(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3596015号
(P3596015)
(45)発行日　平成16年12月2日(2004.12.2)　(24)登録日　平成16年9月17日(2004.9.17)

(51)Int.Cl.[7]　F I
G10F　1/02　G10F　1/02　B

請求項の数 6　(全 23 頁)

(21)出願番号　特願平5-344241
(22)出願日　平成5年12月17日(1993.12.17)
(65)公開番号　特開平7-175472
(43)公開日　平成7年7月14日(1995.7.14)
審査請求日　平成11年10月27日(1999.10.27)

(73)特許権者　000004075
ヤマハ株式会社
静岡県浜松市中沢町10番1号
(74)代理人　100098084
弁理士　川▲崎▼　研二
(74)代理人　100096884
弁理士　末成　幹生
(72)発明者　藤原　祐二
静岡県浜松市中沢町10番1号　ヤマハ株式会社内
(72)発明者　川端　太郎
静岡県浜松市中沢町10番1号　ヤマハ株式会社内

最終頁に続く

(54)【発明の名称】自動ピアノ

(57)【特許請求の範囲】
【請求項1】
鍵の押下によってハンマーを回動させ、当該ハンマーによる弦への打撃によって発音を行う自動ピアノであって、
ハンマーが打弦するタイミングとしての発音時刻を示す発音時刻情報およびハンマーが打弦する際の強さとしての発音強度を示す発音強度情報を供給する供給手段と、
鍵のレスト位置からエンド位置までの範囲内で予め設定された所定点であって、鍵の速度とハンマーの打弦による発音強度とが特定の対応関係を示す所定点での鍵の運動属性を、前記発音強度情報で示される発音強度および前記発音時刻情報で示される発音時刻から前記対応関係を用いて求める運動属性算出手段と、
前記鍵を駆動する駆動手段と、
前記鍵が、前記所定点において求められた運動属性となるように、前記駆動手段による鍵の駆動を制御する制御手段と
を具備することを特徴とする自動ピアノ。
【請求項2】
鍵の押下によってハンマーを回動させ、当該ハンマーによる弦への打撃によって発音を行う自動ピアノであって、
ハンマーが打弦するタイミングとしての発音時刻を示す発音時刻情報およびハンマーが打弦する際の強さとしての発音強度を示す発音強度情報を供給する供給手段と、
鍵のレスト位置からエンド位置までの範囲内で予め設定された所定点であって、速度とハ

ンマの打弦による発音強度とが特定の対応関係を示す所定点での鍵の通過速度を、前記対応関係を用いて前記発音強度情報で示される発音強度から求めるとともに、前記所定点における鍵の通過時刻を、求めた通過速度および前記発音時刻情報で示される発音時刻から求める運動属性算出手段と、
前記運動属性算出手段が求めた通過速度および通過時刻を満たす鍵軌道を、時間に対する鍵位置の関係として算出するとともに、当該鍵軌道における押鍵開始時刻を算出する軌道算出手段と、
前記鍵を駆動する駆動手段と、
前記鍵が、求められた押鍵開始時刻から押鍵開始するとともに、求められた通過時刻に前記所定点に達し、かつ、前記所定点に達したときに求められた通過速度となるように、前記駆動手段による鍵の駆動を制御する制御手段と
を具備することを特徴とする自動ピアノ。
【請求項３】
鍵の押下によって打弦して発音を行う一方、離鍵に伴ってダンパーが弦を抑止させて消音を行う自動ピアノであって、
離鍵時刻を示す離鍵時刻情報および離鍵速度を示す離鍵速度情報を供給する供給手段と、
鍵のエンド位置からレスト位置までの範囲内で予め設定され、ダンパーによる弦の抑止開始地点に対応する所定点を鍵が、前記離鍵時刻情報で示される離鍵時刻にて前記離鍵速度情報で示される離鍵速度で通過する鍵軌道を、時間に対する鍵位置の関係として算出するとともに、当該鍵軌道における離鍵開始時刻を求める軌道算出手段と、
前記鍵を駆動する駆動手段と、
前記鍵が、求められた離鍵開始時刻から離鍵開始するとともに、前記所定点において前記離鍵時刻情報で示される離鍵時刻にて前記離鍵速度情報で示される離鍵速度となるように、前記駆動手段による鍵の駆動を制御する制御手段と
を具備することを特徴とする自動ピアノ。
【請求項４】
前記軌道算出手段は、予め設定された加速度、前記運動属性算出手段が求めた通過時刻および通過速度を満たす鍵の放物線軌道を算出する
ことを特徴とする請求項２または３記載の自動ピアノ。
【請求項５】
前記軌道算出手段は、放物線軌道の算出に際し、鍵の初速度に予め設定された値を用いることを特徴とする請求項４記載の自動ピアノ。
【請求項６】
前記発音強度情報と基準値とを比較して弱音を抽出する弱音抽出手段を具備するとともに、
前記軌道算出手段は、抽出した弱音については予め設定された加速度、前記運動属性算出手段が求めた通過時刻および通過速度を満たす鍵の放物線軌道を算出し、弱音以外については前記運動属性算出手段が求めた通過時刻および通過速度を満たす鍵の直線軌道を算出する
ことを特徴とする請求項２記載の自動ピアノ。
【発明の詳細な説明】
【０００１】
【産業上の利用分野】
この発明は、例えば、自動的に鍵盤を駆動して演奏を行う自動ピアノに関する。
【０００２】
【従来の技術】
自動ピアノにおいては、ソレノイドを励磁して鍵を駆動すると、これに応じてハンマが回転して打弦がおこなわれる。そして、ハンマによる打弦の強弱は、鍵の駆動速度に対応し、鍵の駆動速度はソレノイドへの供給電流に対応する。したがって、ソレノイドへの給電量を制御することにより、打弦の強弱、すなわち、発生楽音の大きさを制御することがで

きる。
【０００３】
ところで、自動ピアノにおいては、演奏情報を記録する際に、打弦直前のハンマの速度を検出し、これを打弦強度を示すデータ（以下、打弦強度データという）として記録するとともに、ハンマが打弦位置を通過する時刻を打弦時刻データとして記録する。なお、打弦時刻データは、一般的に一つ前の音との間隔を示す時間データ（相対時間データ）として記録されるが、演奏開始時からの絶対時刻が記録されることもある。
そして、記録した演奏情報を再生する際には、演奏情報中の打弦強度データに応じた電流をソレノイドに供給する。また、ソレノイドへの給電量制御は、一般にはパルス幅変調（ＰＷＭ）によって行われる。
【０００４】
この場合、鍵を駆動し始めてからハンマが実際に打弦するまでの時間差を見込んで、打弦時刻データが示す打弦タイミングより少し前にソレノイドへの給電を行う。また、強音と弱音では、押鍵開始から打弦までの時間が異なるので、打弦強度データに応じて、ソレノイドへの給電タイミングを調整するようにした自動ピアノも開発されている。
【０００５】
なお、演奏データ記録時において、押鍵速度からハンマ速度を推定するタイプのものもあるが（特開平１－２３９５９４号）、この場合には、推定したハンマ速度を打弦強度データとして記録する。
【０００６】
【発明が解決しようとする課題】
ところで、上述した従来の自動ピアノは、打弦時刻データに対応させたタイミングで、打弦強度データに応じた電流をソレノイドに供給するというオープンループの制御を行っており、言い換えれば、押鍵開始時において打弦強度データに応じた力で鍵を押し下げるという単純なものであった。
しかしながら、鍵の軌道（この場合の軌道は、時間経過に対する位置変化をいう）を考慮すると、押鍵開始時の押下力だけを制御しても、演奏時における鍵軌道を再生したことにはならず、このため、記録時の打弦速度を正確に再現することができなかった。
【０００７】
また、演奏家による演奏は、単に押鍵時開始時の押下力だけをコントロールしているのではなく、楽曲の微妙なニュアンスを表現すべく、押鍵開始から離鍵に至るまで、楽音の表情に応じた操作を行う。したがって、単に、押鍵開始時の押下力を制御しただけでは、楽音の表情を正確に再現することはできず、機械的な味気ない演奏となってしまう。
【０００８】
この発明は、上述した事情に鑑みてなされたもので、打弦速度を正確に再現することができる自動ピアノを提供することを第１の目的としている。また、この発明の他の目的は、演奏の微妙なニュアンスをも表現することができる自動ピアノを提供することにある。
【０００９】
【課題を解決するための手段】
上述した課題を解決するために、請求項１に記載の発明においては、鍵の押下によってハンマーを回動させ、当該ハンマーによる弦への打撃によって発音を行う自動ピアノであって、ハンマーが打弦するタイミングとしての発音時刻を示す発音時刻情報およびハンマーが打弦する際の強さとしての発音強度を示す発音強度情報を供給する供給手段と、鍵のレスト位置からエンド位置までの範囲内で予め設定された所定点であって、鍵の速度とハンマーの打弦による発音強度とが特定の対応関係を示す所定点での鍵の運動属性を、前記発音強度情報で示される発音強度および前記発音時刻情報で示される発音時刻から前記対応関係を用いて求める運動属性算出手段と、前記鍵を駆動する駆動手段と、前記鍵が、前記所定点において求められた運動属性となるように、前記駆動手段による鍵の駆動を制御する制御手段とを具備することを特徴とする。
【００１０】

また、請求項２に記載の発明においては、鍵の押下によってハンマーを回動させ、当該ハンマーによる弦への打撃によって発音を行う自動ピアノであって、ハンマーが打弦するタイミングとしての発音時刻を示す発音時刻情報およびハンマーが打弦する際の強さとしての発音強度を示す発音強度情報を供給する供給手段と、鍵のレスト位置からエンド位置までの範囲内で予め設定された所定点であって、速度とハンマの打弦による発音強度とが特定の対応関係を示す所定点での鍵の通過速度を、前記対応関係を用いて前記発音強度情報で示される発音強度から求めるとともに、前記所定点における鍵の通過時刻を、求めた通過速度および前記発音時刻情報で示される発音時刻から求める運動属性算出手段と、前記運動属性算出手段が求めた通過速度および通過時刻を満たす鍵軌道を、時間に対する鍵位置の関係として算出するとともに、当該鍵軌道における押鍵開始時刻を算出する軌道算出手段と、前記鍵を駆動する駆動手段と、前記鍵が、求められた押鍵開始時刻から押鍵開始するとともに、求められた通過時刻に前記所定点に達し、かつ、前記所定点に達したときに求められた通過速度となるように、前記駆動手段による鍵の駆動を制御する制御手段とを具備することを特徴とする。

【００１１】

請求項３に記載の発明においては、鍵の押下によって打弦して発音を行う一方、離鍵に伴ってダンパーが弦を抑止させて消音を行う自動ピアノであって、離鍵時刻を示す離鍵時刻情報および離鍵速度を示す離鍵速度情報を供給する供給手段と、鍵のエンド位置からレスト位置までの範囲内で予め設定され、ダンパーによる弦の抑止開始地点に対応する所定点を鍵が、前記離鍵時刻情報で示される離鍵時刻にて前記離鍵速度情報で示される離鍵速度で通過する鍵軌道を、時間に対する鍵位置の関係として算出するとともに、当該鍵軌道における離鍵開始時刻を求める軌道算出手段と、前記鍵を駆動する駆動手段と、前記鍵が、求められた離鍵開始時刻から離鍵開始するとともに、前記所定点において前記離鍵時刻情報で示される離鍵時刻にて前記離鍵速度情報で示される離鍵速度となるように、前記駆動手段による鍵の駆動を制御する制御手段とを具備することを特徴とする。

【００１４】

請求項４に記載の発明においては、請求項２または３記載の自動ピアノにおいて、前記軌道算出手段は、予め設定された加速度、前記運動属性算出手段が求めた通過時刻および通過速度を満たす鍵の放物線軌道を算出することを特徴とする。

【００１５】

請求項５に記載の発明においては、請求項４記載の自動ピアノにおいて、前記軌道算出手段は、放物線軌道の算出に際し、鍵の初速度に予め設定された値を用いることを特徴とする。

【００１６】

請求項６に記載の発明においては、請求項２記載の自動ピアノにおいて、前記発音強度情報と基準値とを比較して弱音を抽出する弱音抽出手段を具備するとともに、前記軌道算出手段は、抽出した弱音については予め設定された加速度、前記運動属性算出手段が求めた通過時刻および通過速度を満たす鍵の放物線軌道を算出し、弱音以外については前記運動属性算出手段が求めた通過時刻および通過速度を満たす鍵の直線軌道を算出することを特徴とする。

【００１８】

【作用】

鍵の軌跡の所定点（リファレンスポイント）における運動属性が再現されるように鍵が駆動される。したがって、ハンマの動きとの対応関係が深い点を所定点に選ぶことにより、ハンマの挙動を正確に再現することができる。また、前記所定点を通る直線軌道あるいは放物線軌道に沿って鍵を駆動すると、所定点における鍵の運動属性は確実に再現される。また、放物線軌道を採用した場合は、人間の鍵操作軌道に近いため、演奏のニュアンスをも再現することができる。

【００１９】

【実施例】

Ａ：第１実施例
（イ）制御原理
▲１▼リファレンスポイント
図２０は、一般的な自動ピアノの要部の構成を示す断面図である。図に示すように、自動ピアノにおいては、鍵１と、鍵１の運動をハンマ２に伝達するアクション３と、ハンマ２によって打弦される弦４と、鍵１を駆動するソレノイド５とを有している。そして、ソレノイド５のプランジャが突出すると、鍵１がバランスピンＰを中心に回動し、その演奏者側が下がり（以下、この状態を押鍵状態という）、また、これに連動してアクション３が作動し、ダンパー６が弦４から離れるとともに、ハンマ２が回動して打弦する。
一方、演奏者が弾く場合は、指で鍵１を押下することにより、上述と同様の作用が生じて打弦が行われる。
【００２０】
なお、図において、ＳＥ１，ＳＥ２は、打弦速度を計測するためのセンサであり、ハンマ２がこれらのセンサＳＥ１，ＳＥ２の間を通過する時間を計測することにより、ハンマ２の速度、すなわち、打弦速度が計測される。また、ハンマ２がセンサＳＥ１を通過する時刻が打弦時刻として計測される。なお、ハンマ２が実際に打弦する時刻にセンサＳＥ１で検出される打弦時刻をより近づけるために、センサＳＥ１はハンマ２の打弦位置に近接した位置に設けられている。
ところで、鍵１を押し下げる速度に応じてハンマ２の打弦速度が決まるが、鍵１の速度は初め遅くて次第に早くなる場合や、その逆の場合もあり、さらには、ほとんど一定の速さで押される場合もある。この場合、鍵１のレスト位置（鍵１を押してない場合の初期位置）からエンド位置（鍵を押し切った位置）に至るまでの速度と、ハンマ２の打弦速度とがどのような関係になっているのかが重要である。なぜならば、その関係を考察せず、打弦強度データに応じて鍵速度（初期速度など）を制御しても、記録時の打弦速度を再生することはできないからである。
【００２１】
実験によれば、鍵１のある位置における速度とハンマ２の打弦速度とが極めて良い対応を示すことが判った。この位置は、ピアノの個体差にもよるが、概ねレスト位置から９．０ｍｍ～９．５ｍｍ程度押し下げた位置であった。したがって、鍵１がこの位置に達するときの速度を、打弦強度データに応じて制御すれば、記録時の打弦速度を忠実に再現することができる。なお、以下においては、上述の所定位置をリファレンスポイントＸｒという。
【００２２】
▲２▼リファレンス速度
次に、上述のようにして求めたリファレンスポイントＸｒにおいて、どのような鍵速度にすれば、打弦速度を忠実に再現することができるかを設定する必要がある。なお、以下においては、リファレンスポイントＸｒにおける鍵速度をリファレンス速度Ｖｒという。
【００２３】
ここで、図２はリファレンスポイントＸｒを９．５ｍｍに設定したときの鍵速度と打弦速度の関係を示す図である。図中、白点は鍵をエンド位置まで押し切る単打奏法を行った場合の結果を示し、黒点は鍵をエンド位置まで押し切らずに連打する連打奏法を行った場合の結果を示している。また、Ｃ１は１次最小自乗法近似による直線、Ｃ２は６次最小自乗法による曲線を示している。
【００２４】
図２から明らかなように、リファレンス速度Ｖｒは、直線Ｃ１あるいは曲線Ｃ２のいずれによっても近似できる。したがって、近似性のよい関数を適宜選択すれば、この関数を用いて任意の打弦強度データ（記録時の打弦速度情報）からリファレンス速度Ｖｒを決定することができる。
この実施例においては、計算が簡単で誤差の少ない１次関数近似を採用している。したがって、リファレンス速度ｖｒは、次式によって求められる。

【００２５】
【数１】
ｖｒ＝α・ｖＨ＋β
数１において、ｖＨは打弦速度（打弦強度データ）であり、αおよびβは定数である。定数αおよびβは、ピアノの機種等に応じ実験等によって決定する。なお、αおよびβは、同一ピアノであっても、リファレンスポイントＸｒをどこにするかによって変動する。
【００２６】
▲３▼リファレンス時間差
さて、演奏情報に含まれる打弦時刻データは、前述したように、相対時刻あるいは絶対時刻で記録されているが、いずれにしても再生側自動ピアノにおいて打弦時刻データを読みとって処理することにより、再生時の各音の打弦絶対時刻が求められる。そこで、このようにして求めた打弦絶対時刻において正確に打弦を行わせるには、鍵が何時リファレンスポイントＸｒを通過すればよいかを求める必要がある。
【００２７】
ここで、鍵１がリファレンスポイントＸｒを通過する時刻（以下、リファレンス時刻ｔｒという）と打弦時刻（正確には、ハンマが打弦位置直前にあるセンサＳＥを通過した時刻）との時間差をリファレンス時間差Ｔｒと定義し、これと打弦速度との関係を実験により求めたものが図３である。図３において、白点は単打奏法による結果、黒点は連打奏法による結果を示している。そして、図３を縮尺２倍にしたものが図４であり、縮尺４倍にしたものが図５である。これらの図から判るように、リファレンス時間差Ｔｒと打弦速度との関係は、双曲線により極めて良好に近似される。すなわち、このリファレンス時間差Ｔｒは、打弦速度ｖＨを分母にする１変数式で近似することができ、次式によって算出される。
【００２８】
【数２】
Ｔｒ＝－（γ／ｖＨ）＋δ
なお、数２における定数γおよびδは、ピアノの機種等に応じ実験等によって決定する。なお、γおよびδは、同一ピアノであっても、リファレンスポイントＸｒをどこにするかによって変動する。これは、数１におけるα、βの場合と同様である。
【００２９】
さて、数２によって、リファレンス時間差Ｔｒが求まれば、再生側の打弦絶対時刻からリファレンス時間差Ｔｒを減算することによって、リファレンス時刻ｔｒが求められ、結局、上述した▲１▼、▲２▼、▲３▼の処理により、リファレンスポイントＸｒ、リファレンス速度Ｖｒ、およびリファレンス時刻ｔｒが求められる。したがって、リファレンス時刻ｔｒにリファレンスポイントＸｒに達し、かつ、その時の速度がリファレンス速度Ｖｒとなるように鍵１を駆動すれば、記録時の打弦状態を忠実に再現することができることが判る。
なお、鍵１がリファレンスポイントＸｒに達したときに打弦が行われるのであれば、リファレンス時間差Ｔｒを求める処理は不要になる。
【００３０】
▲４▼制御の概要
以上のようにして、予め設定したリファレンスポイントＸｒにおけるリファレンス速度Ｖｒが求められれば、鍵１の挙動をこれに応じて制御することにより、記録時の打弦速度を再生することができる。
【００３１】
この場合、レスト位置からエンド位置までの鍵の軌道（時間経過に対する鍵の位置）を設定すれば、鍵の押下開始位置からリファレンスポイントＸｒに至るまでの各位置と時刻の関係（速度と時刻の関係等）が求められるから、これに応じて鍵の位置をフィードバック制御すればよいことが判る。この場合における鍵の軌道は、例えば、リファレンスポイントＸｒを通る直線軌道（等速運動の場合）や放物線軌道（等加速度運動の場合）の他、任

意の軌道を設定することができる。ただし、打弦状態の再現性が良く、また、制御し易い軌道を選択することが好ましい。また、設定する軌道によっては、リファレンス点における加速度等（運動を決定する他の要素）を求める必要が生じるが、これについては軌道の種類に応じて適宜算出すればよい。
以上がこの実施例の制御原理である。
【００３２】
（ロ）第１実施例の構成および動作
以下、図面を参照してこの発明の実施例の構成について説明する。図１は、この実施例の構成を示すブロック図である。なお、前述した図２０の各部と対応する部分には同一の符号を付け、その説明を省略する。
【００３３】
図において、１０は再生前処理部であり、記録メディアあるいはリアルタイム通信装置から供給される演奏データに基づいて、鍵の軌道データを作成する回路であり、まず、リファレンス時刻ｔｒ、リファレンス速度ｖｒを求め、さらに、加速度の推定が必要な場合はこれを演算する。そして、軌道の種類（直線、放物線、その他任意の軌道）に応じて各音に対する鍵の軌道を示すデータを生成する。
１１は、再生前処理部１０が作成した軌道データに基づいて、ソレノイド５のプランジャの動きを示すデータを作成するモーションコントローラである。また、１２はサーボコントローラであり、モーションコントローラ１１から供給されるデータに応じてソレノイド５の励磁電流を制御する。この場合、ソレノイド５には、プランジャの位置を検出する検出機構が設けられており、これにより検出されたプランジャ位置をフィードバック信号としてサーボコントローラ１２にフィードバックするようになっている。そして、サーボコントローラ１２は、モーションコントローラ１１から供給されるデータとソレノイド５からのフィードバック信号とを照合しながら、両者が一致するように励磁電流を制御する。
【００３４】
上述した構成によれば、演奏データ中の打弦強度データに応じて、リファレンスポイントＸｒを通過する鍵軌道が生成され、鍵がこの軌道を再現するようにソレノイド５の励磁電流が制御される。
この結果、鍵１がリファレンスポイントＸｒに達したときの速度は、記録時の打弦速度に対応した速度（すなわち、リファレンス速度Ｖｒ）になり、ハンマ２は記録時と同じ速度で打弦を行う。
以上のように、この実施例においては、リファレンスポイントという制御点を導入し、この点における鍵の運動属性を再現するようにしたので、センサ等を増やすことなく、忠実に打弦速度を再現することができる。
【００３５】
Ｂ：第２実施例
次に、この発明の第２実施例について説明する。なお、第２実施例における制御原理は、第１実施例と同様であるが、第２実施例においては、鍵の軌道として直線軌道を設定し、また、押鍵時のみでなく離鍵時においても鍵をサーボ駆動している。
【００３６】
（イ）第２実施例の構成
図６は、第２実施例の構成を示すブロック図である。なお、図１の各部に対応する部分には同一の符号が付けてある。
図６に示す２６は、鍵１の下面に取り付けられた板状のシャッタである。２５は、上下方向に所定距離隔て設けられる２組のフォトセンサによって構成されているキーセンサであり、鍵１が押下され始めると、まず上方のフォトセンサが遮光され、次いで、下方のフォトセンサが遮光される。離鍵の際には、下方のフォトセンサが受光状態になり、ついで、上方のセンサが受光状態になる。
【００３７】
キーセンサ２５の出力信号は、演奏記録部３０に供給され、演奏記録部３０は、キーセン

サ２５内の下方のフォトセンサが受光状態になってから上方のフォトセンサが受光状態になるまでの時間を測定し、ここから、離鍵速度を検出する。また、演奏記録部３０は上方のフォトセンサが受光状態になった時刻を離鍵時刻として処理する。また、演奏記録部３０は、センサＳＥ２が遮光されてからセンサＳＥ１が遮光されるまでの時間を計測し、ここから打弦速度を検出する。また、センサＳＥ１が遮光された時刻を打弦時刻として処理する。

【００３８】

すなわち、演奏記録部３０は、演奏が開始されると、センサＳＥ１，ＳＥ２の出力信号に基づいて、打弦時刻および打弦速度を検出し、かつ、キーセンサ２５の出力信号に基づいて離鍵時刻および離鍵速度を検出する。以上のようにして検出された各情報は、記録後処理部３１に供給される。

【００３９】

記録後処理部３１においては、演奏記録部３０から供給される各種情報に対し、
正規化処理を施した後に、外部の記録媒体に演奏情報として供給する。ここで、正規化処理とは、ピアノの個体差を吸収するための処理である。すなわち、打弦速度、打弦時刻、離鍵速度、離鍵時刻等は、各ピアノにおけるセンサの位置や、構造上の違い、あるいは機械的誤差によって固有の傾向を持つため、標準となるピアノを想定し、そのピアノにおける打弦速度、打弦時刻等に変換するための処理である。

次に、本実施例における再生前処理部１０について説明する。この実施例においては、鍵軌道として直線を想定するので、次のような手法で軌道データの作成を行う。

【００４０】

▲１▼押鍵時の軌道データ作成

図７は、鍵の押鍵軌道（直線軌道）を示す図であり、レスト位置X_0から等速運動をしてエンド位置Ｘｅに至っている。ここで、鍵の初速度をV_0、鍵の位置をＸ、鍵の駆動開始時点からの時刻をｔとすれば、鍵の軌道は、

【００４１】

【数３】

$$X = V_0 \cdot t + X_0$$

と表される。

また、鍵がリファレンスポイントＸｒに達する時刻をｔｒ’とすると、

【００４２】

【数４】

$$Xr = V_0 \cdot tr' + X_0$$

なる式が成り立つから、この数４から時刻ｔｒ’を求めることができる。したがって、押鍵を開始する絶対時刻（以下、押鍵開始時刻という）t_0は、次式によって求めることができる。

【００４３】

【数５】

$$t_0 = tr - tr' = tr - (Xr - X_0) / V_0$$

なお、リファレンス時刻ｔｒは、前述のように、打弦時刻からリファレンス時間差Ｔｒを減算することによって求める。上記数５によって押鍵開始時刻t_0を求め、この時刻から、数３で示される軌道に従って鍵１を駆動すれば、鍵１は、リファレンス時刻ｔｒにおいて正確にリファレンスポイントＸｒに達し、しかも、その時の速度は、打弦強度データに対応したリファレンス速度Ｖｒとなる。

【００４４】

なお、鍵の挙動については、直線軌道（等速運動）を想定しているから、リファレンス速度Ｖｒと初速度V_0は等しい。そして、リファレンス速度Ｖｒは、前述の数１によって求められるから、数５で求めた押鍵開始時刻t_0から一定速度ｖｒで鍵を駆動するように制御（速度制御）しても上記と同様の結果を得ることができる。

【００４５】

▲２▼離鍵時の軌道データ作成
次に、離鍵時の軌道データ作成について説明する。
まず、鍵の位置をＸＮ、離鍵初速度をV_0N（＜０）、離鍵開始時点からの時刻をｔＮ、エンド位置をＸｅとすれば、離鍵時の鍵軌道は、次式で表される。
【００４６】
【数６】
$XN=V_0N\cdot tN+Xe$
ここで、図８は数６で示される軌道を示す図である。
さて、前述のように、演奏記録部３０（図６参照）は、キーセンサ２５内の下方のフォトセンサが受光状態になってから上方のフォトセンサが受光状態になるまでの時間を測定して離鍵速度ｖｋＮを検出し、また、上方のフォトセンサが受光状態になった時刻を離鍵時刻ｔｋＮとして検出する。この場合、離鍵時刻ｔｋＮにおけるダンパ６は、弦４に接して音の減衰を開始する状態なっている（そのような状態になるようフォトセンサの位置が調整されている）。そして、このようにして検出された離鍵速度ＶｋＮおよび離鍵時刻ｔｋＮは、それぞれ演奏情報を構成するデータとして記録され、再生時に読み出される。
【００４７】
ここで、ダンパ６が弦４に接するときの鍵の位置を離鍵リファレンスポイントＸｒＮと定義すれば、鍵１が離鍵リファレンスポイントＸｒＮに達したときに、離鍵状態になったということができる。したがって、鍵１が離鍵リファレンスポイントＸｒＮに達する時刻（以下、離鍵リファレンス時刻ｔｒＮという）と、演奏情報中の離鍵時刻ｔｋＮとが一致するように鍵位置を制御すれば、正確な離鍵タイミング制御を行うことができる。
【００４８】
また、ダンパ６が弦４に接する速さは、音の減衰状態に影響を与えるから、これを忠実に再現することが望ましい。この速さは、離鍵速度ＶｋＮに対応するから、結局、離鍵リファレンスポイントＸｒＮにおける鍵速度（以下、離鍵リファレンス速度ＶｒＮという）を正確に離鍵速度ＶｋＮに一致させれば、音の減衰状態が正確に再現される。
ここで、鍵の駆動が開始される時刻を基準（＝０）にして、鍵がリファレンスポイントＸｒＮに達する時刻をｔｒＮ’とすると、
【００４９】
【数７】
$XrN=V_0N\cdot trN'+XeN$
（ただし、直線軌道だから$V_0N=VrN=VkN$）
なる関係が成り立ち、この数７より時刻ｔｒＮ’を求めることができる。したがって、次式によって離鍵開始時刻t_0Nを求めることができる。
【００５０】
【数８】
$$t_0N=trN-trN'$$
$$=trN-(XrN-XeN)/V_0N$$
この数８によって離鍵開始時刻t_0Nを求め、この時刻から、数６で示される軌道に従って鍵を駆動すれば、鍵は離鍵時刻ｔｋＮにおいて離鍵リファレンスポイントＸｒＮに達し、記録時の離鍵状態を忠実に再現することができる。
なお、時刻t_0から速度V_0N（＝ｖｋＮ：離鍵速度）で鍵駆動するように制御（速度制御）しても上記と同様の結果を得ることができる。
【００５１】
▲３▼交差時の軌道データ作成
押鍵軌道および離鍵軌道は上述のようにして作成されるが、鍵の操作には、離鍵の途中から次の押鍵に移ったり、あるいは、押鍵の途中から離鍵される場合がある。このような場合においては、作成した押鍵軌道と離鍵軌道とが交差する。例えば、図９はこのような軌道の交差状態を示しており、図示の状態では、時刻t_0から時刻ｔｃまで押鍵が行われ、

時刻ｔｃから時刻t_4まで離鍵が行われている。このとき、上述の方法によって生成される押鍵軌道は、時刻t_0にレスト位置X_0を離れ、時刻t_3においてエンド位置Ｘｅに達する軌道であり、また、離鍵軌道は時刻t_0Ｎにエンド位置Ｘｅを離れ、時刻t_4においてレスト位置X_0に達する軌道である。

【００５２】

ここで、交差する時刻ｔｃを求めることができれば、t_0～ｔｃまでは押鍵軌道に基づいて鍵１を制御し、ｔｃ～t_4までは離鍵軌道に基づいて鍵を制御すればよい。ここで、図９に示すような、押鍵の後に発生した離鍵の軌道が交差する場合は、交差時刻ｔｃは次のようにして求めることができる。

【００５３】

【数９】

$$tc=(V_0\cdot t_3-V_0N\cdot t_0N)\ /\ (V_0-V_0N)$$
$$=t_0N+V_0\cdot(t_3-t_0N)\ /\ (V_0-V_0N)$$

なお、数９におけるt_3は、次式により算出される。

【００５４】

【数１０】

$t_3=t_0+(Xe-X_0)/V_0$

また、離鍵の後に発生した押鍵の軌道が交差する場合も、２つの直線軌道の交点を求めればよいので、上記と同様の考え方により交差時刻を求めることができる。

このようにして、交差時刻を求め、押鍵軌道と離鍵軌道を組み合わせることにより、交差時の軌道データを作成する。

以上が、再生前処理部１０における軌道データの作成であり、このようにして作成された軌道データは、図６に示すモーションコントローラ１１に供給される。モーションコントローラ１１においては、作成された軌道データに基づいて、各時刻における鍵１の位置に対応した位置制御データ（Ｘ）を作成し、サーボコントローラ１２に供給する。

【００５５】

サーボコントローラ１２は、位置制御データ（Ｘ）に応じた励磁電流をソレノイド５に供給するとともに、ソレノイド５から供給されるフィードバック信号と制御データ（Ｘ）を比較し、両者が一致するようにサーボ制御を行う。

【００５６】

（ロ）第２実施例の動作

始めに、記録動作について説明する。まず、演奏者によって演奏が行われると、

演奏記録部３０がセンサＳＥ１，ＳＥ２の出力信号に基づいて打弦速度および打弦時刻を検出するとともに、センサ２５の出力信号に基づいて離鍵時刻および離鍵速度を検出する。これらの情報は、記録後処理部３１において正規化処理された後に、演奏情報としてフロッピーディスク等の記録媒体に記録される。

【００５７】

次に、再生動作について説明すると、まず、再生前処理部１０は、記録媒体から演奏情報を読み出し、その中の打弦時刻データおよび打弦速度データに基づいて、押鍵軌道を作成する。

作成された押鍵軌道データは、モーションコントローラ１１に供給され、ここで、位置制御データ（Ｘ）に変換される。すなわち、押鍵開始時刻t_0になると、数３に示される軌道データがモーションコントローラ１１に供給され、モーションコントローラ１１は、数３のＸを時間経過とともに順次演算し、位置制御データ（Ｘ）を作成する。この位置制御データ（Ｘ）は、サーボコントローラ１２に供給され、これにより、数３のＸに対応した励磁電流がソレノイド５に供給される。この場合、サーボコントローラ１２は、ソレノイド５のフィードバック信号と位置制御データ（Ｘ）とを比較し、両者が一致するように励磁電流を制御するから、ソレノイド５のプランジャの突出量は、数３のＸに対応したものとなる。したがって、鍵１は数３で示される直線軌道に従って押下されていき、リファレ

ンスポイントＸｒにおいてリファレンス速度Ｖｒを有する運動を行う。これにより、記録時の打弦強度を忠実に再現する打弦が行われる。

【００５８】

次に、再生前処理部１０は、演奏情報の中の離鍵時刻データ、離鍵速度データに応じて、離鍵軌道を作成し、モーションコントローラ１１に供給する。モーションコントローラ１１は、上述の場合と同様にして、数６のＸＮを時間の経過に応じて順次演算し、位置制御データ（Ｘ）を作成し、サーボコントローラ１２に供給する。この結果、サーボコントローラ１２は数６に対応した励磁電流制御を行い、鍵１は数６で示される直線軌道に従ってレスト位置$Ｘ_0$に戻っていく。これにより、鍵１の運動は、離鍵リファレンスポイントＸｒＮにおいて離鍵リファレンス速度ＶｒＮを有するものとなり、記録時の離鍵状態が忠実に再現される。一方、連打等が行われ、押鍵軌道と離鍵軌道が交差するときは、再生前処理部１０が数１０によって交差時刻ｔｃを演算し、この時刻を境に、押鍵軌道と離鍵軌道を切り換えてモーションコントローラ１１に供給する。これにより、鍵１は押鍵軌道の途中から離鍵軌道に、あるいは離鍵軌道の途中から押鍵軌道に切り換えられ、いわゆる、ハーフストロークの奏法に従った運動を行う。

【００５９】

Ｃ：第３実施例

（イ）第３実施例の構成

次に、この発明の第３の実施例について説明する。この実施例が前述した第２の実施例と異なる点は、演奏記録部３０において、打弦速度とともにキーオン速度も検出する点と、再生前処理部１０において放物線の軌道データを作成する点である。そこで、説明の簡略化のため、第３実施例の構成については、第２実施例の構成を示す図６を兼用して説明する。

【００６０】

この実施例における演奏記録部３０は、キーセンサ２５内の上方のフォトセンサが遮光されてから下方のフォトセンサが遮光されまでの時間を計測し、ここからキーオン速度Ｖｋを検出する。また、下方のフォトセンサが遮光された時刻をキーオン時刻$ｔｋ_2$として検出する。これらのデータは、打弦速度等のデータと共に、記録後処理部３１を介して記録媒体に書き込まれる。

また、この実施例における再生前処理部１０は、押鍵時の鍵軌道として放物線、離鍵の鍵軌道として直線を想定するので、次のような手法で軌道データの作成を行う。

【００６１】

▲１▼押鍵時の軌道データ作成

押鍵軌道を次のように規定する。

【００６２】

【数１１】

$Ｘ＝ａ／２・ｔ^2＋ｂ・ｔ＋ｃ$

ここで、ａは加速度であり、次式によって求める。

【００６３】

【数１２】

$ａ＝（Ｖｒ－Ｖｋ）／（ｔｒ－（ｔｋ_1＋ｔｋ_2）／２）$

数１２におけるリファレンス速度Ｖｒは、前述の実施例と同様に、数１を用いて打弦速度から求める。また、$ｔｋ_1$は、次式によって求めることができる。

【００６４】

【数１３】

$ｔｋ_1＝ｔｋ_2－Ｘｄ／Ｖｋ$

ここで、Ｘｄは、キーセンサ２５内の２つのセンサの取り付け間隔である。また、図１０は、この実施例における放物線軌道を示す図であり、図において、$Ｘｋ_2$、$Ｘｋ_1$はキーセンサ２５内の２つのセンサの取り付け位置である。この図からも判るように、キーオン速度Ｖｋは、シャッタ２６が$Ｘｋ_1$と$Ｘｋ_2$の間を通過する間の平均速度であり、放物線

軌道においては、中間時刻である時刻（ｔｋ$_1$＋ｔｋ$_2$）／２における速度である。
前述した数１２は、リファレンス速度Ｖｒとキーオン速度Ｖｋの速度差を、リファレンス時刻ｔｒと中間時刻（ｔｋ$_1$＋ｔｋ$_2$）／２の時間差で除したもので、言い替えれば、リファレンスポイントＸｒとセンサ中間点との間の速度変化から加速度を算出するものである。なお、加速度一定という推定のもとでは、任意の２点間の速度変化を基にして加速度を検出することができる。

【００６５】

以上のことから判るように、演奏データ中の打弦時刻と打弦速度から、リファレンス時刻ｔｒとリファレンス速度Ｖｒが求められ、さらに、キーオン速度Ｖｋとキーオン時刻ｔｋ$_2$を参照して加速度ａが求められる。
したがって、あとは押鍵開始時刻と初速度が求められれば、図１０に示す放物線軌道に沿ってキーを駆動できることになる。次に、これらの求め方について説明する。
まず、図１１に示すように、押鍵開始時刻をｔ$_0$、初速度をＶ$_0$とすれば、数１１における係数ｂは、

【００６６】

【数１４】

$$b = V_0 - a \cdot t_0$$

と表され、また、数１１における定数ｃは、

【００６７】

【数１５】

$$c = X_0 - (a/2) \cdot t_0^{\,2} + b \cdot t_0$$

と表される（ただし、数１５におけるＸ$_0$は前述のようにレスト位置）。
ここで、押鍵開始時刻を基準（＝０）にした場合のリファレンス時刻をｔｒ’とし、さらに、数１４、数１５を用いて、数１１をリファレンスポイントＸｒにおける式に書き直すと次式になる。

【００６８】

【数１６】

$$Xr = (a/2) \cdot tr'^{\,2} + V_0 \cdot tr' + X_0$$

ここで、リファレンス速度Ｖｒは、

【００６９】

【数１７】

$$Vr = a \cdot tr' + V_0$$

と表すことができるから、この関係を数１６に代入して整理すると、

【００７０】

【数１８】

$$0 = (a/2) \cdot tr^2 - Vr \cdot tr' - (X_0 - Xr)$$

となり、ここから、ｔｒ’を求めると、

【００７１】

【数１９】

$$tr' = (Vr - (Vr^2 + 2a(X_0 - Xr))^{1/2})/a$$

となる。したがって、加速度ａ、リファレンス速度Ｖｒ、リファレンスポイントＸｒ、およびレスト位置Ｘ$_0$が既知であれば、鍵が押鍵開始時からリファレンスポイントＸｒに至るまでの時刻ｔｒ’が求められる。また、リファレンス時刻ｔｒと押鍵開始時刻ｔ$_0$の関係は、

【００７２】

【数２０】

$$tr' = tr - t_0$$

であるから、数２０を用いて、押鍵開始時刻ｔ$_0$が求められる。
また、数１６に数１７を代入して初速度Ｖ$_0$について整理して解けば、

【００７３】

【数２１】
$V_0 = (Vr^2 + 2a(X_0 - Xr))^{1/2}$
となり、これにより初速度V_0を求めることができる。
したがって、以上のようにして求めた初速度V_0、加速度ａを、数１１に代入して軌道を求め、押鍵開始時刻t_0からその軌道に従って鍵を駆動することにより、打弦時刻と打弦速度とを正確に再現することができる。しかも、人間の鍵操作に近い放物線軌道なので、演奏者の微妙なニュアンスまで表現することが可能になる。
なお、時刻t_0から初速度V_0で鍵を駆動し、後は、加速度ａに対応した速度変化分を用いて速度制御を行っても、上記と同様の効果が奏することができる。
【００７４】
▲２▼離鍵時の軌道データ作成
離鍵については、直線軌道を想定するので、前述した第２実施例と同様の離鍵軌道データ作成を行う。
【００７５】
▲３▼交差時の軌道データ作成
この実施例における押鍵軌道と離鍵軌道の交差は、放物線軌道と直線軌道との交差であるので、交差時刻ｔｃは、次のようにして求めることができる。
【００７６】
【数２２】
$tc = (-\Delta b + (\Delta b^2 - 2 \cdot \Delta a \cdot \Delta c)^{1/2}) / \Delta a$
ただし、数２２におけるΔaは、
【００７７】
【数２３】
$\Delta a = a - aN$
であり、ａＮは、離鍵時の加速度である。この実施例の場合は、離鍵時の加速度は０であるので、Δa＝ａ（押鍵時の加速度）となる。
また、数２２におけるΔbは、
【００７８】
【数２４】
$$\Delta b = Vr - VrN - (a \cdot tr - aN \cdot trN)$$
$$= Vr - VrN - a \cdot tr \qquad (\because aN = 0)$$
であり、Δcは、
【００７９】
【数２５】
$$\Delta c = Xr - XrN + (a \cdot tr^2 - aN \cdot trN^2) / 2 - (Vr \cdot tr - VrN \cdot trN)$$
$$= Xr - XrN + (a \cdot tr^2) / 2 - (Vr \cdot tr - VrN \cdot trN) \qquad (\because aN = 0)$$
である。
このようにして、交差時刻ｔｃを求め、押鍵軌道と離鍵軌道を組み合わせることにより、交差時の軌道データを作成する。
【００８０】
以上が、第３実施例における再生前処理部１０の軌道データ作成処理である。このようにして作成された軌道データは、図６に示すモーションコントローラ１１に供給され、モー

ションコントローラ１１においては、作成された軌道データに基づいて、各時刻における鍵１の位置に対応した位置制御データ（Ｘ）を作成し、サーボコントローラ１２に供給する。このモーションコントローラ１１とサーボコントローラ１２の構成は、第２実施例と同様になっている。

【００８１】

（ロ）第３実施例の動作

次に、第３実施例の動作について説明するが、概ね、第２実施例の動作と同じであるため、異なる点だけを説明する。

まず、記録動作は、演奏記録部３０がセンサ２５の出力信号に基づいてキーオン時刻およびキーオン速度をも検出し、記録後処理部３１において正規化処理された後に、演奏情報の一つとしてフロッピーディスク等の記録媒体に記録される。

【００８２】

次に、再生動作について説明すると、まず、再生前処理部１０は、記録媒体から演奏情報を読み出し、その中の打弦時刻データ、打弦速度データ、キーオン速度データおよびキーオン時刻データに基づいて、放物線の押鍵軌道を作成する。作成された放物線の押鍵軌道データは、モーションコントローラ１１に供給され、ここで、位置制御データ（Ｘ）に変換される。すなわち、押鍵開始時刻t_0になると、数１１に示される軌道データがモーションコントローラ１１に供給され、モーションコントローラ１１は、数１１のＸを時間経過とともに順次演算し、位置制御データ（Ｘ）を作成する。この位置制御データ（Ｘ）は、サーボコントローラ１２に供給され、これにより、数３のＸに対応した励磁電流がソレノイド５に供給される。この場合、サーボコントローラ１２は、ソレノイド５のフィードバック信号と位置制御データ（Ｘ）とを比較し、両者が一致するように励磁電流を制御するから、ソレノイド５のプランジャの突出量は、数１１のＸに対応したものとなる。したがって、鍵１は数１１で示される放物線軌道に従って押下されていき、リファレンスポイントＸｒにおいてリファレンス速度Ｖｒおよび加速度ａを有する運動を行う。この結果、記録時の打弦強度を忠実に再現する打弦が行われる。しかも、人間の演奏状態に近い放物線軌道により、加速度をも再現するので、演奏の微妙なニュアンスも再現される。また、押鍵軌道と離鍵軌道が交差するときは、再生前処理部１０が数２１によって交差時刻ｔｃを演算し、この時刻を境に、押鍵軌道と離鍵軌道を切り換えてモーションコントローラ１１に供給する。これにより、鍵１は放物線の押鍵軌道の途中から直線の離鍵軌道に、あるいは直線の離鍵軌道の途中から放物線の押鍵軌道に切り換えられ、いわゆる、ハーフストロークの奏法に従った運動を行う。

【００８３】

ここで、図１２に本実施例によって鍵駆動した場合の実験例を示す。この図１２に示す３つのグラフは、いずれも横軸が時間であり、縦軸が鍵のレスト位置X_0からの移動量を示している。

この図に示す（イ）は、演奏者が実際に演奏を行った場合の鍵の軌道を示しており、図に示す時刻t_{10}、t_{11}の付近はハーフストローク奏法のために、鍵がレスト位置X_0に戻る前に次の押鍵動作に入っている。また、時刻t_{12}付近は、鍵は動いているが打弦は行われなかった部分である。

また、図１２（イ）に示す演奏から得られる打弦時刻、打弦速度、キーオン時刻、キーオン速度、離鍵時刻および離鍵速度を基にして、本実施例において再現した押鍵軌道および離鍵軌道が同図（ハ）に示す軌道である。また、同図（ロ）は、同図（イ）および（ハ）に示す２つの軌道を重ねたものであり、両者が良く一致していることが判る。例えば、ハーフストロークの部分については、再生軌道もハーフストローク軌道になっており、打弦が行われなかった時刻t_{12}の部分については、再生軌道は鍵を押し切った状態が継続されている。

【００８４】

また、図１３は、図１２の一部を拡大したものであり、この図からも実際の演奏による鍵軌道と、実施例において再現した鍵軌道との一致性が確認される。なお、実際の演奏によ

る鍵軌道に対して、実施例で再現した鍵軌道は揺らぎが少なく一見単純に見えるが、図１２（イ）の軌道に含まれる揺らぎは、演奏者の意図とは違った部分（ミスによる部分、もしくは、アクション機構特性によって生じる演奏に関係しない部分）がほとんどである。したがって、実施例による軌道は、演奏者の意図とは違った部分を除外し、理想に近づいた軌道であると言える。

【００８５】

（ハ）第３実施例の変形

▲１▼ダンパー離弦タイミングの再現

鍵を押下していくと、まず、ダンパー６（図６参照）が弦から離れ、次いで、ハンマ２が打弦を行うことは周知の通りである。この場合、ダンパー６が弦から離れても、打弦が行われるまでは音は発生しないから、ダンパー６の離弦を正確に再現しても意味がないという考えもある。しかしながら、複数の鍵を同時あるいは近接したタイミングで押鍵する場合などには、他の弦の振動や共鳴の影響のために、打弦前であっても、ダンパーが離れていれば、その弦が振動することがある。したがって、演奏における他の弦の影響を忠実に再現するために、ダンパーの離弦タイミングを正確に再現することも重要であると言える。

そこで、以下のようにして、ダンパー離弦タイミングを推定する。まず、前述のように、キーオン時刻をtk_2、キーオン速度をＶｋとし、キーオン位置（鍵１に設けられたシャッタ２６がキーセンサ２５内の下方のフォトセンサを遮光したときの鍵の位置）をXk_2とする。次に、図１４に示すように、ダンパーの離弦に対応する鍵の位置をX_1とし、キーオン速度Ｖｋの傾きに沿って直線を引く。そして、この直線と位置X_1との交点の時刻をダンパー離弦時刻t_1と推定する。すなわち、ダンパ離弦時刻t_1は次式によって求められる。

【００８６】

【数２６】

$$t_1 = tk_2 - (Xk_2 - X_1) / Vk$$

以上のようにして、ダンパー離弦時刻t_1が求められれば、前述の各実施例と同様にしてリファレンス速度ＶｒおよびリファレンスＶ時刻ｔｒを求め、これらを満たす放物線軌道を求める。この放物線軌道を図１５に示す。この軌道は、次のように表される。

【００８７】

【数２７】

$$X = (((X_1 - Xr) - Vr \cdot (t_1 - tr)) / (t_1 - tr)^2) \cdot t^2 + Vr \cdot t$$

したがって、数２７に示される軌道にしたがって、ソレノイドの励磁電流を制御すれば、ダンパー離弦時刻を正確に再現することができる。なお、励磁電流の制御は、前述した各実施例と同様に行えばよい。

【００８８】

▲２▼加速度、初速度の固定

第３実施例においては、押鍵時の加速度ａと初速度V_0の双方を演算によって求めるようにしたが、いずれか一方を固定値にして、計算を簡略化してもよい。この場合の固定値は、実験等を繰り返すことによって、統計的に適切な値を決めることが望ましい。

例えば、加速度ａを固定する場合には、ａ＝２．５ｍ／ｓ^{2}に設定すると、比較的良好な結果が得られることが判った。ここで、ａ＝２．５ｍ／ｓ^{2}にした場合の実験結果を図１６に示す。

【００８９】

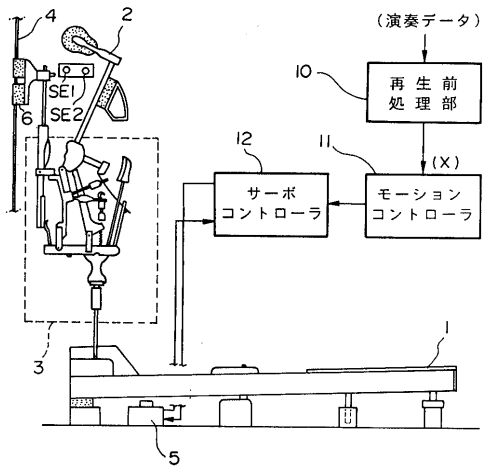
この図に示す（イ）は、演奏者が実際に演奏を行った場合の鍵の軌道を示しており、（ハ）は同図（イ）に示す演奏から得られる打弦時刻、打弦速度を基にするとともに、加速度を固定して再現した押鍵軌道を示す。すなわち、前述した数１１に示す軌道における加速度ａの値を固定し、数１２に示す加速度算出を省略して押鍵軌道を求めたものである。なお、離鍵軌道は、直線軌道であるため、前述の実施例と同様である。

また、同図（ロ）は、同図（イ）および（ハ）に示す２つの軌道を重ねたものであり、両者が良く一致していることが判る。例えば、ハーフストロークの部分についても、良好な一致性が認められる。なお、図１７（イ）、（ロ）、（ハ）は、図１６（イ）、（ロ）、（ハ）の軌道を一部拡大したものである。
以上のように加速度を固定すると、演算が省略できるため、処理速度が早くなるとともに、キーオン速度Ｖｋおよびキーオン時刻ｔｋ２の検出が不要になるため、装置構成としては第２実施例の構成であっても実施することができる。
【００９０】
次に、初速度$Ｖ_0$を固定した場合について説明する。この場合には、数２０の演算を省略し、予め設定した初速度$Ｖ_0$を用いて数１１に示す軌道を演算すればよい。
ここで、初速度$Ｖ_0$を０．１ｍ／ｓにした場合の実験結果を図１８に示す。
この図に示す（イ）は、演奏者が実際に演奏を行った場合の鍵の軌道を示しており、（ハ）は同図（イ）に示す演奏から得られる打弦時刻、打弦速度を基にするとともに、初速度$Ｖ_0$を固定して再現した押鍵軌道を示す。すなわち、前述した数２０の初速度演算を省略して初速度$Ｖ_0$を固定し、この条件の基で数１１に示す押鍵軌道を求めたものである。なお、離鍵軌道は、直線軌道であるため、前述の実施例と同様である。そして、同図（ロ）は、同図（イ）および（ハ）に示す２つの軌道を重ねたものであり、両者が良く一致していることが判る。なお、図１９（イ）、（ロ）、（ハ）は、図１８（イ）、（ロ）、（ハ）の軌道を一部拡大したものである。
【００９１】
Ｄ：変形例
この発明においては、上述した各実施例に対し、以下に述べる種々の変形が可能である。
▲１▼サーボ制御の変形
上述した各実施例においては、モーションコントローラ１１とサーボコントローラ１２によって位置サーボ制御を行っていたが、これに代えて、第２実施例では速度を指示する速度サーボ制御を行っても良い。すなわち、モーションコントローラ１１が押鍵（あるいは離鍵）開示時刻において初速度を指示し、サーボコントローラ１２は鍵１が与えられた速度を保つようにサーボ制御を行うようにしてもよい。また、第３実施例においては、加速度制御を行うようにしてもよい。すなわち、モーションコントローラ１１が押鍵開始時刻において初速度を指定し、以後は時間の経過とともに速度の変化分を順次指示する。そして、サーボコントローラ１２は、速度変化分を累算して、現時点の速度を算出し、鍵１の速度が累算速度に一致するようにサーボ制御を行う。
【００９２】
▲２▼推定した加速度情報の電子楽器への応用
第３実施例において推定した加速度ａは、自動ピアノの押鍵制御に限らず、電子楽器等の楽音制御に用いることができる。すなわち、加速度の推定は、押鍵速度情報と打弦速度情報がそれぞれ１以上あれば可能であるから、これらの情報を基に加速度を推定し、それを楽音制御情報として用いることができる。例えば、楽音波形を複数記憶し、これらの波形を音の強さや、高さに応じて選択して読み出す電子楽器があるが、この電子楽器に、さらに加速度情報に応じた波形選択を行わせると、発生楽音の表情がいっそう豊かになるという利点が得られる。
【００９３】
さらに、第３実施例においては、キーオン速度Ｖｒとリファレンス速度Ｖｒの偏差に基づいて加速度を推定したが、打弦速度とキーオン速度の差から推定するようにしてもよい。また、打弦速度を２カ所以上で検出するように、これらの速度差から推定してもよく、さらに、押鍵速度を２カ所以上で検出するようにし、これらの速度差から検出してもよい。
【００９４】
また、加速度の推定は、記録時に行っても、再生時に行ってもよく、これらの中間において行っても良い。例えば、記録媒体から演奏情報を読み取る際に、加速度推定を行って他の記録媒体に記録するようにしてもよい。

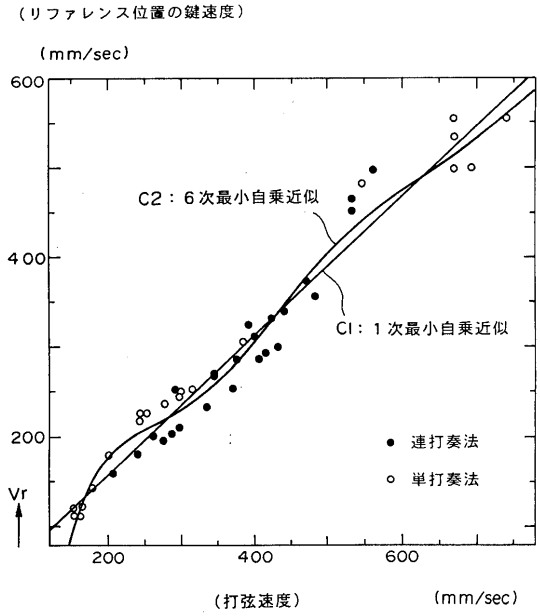
【００９５】
▲３▼リファレンスポイントＸｒにおける運動属性の変形
上述した各実施例においては、リファレンスポイントＸｒにおける鍵の速度や加速度を再現するようにしたが、鍵の運動を一意的に再現できるのであれば、その他の運動属性を再現するようにしてもよい。例えば、速度、加速度、力のいずれか、あるいは、これらの組み合わせを用いても良い。
【００９６】
▲４▼離鍵時の加速度軌道
上述した各実施例においては、離鍵時の軌道は全て直線軌道であったが、これを加速度軌道としてもよい。この場合には、離鍵速度を２カ所以上で測定するようにセンサを追加し、得られた速度の変化から加速度を推定するように構成すればよい。例えば、キーセンサ２５内のフォトセンサの数を増やし、演奏記録部３０がこれらのセンサの出力信号から２カ所以上の離鍵速度を検出するようにすればよい。
さらに、押鍵時と離鍵時の軌道を直線とするか放物線とするかは、任意に組み合わせることが可能である。
【００９７】
▲５▼開平演算態様
第３実施例における初速算出演算（数２０）および押鍵開始時刻算出演算（数１８、１９）は、開平演算が入るが、ソフトウエア上の演算速度が問題になる場合は、例えば、２分探索法を用いて、正数演算をしてもよい。
【００９８】
▲６▼弱音の再生
実際の押鍵操作においては、強打よりも弱打において放物線軌道をとる傾向が強く、直線軌道での再現では再現性が悪化してくる。特に、最弱打（ｐｐｐｐ）に近い押鍵を直線軌道で再現しようとすると、ピアノのアクション部の構造などの理由から、ハンマへの力伝達が行われず不安定な打弦となることがある。そこで、第２実施例においては、弱音だけを検出して放物線軌道で再現するようにし、その他の音は直線軌道で再現するように構成してもよい。すなわち、再生前処理部１０において、打弦速度データを所定のしきい値で振り分け、弱音と判定された音に対しては、予め設定した加速度ａを用いて放物線軌道を算出し、これによって鍵を駆動する。
【００９９】
▲７▼打弦時刻、打弦速度の代用
例えば、特開平１－２３９５９４号では、押鍵速度から打弦速度を推定して記録するようにしているが、このように、打弦速度に代わるデータが記録されている場合は、前述した各実施例において、それを用いることも可能である。したがって、ＭＩＤＩ信号中のキーオン速度（キーベロシティ）のように、打弦速度に対応するデータが記録されている場合においては、これを用いて軌道演算を行うことができる。打弦時刻についても、これに代わるデータがあれば、代用することができる。要は、発音時刻や発音強度に関連したデータ（発音時刻を示す発音時刻情報および発音強度を示す発音強度情報）であれば、用いることができる。
【０１００】
【発明の効果】
以上説明したように、この発明によれば、鍵の軌跡の所定点（リファレンスポイント）における運動属性が再現されるように鍵を駆動するので、ハンマの挙動を忠実に再現することができ、打弦速度を正確なものとすることができる。また、前記所定点を通る直線軌道あるいは放物線軌道に沿って鍵を駆動すれば、所定点における鍵の運動属性は確実に再現されるとともに、特に、放物線軌道を採用した場合は、人間の鍵操作軌道に近いため、演奏のニュアンスをも再現することができる。
【図面の簡単な説明】
【図１】この発明の第１実施例の構成を示すブロック図である。

【図２】図２はリファレンスポイントを９．５ｍｍに設定したときの鍵速度と打弦速度の関係を示す図である。
【図３】リファレンス時間差Ｔｒと打弦速度との関係を示す図である。
【図４】図３を縮尺２倍にした図である。
【図５】図３を縮尺４倍にした図である。
【図６】第２実施例の構成を示すブロック図である。
【図７】鍵の押鍵軌道（直線軌道）を示す図である。
【図８】数６で示される軌道を示す図である。
【図９】押鍵の後に発生した離鍵の軌道が交差する場合を示す図である。
【図１０】第３実施例で用いる放物線軌道を示す図である。
【図１１】第３実施例における押鍵開始時刻の算出を説明するための図である。
【図１２】第３実施例において、鍵駆動した場合の実験例を示す図である。
【図１３】図１２の一部を拡大した図である。
【図１４】ダンパーの離弦時刻推定方法を説明するための図である。
【図１５】ダンパー離弦時刻を再現した場合の放物線軌道を示す図である。
【図１６】第３実施例において加速度を固定した場合の実験結果を示す図である。
【図１７】図１６の一部を拡大した図である。
【図１８】第３実施例において初速度を固定した場合の実験結果を示す図である。
【図１９】図１８の一部を拡大した図である。
【図２０】一般的な自動ピアノの構成を示す概略図である。
【符号の説明】
５……ソレノイド（鍵駆動手段：サーボ駆動手段）、１０……再生前処理部（運動属性算出手段：軌道算出手段：弱音抽出手段）、１１……モーションコントローラ（鍵駆動手段：指令値出力手段）、１２……サーボコントローラ（鍵駆動手段：サーボ駆動手段）。

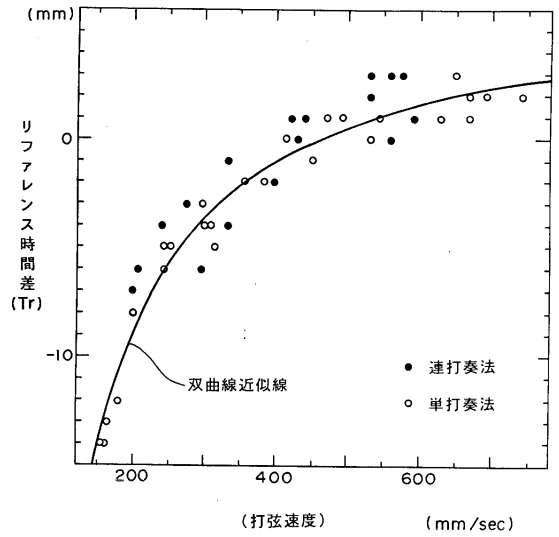
【図１】



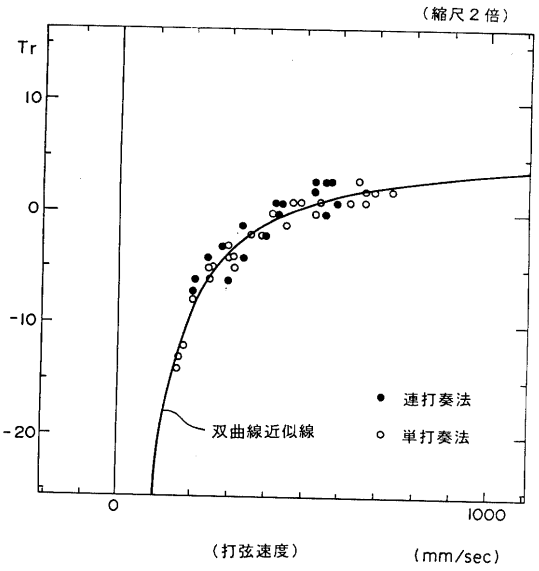
【図２】



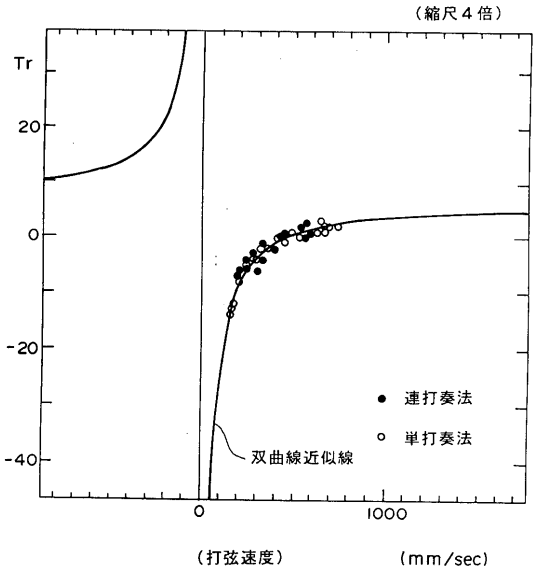
【図３】


(mm)
リファレンス時間差(Tr)
0
-10
200
400
600
双曲線近似線
● 連打奏法
○ 単打奏法
(打弦速度)
(mm/sec)

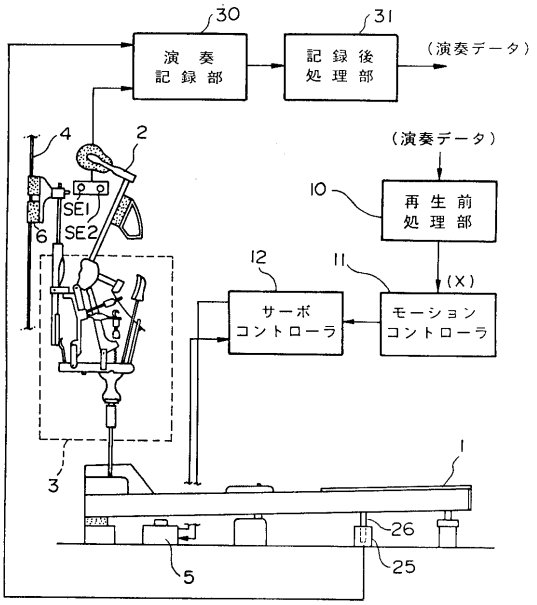
【図４】


(縮尺２倍)
Tr
10
0
-10
-20
0
1000
双曲線近似線
● 連打奏法
○ 単打奏法
(打弦速度)
(mm/sec)

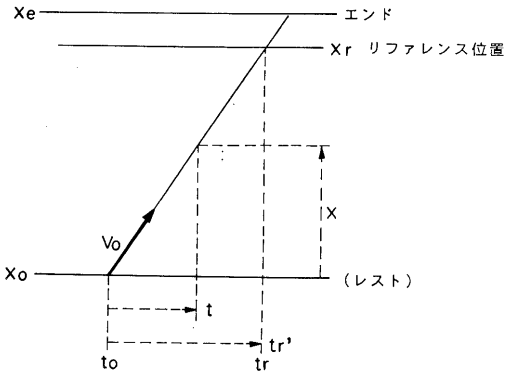
【図５】


(縮尺４倍)
Tr
20
0
-20
-40
0
1000
● 連打奏法
○ 単打奏法
双曲線近似線
(打弦速度)
(mm/sec)

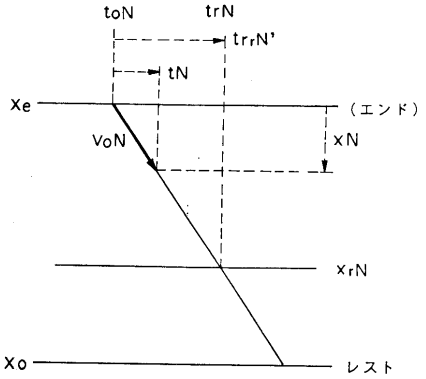
【図６】


30
演奏記録部
31
記録後処理部
(演奏データ)
(演奏データ)
10
再生前処理部
12
11
(X)
サーボコントローラ
モーションコントローラ
4
2
SE1
SE2
6
3
1
26
25
5

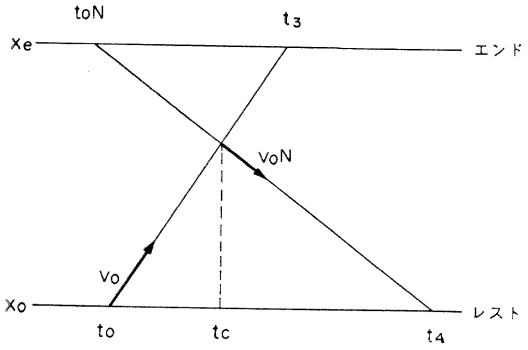
【図７】



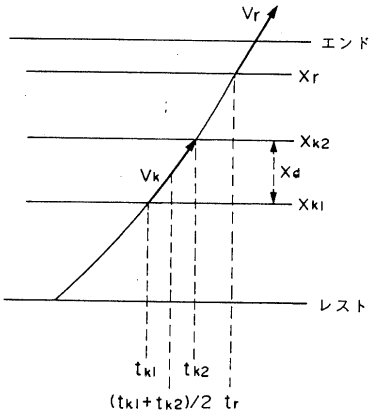
【図８】



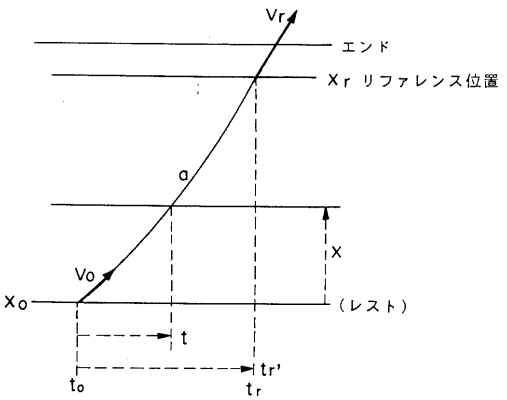
【図９】



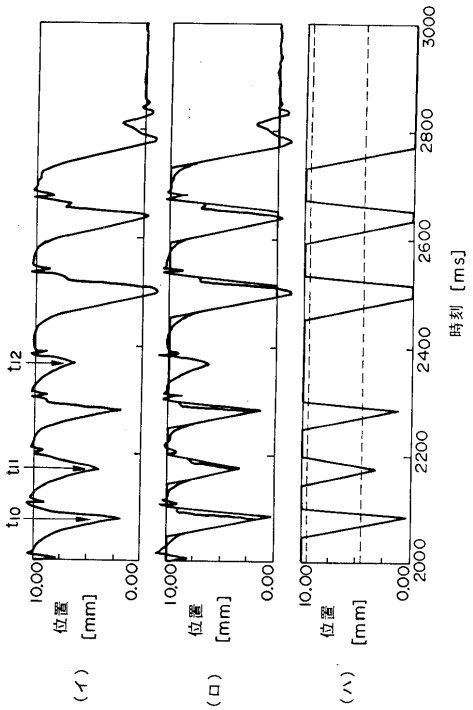
【図１０】



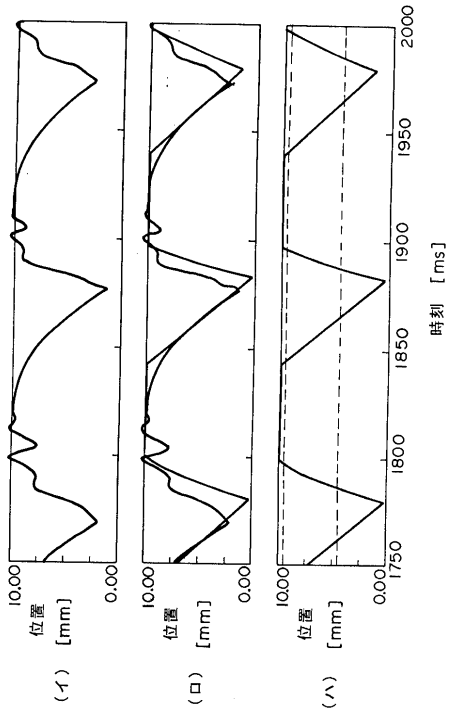
【図１１】



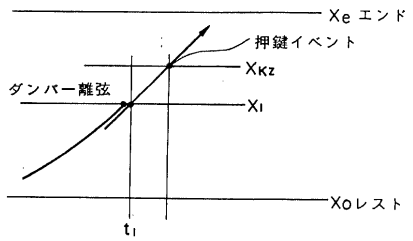
【図１２】



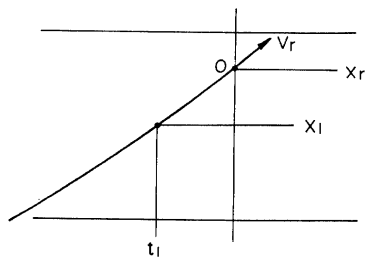
【図１３】



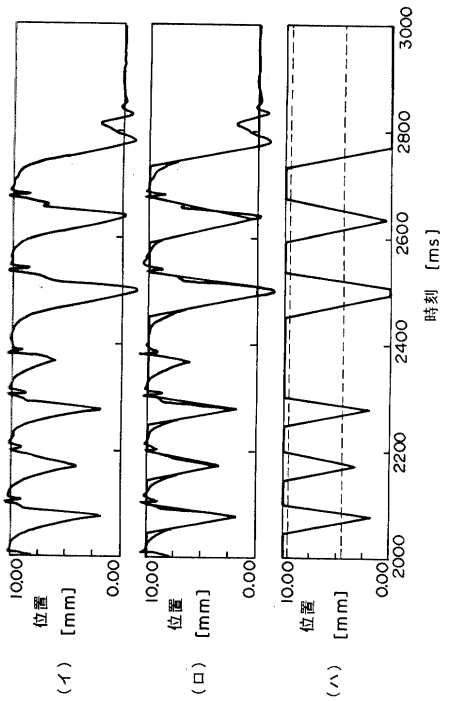
【図１４】



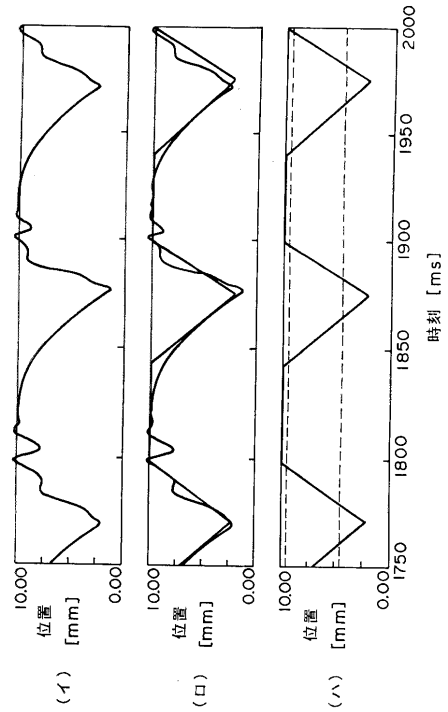
【図１５】



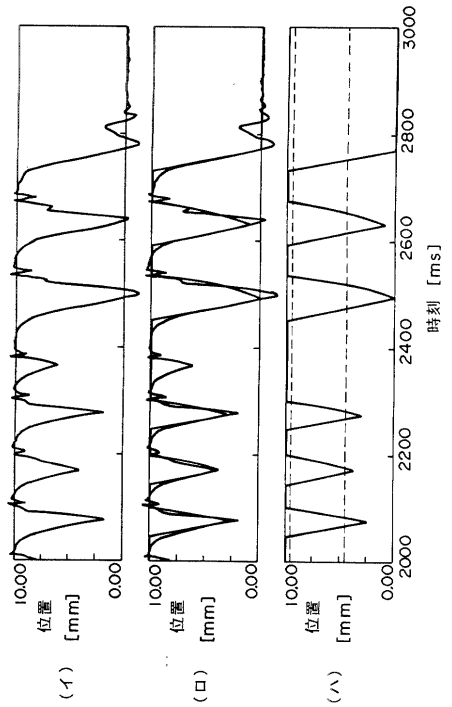
【図１６】



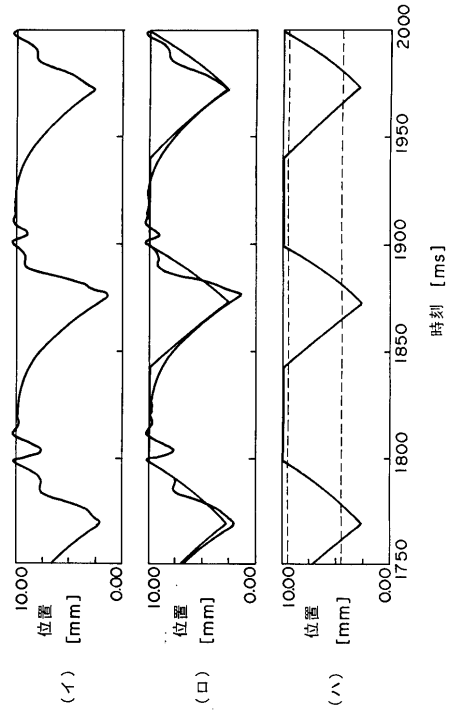
【図１７】



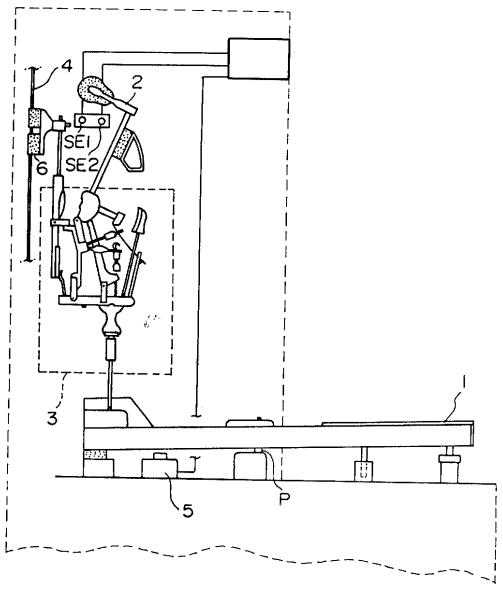
【図１８】



【図１９】



【図２０】



フロントページの続き

(72)発明者　大場　保彦
静岡県浜松市中沢町１０番１号　ヤマハ株式会社内
(72)発明者　村松　繁
静岡県浜松市中沢町１０番１号　ヤマハ株式会社内
(72)発明者　磯崎　善政
静岡県浜松市中沢町１０番１号　ヤマハ株式会社内
(72)発明者　石井　潤
静岡県浜松市中沢町１０番１号　ヤマハ株式会社内

審査官　小宮　慎司

(56)参考文献　特開平０１－２３９５９４（ＪＰ，Ａ）
特開平０５－３１３６５５（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.^{7}，ＤＢ名)
G10F　1/02