増加させた。結果を図 3 に示す。図 3(a) は時間軸を揃えた図であり、図 3(b) は過渡時間長を揃えた拡大図である。図 3 より、発振を始める吹鳴圧力はその過渡時間長により異なり、過渡時間長が短い場合には、体積速度波形の立ち上がりに要する時間 (以後、RT と示す) は相対的に増加することが分かる。ここで体積速度波形の立ち上がり時間 RT とは、定常状態における振幅の 50% に達するまでの時間と定義した。さらに、吹鳴圧力の過渡時間の範囲をさらに広げ、立ち上がり時間 RT を求めた結果を表 1 に示す。表 1 より、過渡時間が短い程発振に要する時間は短くて済み、数 ms 程度で発振することが分かる。

表 1: 吹鳴圧力の過渡時間と体積速度波形の立ち上がり時間 RT の関係

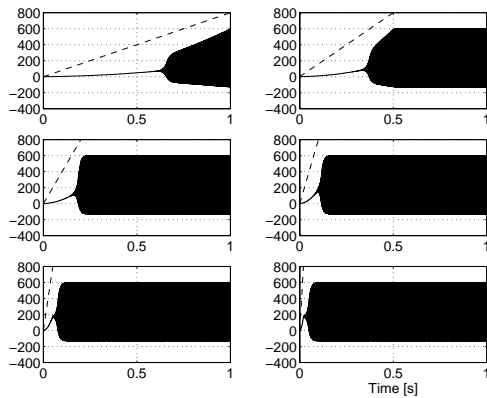
過渡時間 [ms]	1000	500	200	100	50	20
波形の RT [ms]	703	383	186	114	75	46
過渡時間 [ms]	10	4	3	2	1	0
波形の RT [ms]	36	30	15	24	5	3

3.1.2 時間変化の影響

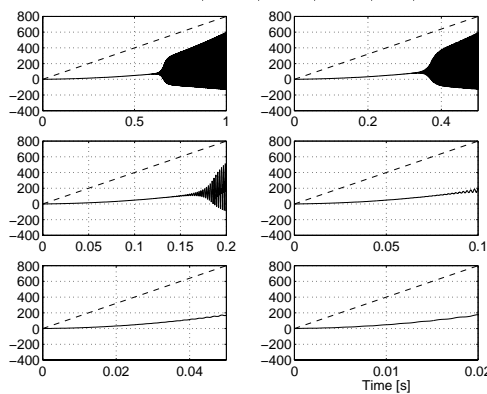
次に、数種類の時間変化を伴う吹鳴圧力を与え、この時間包絡が体積速度波形の振幅包絡に及ぼす影響を検討する。

パターン 1

図 4 に入力した吹鳴圧力、その結果得られた体積速度波形、及びその基本周波数を示す。図 4 より、約



(a) 吹鳴圧力の過渡時間の違い (左上から右下にかけて、それぞれ、1000, 500, 200, 100, 50, 20 ms).



(b) (a) を吹鳴圧力の過渡時間で正規化して示したものの。同じ圧力下で発振状態の違いが見られる。

図 3: 吹鳴圧力の過渡時間による体積速度波形の立ち上がり時間 RT の違い。なお、破線は吹鳴圧力を表す。

0.5kPa で発振し始め、発振した後の吹鳴圧変化と振幅包絡、及び基本周波数の微小変化はほぼ比例する結果が得られた。

パターン 2

図 5 に入力した吹鳴圧力、その結果得られた体積速度波形、およびその基本周波数を示す。この場合、圧力を上昇中に発振し始めた時の圧力は 0.5 kPa 程度だったが、低下させた場合にはその圧力においても発振が続いている。図の体積速度波形の包絡は左右非対称となっており、これはヒステリシスの存在を示している。

パターン 3

図 6 に入力した吹鳴圧力、その結果得られた体積速度波形、およびその基本周波数を示す。まず、最初に 0.3 kPa に達した時点では発振しなかった。そして、一度 0.6 kPa へ達した後に再び 0.3 kPa へ低下した時点では発振が持続している。そのためその後の

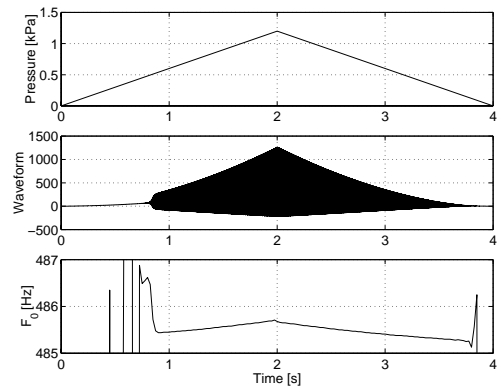


図 4: 上から、吹鳴圧力、体積速度波形、基本周波数 (パターン 1)

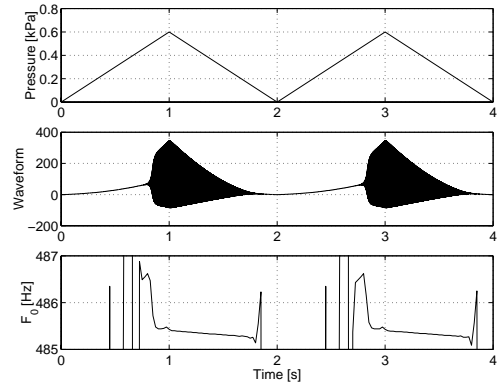


図 5: 上から、吹鳴圧力、体積速度波形、基本周波数 (パターン 2)

振幅の増加は、同じ吹鳴圧の増加率にも関わらず冒頭部分とは異なり、吹鳴圧の変化に比例している様子が観察された。

3.2 考察

上記の検討より得られた知見をまとめる。

- 発振し始める圧力は、時間に対する増加率に依存し、増加率が大きい場合に過渡部分の時間に対して発振が遅れる傾向がある。
- 一旦発振した後は圧力と振幅はおおよそ比例する。

笙の演奏法について考えると、笙の伝統的な奏法ではクレッシェンド、デクレッシェンドがしばしば行われるが、実際の演奏時には、吹鳴圧力は必ずしも直線的に変化していないことが予想される。

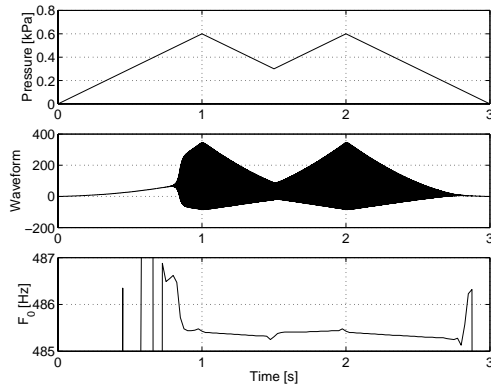


図 6: 上から、吹鳴圧力、体積速度波形、基本周波数 (パターン 3)

このモデルの演奏法に関するノウハウとして、発振に足る一定値以上の圧力をすばやく加え、発振させれば (数 ms 程度で発振し始める)、一度発振を生じた後は、直線的に変化させることでクレッシェンドの効果が得られることが分かった。

3.3 吹鳴圧の違いによるスペクトルの違い

図 7 に、図 4 の波形の時刻 1 秒及び 1.9 秒における (すなわち、圧力が異なる時刻における) 体積速度波形のスペクトルを示す。これらを比較すると、高い圧力で吹鳴した方がより高域まで高調波成分を有することがわかる。なお、実際の楽器の収録音の分析結果より、収録音についても同様の傾向が見られることを確認している [6]。

3.4 リードの固有周波数の影響

物理モデルによる音合成の利点として、改変自由であることがある。すなわち、管の長さやリードの固有周波数も制御パラメータとして利用できる。この利点を生かし、笙の奏法として実現が困難と考えられる、ピッチ変化を伴う代表的奏法 (ビブラート、ポルタメント等) の合成を試みることを考えている。そこで予備検討として、リードの固有周波数を時間と共に変化させ、得られる波形の包絡及び基本周波数を調べた。

これまで、リードの固有周波数 f_r と管の共鳴周波数 f_p (すなわち管の長さ) の関係を変化させてシミュレーションを行い、得られる波形の基本周波数が変化することが分かっている。このうち、 f_p は (4) 式の反射関数 $r(t)$ のピーク位置を決定している。これを時間とともに変化させると、計算上不連続が生じたり、発散する可能性がある。そのため、ここでは f_p は固

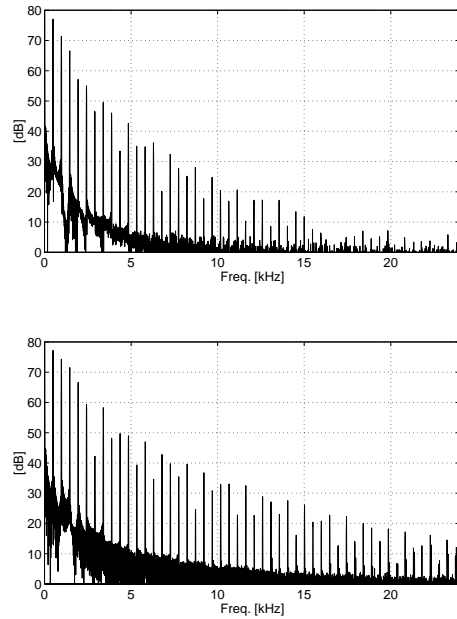


図 7: 圧力の違いによる体積速度波形のスペクトルの違い。上:1 秒 (圧力は 0.6kPa) 下:1.9 秒 (圧力 1.14kPa)

定とし f_r の影響を検討した。

3.4.1 典型的奏法の試み

リードの固有周波数 f_r を次式により変化させ、ビブラート及びポルタメントの合成を試みた。

ビブラート:

$$f_r(t) = 470(1 + 0.02 \sin(2\pi f_v t)), f_v = 5\text{Hz}$$

ポルタメント:

$$f_r(t) = 470\{1 + 0.01(1 - \cos(2\pi f_v t))\}, f_v = 0.5\text{Hz}$$

結果を図 8,9 に示す。得られた合成音は、図に示す基本周波数の変化を示した。これは実際の楽器では得られない効果である。図 8 について、リード固有周波数の変化に対して、基本周波数は正方向に 3Hz、負方向に 10Hz 変化し、低周波側により大きく変動する結果が得られた。また、ポルタメントについて図 9 に示すように、滑らかな周波数変化を持つ音が得られた。すなわち、リード固有周波数の適切な操作により、周波数変化を持つ奏法合成の可能性が示された。

4 おわりに

本報告では、笙の物理モデルに基づく仮想楽器システムの実現を念頭に、制御パラメータを変化させた時の合成波形の特徴量の変化を検討した。特に、発振し始める際の吹鳴圧変化の影響、吹鳴圧とスペクトルの関係等を示した。また、実際の楽器では操作できな

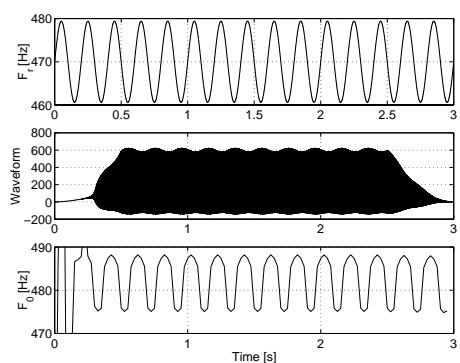


図8: ビブラート音の合成例 (上から, リード周波数, 体積速度波形, 基本周波数)

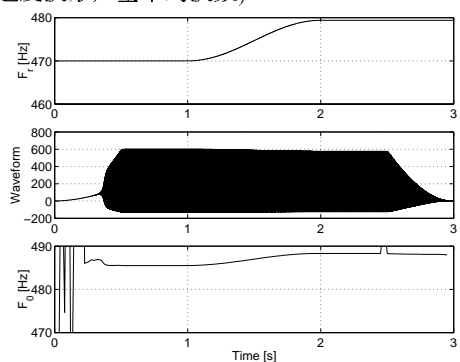


図9: ポルタメントの合成例 (上から, リード周波数, 体積速度波形, 基本周波数)

い物理定数を操作し, 他の多くの楽器に見られるピッチ変化を伴う一般的な奏法の実現を試み, ピッチ変化を持つ音を合成できることが示された。

今後の課題の一つとして, 楽器システムの実装がある。これまで初期的に, 図10に示すGUIを持つシステムを実装している。合成エンジンはC言語を利用し, GUIはTcl/Tkを利用しLinux PC上に実装した。図10は笙を上から見た管の配列を表しており, ユーザは管をクリックして音を合成しながら, 各管のピッチや和音を確かめることができる。また, このGUIは発音する管の選択の他, 吹鳴圧に関するパラメータの設定や, 管の長さの調節が可能である。すなわち, 管の長さ等を変更した結果どのような変化が生じるか, インタラクティブに体験できる。創作支援ツール, 初学者の学習ツールとしての利用を想定し, 今後演算時間の削減やインタフェースの検討を行う予定である。

その他の課題として以下が挙げられる。

- 自然なビブラート等の合成のための, 周波数や振幅ゆらぎ及び時間変化の指定方法の実装
- f_r を操作する際の適切なパラメータ値の設定,

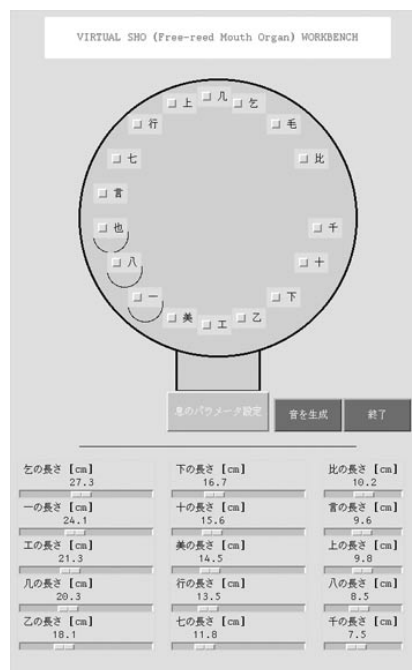


図10: 楽器システムのGUIの例

複数の管に対する適切なパラメータ値の設定

- 音楽におけるパラメータ (ピッチ, 音価, 装飾記号等) とモデルパラメータとのマッピング

謝辞

本研究の一部は文部省科学研究費補助金 COE 形成基礎研究費 (課題番号 11CE2005) の援助を受けて行なわれた。名古屋大学において御議論頂く CIAIR メンバ各位に感謝する。

参考文献

- [1] 引地孝文, 小坂直敏, 板倉文忠, “笙の物理モデリング,” 音楽音響研究会資料 MA-66, 35-42 (2001).
- [2] J. C. Schelleng, “The bowed string and the player,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **53**, 26-41 (1973).
- [3] S. Serafin and J. O. Smith III, “Influence of attack parameters on the playability of a virtual bowed string instrument,” *Proc. of ICMC*, 473-476 (2000).
- [4] A. Z. Tarnopolsky, N. H. Fletcher, and J. C. S. Lai, “Oscillating reed valves –An experimental study,” *J. Acoust. Soc. Am.*, **108**(1), 400-406 (2000).
- [5] R. T. Schumacher, “Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet,” *Acustica*, **48**(2), 71-85 (1981).
- [6] T. Hikichi and N. Osaka, “Time-domain simulation of sound production of the sho, the Japanese free-reed mouth organ,” *Proc. of ISMA* (2001).