

## 打楽器を演奏するロボットの動作について

### Movement of the Robot playing a percussion instrument

○沼田亜紀子, 猪岡光

○Akiko Numata, Hikaru Inooka

東北大学

Tohoku University

キーワード: 鍵打ち動作 (hitting movement), 動作測定 (movement measurement), シミュレーション (simulation), 力制御 (torque control), 響く (good sound)

連絡先: 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字01 東北大学大学院 情報科学研究科 システム情報科学専攻  
知能ロボティクス学講座 知能制御システム学研究室

沼田亜紀子, Tel.: (022)217-7021, Fax.: (022)217-7019, E-mail: numata@control.is.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

近年, 様々な音楽ロボットの研究がなされている。1985年に筑波で開催された科学万博では, ロボットが電子オルガンを演奏するといった芸当をみせ, 話題になった。その後も鍵盤楽器に留まらず, フルートやサクソなどの木管楽器, トランペットやトロンボーンなどの金管楽器, バイオリンなどの弦楽器, あるいは尺八の自動演奏ロボットといったものまで作られており, その種類は多様である。

元来, ロボットのルーツはオートマタ (automata: 自動人形) と言われている。約2000年ほど前には, すでにアレクサンドリアで精巧な自動人形芝居が考案されていた<sup>1)</sup>。自動で動く人形は, ほとんど人の分身であり, 親近感を与える。歩く, 踊るのような人間に特有の動作を真似することで, よりいっそう人々に受け入れられ, 愛されてきた。楽器を演奏するといった行為も, 他の動物が真似で

きない高度に知的な操作であり, 楽器を演奏するオートマタは, 製作する側の技術者からみても, 観客の立場としても, 非常に興味深い対象であったと言える。

我々はある程度の練習を行えば, 楽器を演奏することができる。一音を出すだけならばもっと単純で, 鍵盤をたたいたり, 笛を吹いたり, バチで弾いたりすることで簡単に音を出すことができる。しかし, これらの動作をロボットに行わせるには, 繊細な力制御やセンサーフィードバックマニピュレーションなどが適切に行われなければならない。そうすることで初めて, 楽器演奏という動作が実現するのである。

そこで本研究では, 楽器を演奏するロボットの作成に向けて, 人の動作を測定し, その制御法をロボットに適応するにはどうすれば良いのかについて, シミュレーションと実験を通して考察を行った。楽器としては打楽器を選び, 鉄琴のようなも

のを想定している。

## 2. 計測

たたき方によって、音が濁ったり、鈍い音がしたりなど、必ずしも響きの良い音が出るとは限らない。そこで、まずはじめに、このような音質の違いはどのような原因によって起こるのかについて調べた。

### 2.1 鍵打ち動作

この先、打楽器をたたいて音を出す一連の動作を鍵打ち動作と呼ぶことにする。

計測に当たり、バチの重心付近に角速度センサを取り付けて鍵打ち動作を行った。最初、きれいに響くよう意識して弾き、次に音を止めるような動作を行い、力の入れ方にどのような違いがあるのかについて調べた。

そのときのバチの角速度を図に示す。なお、バチが対象物に接触した時刻がわかるよう、また、音の状態が確認できるよう、マクロフォンから得られた音の波形を同図に示す。

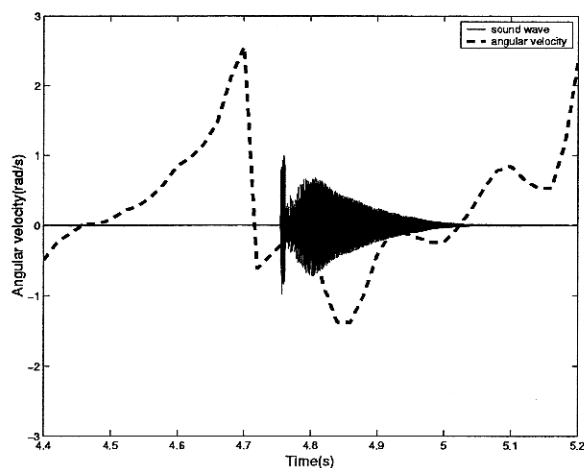


Fig. 1 バチの角速度と音波形(good sound)

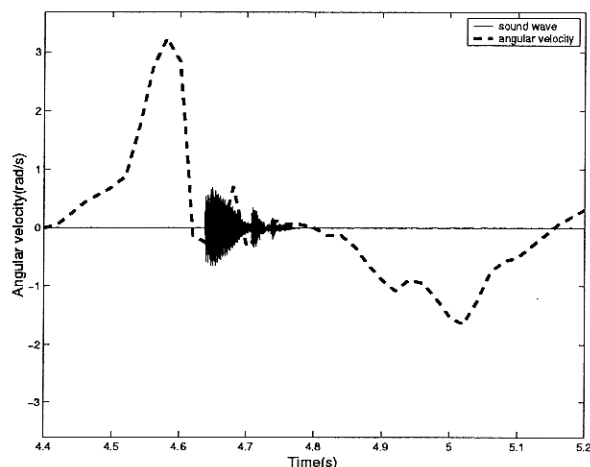


Fig. 2 バチの角速度と音波形(stop sound)

### 2.2 特徴

測定の結果、音が響くようにたたいた場合、正の角速度から負の角速度に移行する間に、角速度がゼロ付近へと戻る動きをみせていることが確認できた。Fig. 1にその一例を示す。4.7秒から4.85秒付近にかけて、速度の向きが入れ替わっていることがわかる。その途中で音が発生していることから、この間に対象物との衝突が行われているものと考えられる。また、もう少し具体的にみると、途中に角速度が小さくなっている時間帯があり、ちょうどこのときに音が発生しているのがわかる。

それに対し、音を響かせないように止めた場合、角速度ゼロ付近の状態が一時続く。これは意識的に止めた結果であるが、やはり途中で角速度が変化している部分がみられる。これは対象物から反力を受けているためと考えられるが、操作側が動かさないよう意識しているため、再び角速度ゼロの状態に戻り、そこで音も止まっている。

このことから、鍵打ち動作の特徴として、以下の点が挙げられる。

- 1) 音の発生時、角速度の挙動は変化する。
- 2) 対象物から強い反力を受け、止めようとしても多少の速度変化は避けられない。

最後に、両者の中間的動作として、跳ね返りをおさえての鍵打ち動作を行った。結果、音は響かず、すぐに途切れた。そのときの角速度の様子と音の波形をFig. 3に示す。

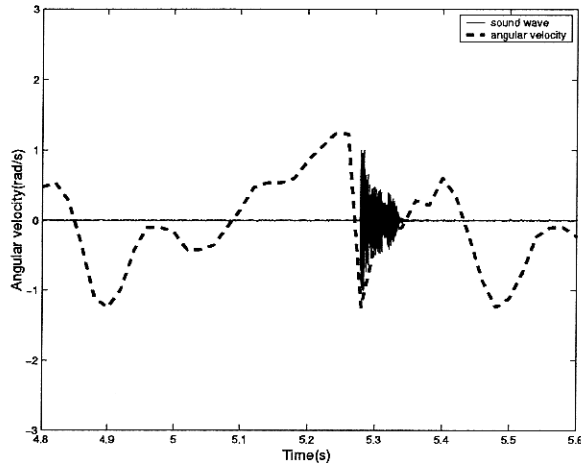


Fig. 3 バチの角速度と音波形(bad sound)

図より、角速度は直線的に減少し、その途中で音が発生しているのがわかる。また、その後角速度がゼロになったとき、音が途切れている。

### 2.3 考察

そもそも鍵打ち動作とは、対象物を振動させ、その振動を空気に伝えて音を出すという作業である。よって響きの良い音は、上手く対象物を振動をさせることで出すことができると思われる。ではいったい、人はそのためにどのような力制御を行っているのだろうか。それについて調べるため、得られたデータから角加速度を求め、トルクの様子を調べた (Fig. 4, 5, 6)。

結果を、音が響いた場合 (Fig. 4)、響かなかった場合 (Fig. 5, Fig. 6) の二つにわけて考えると、次のような違いがみられる。

- 1) 音発生時の角加速度が正の領域にあるか負の領域にあるか
- 2) 衝突により角速度の向きが逆になる過程で、角加速度の正負が何回変わるか

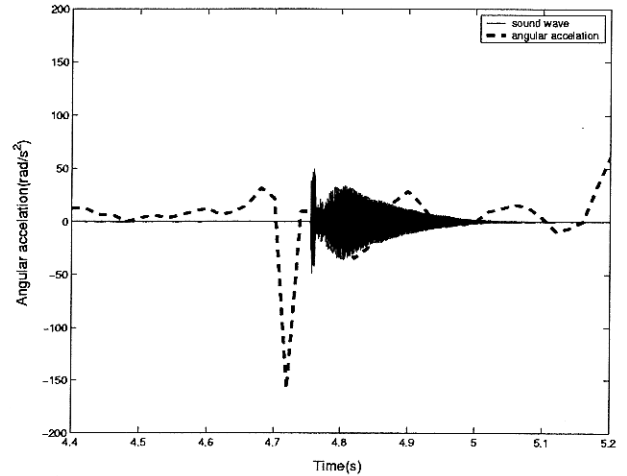


Fig. 4 バチの角加速度と音波形(good sound)

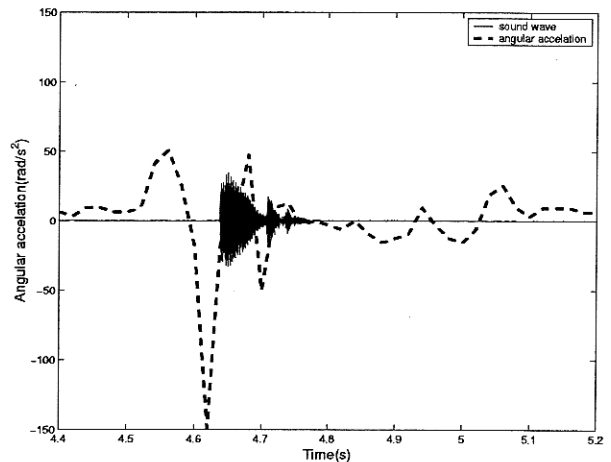


Fig. 5 バチの角加速度と音波形(stop sound)

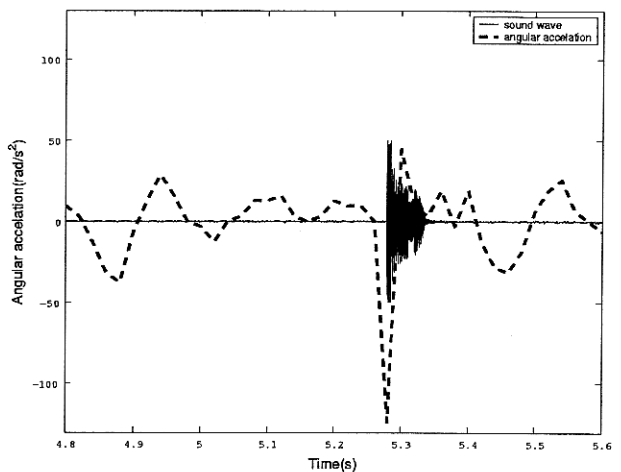


Fig. 6 バチの角加速度と音波形(bad sound)

それぞれ理由について考えてみると、前者はFig. 1からわかるように、音が響く場合、接触時に角速度の様子が変化するためと思われる。角加速度は正であり、このとき音が鳴っていることから、人は音を出すために瞬時的なトルクをかけ、同時に反力を受けることで、すみやかなエネルギーの交換を行っているものと考えられる。

後者については図を例にとって説明する。音が響いた場合の接触時間はFig. 1から4.7-4.8秒と読み取れ、そのとき角加速度はどのように変化しているかをFig. 4で確認すると、最初に負の領域にあり、正の領域へと移り、再び負の領域に戻ってきている。よってこの間、3つの領域をまたいでおり、その中間である正の領域で音が発生している。それに対し音が響かなかった場合、Fig. 3から接触時間が5.25-5.28秒程度と読み取れるが、その間角加速度はずっと負のままで変化はみられない。

また、響かない例としてFig. 7のような場合もある。

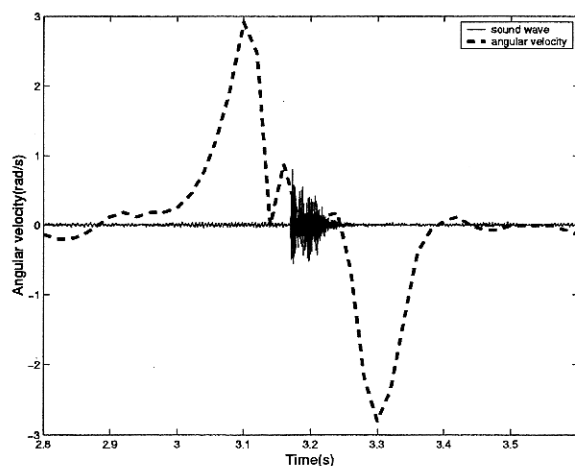


Fig. 7 バチの角加速度と音波形(bad sound)

一見、Fig. 1と傾向が似ているように思われるが、途中の角速度変化が乱れていて結果的に3.2秒過ぎで音が止まっている。角速度がゼロ付近で一定であり、振動を押さえて止めてしまったものと思われる。この様子を角加速度の点からみるとFig. 8のようになる。

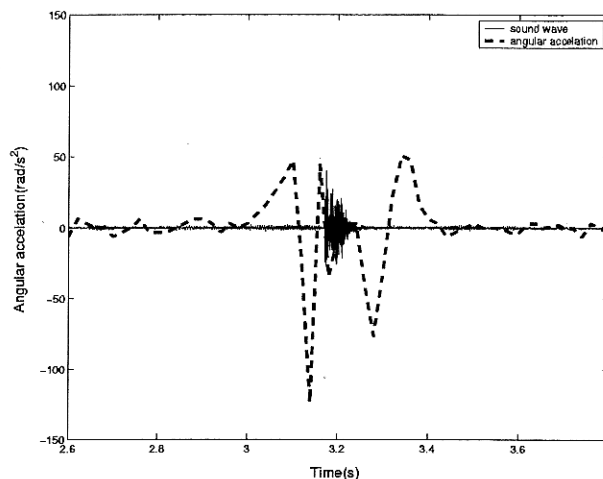


Fig. 8 バチの角加速度と音波形(bad sound)

接触していると思われる3.1-3.3秒間において、角加速度は何度も正負を変えている。その過程で音が発生しているが、同時にその過程で消えている。

以上から、音を響かせる場合には、対象物との接触中に一度だけ正の向きにトルクを与えることが必要であると考えられる。結果的に角加速度は負⇒正⇒負と移り変わり、その中間の正の状態が音が発生する傾向にある。

### 3. シミュレーション

計測から得られた見解が物理的にも正しいかどうかを確認するため、鍵打ち動作の運動方程式を作成し、シミュレーションを行った。

#### 3.1 モデル

Fig. 9のような1リンク系を想定し、回転関節にモーメント $M$ を与えるものとする。

また、対象物との接触( $\theta \geq \theta_{lim}$ )の場合には、Hertzの接触理論に基づいた反発力を受けるものとする<sup>2,3)</sup>、運動方程式は以下のように求まる。

$$I\ddot{\theta} = M - fl\cos\theta \quad (1)$$

ただし、ここで $f$ は反発力を表し、

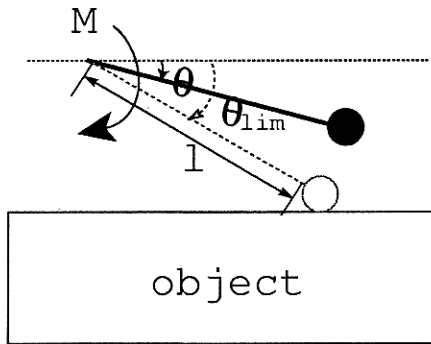


Fig. 9 鍵打ち動作のモデル

$$f = \begin{cases} (1 + p \cos \theta) H (l \sin \theta - l \sin \theta_{lim})^{3/2} & \text{if } \sin \theta - \sin \theta_{lim} \geq 0 \\ 0 & \text{if } \sin \theta - \sin \theta_{lim} < 0 \end{cases}$$

と与えられる。\$I\$はバチの慣性モーメント、\$p, H\$はそれぞれ、衝突のエネルギー損失を表すパラメータ、物体の材質と形状によって求まる値である。

### 3.2 パラメータ

シミュレーションを行うに当たり、パラメータを決定する必要がある。\$H\$の値により、接触後の角加速度はFig. 10のように変化する。

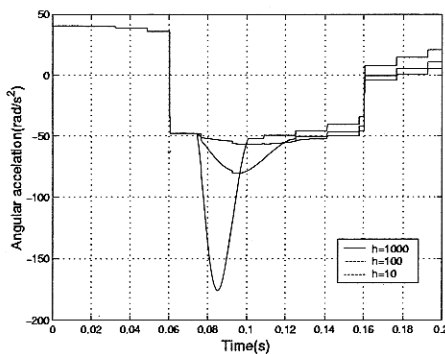


Fig. 10 \$H\$を変化させたときのバチの角加速度

計測結果より、接触時における角加速度の傾きは\$-1350(\text{rad}/\text{s}^2)/\text{s}\$程度であったため、それをふまえて今回は\$H = 200\$とした。

### 3.3 条件

計測結果を参考に、以下の条件でシミュレーションを行った。

- 1) 接触時における角加速度（トルク）の正負を変化させる
- 2) エネルギー損失パラメータ\$p\$を変化させる

なお、用いたのはルンゲクッタ法であり、ステップ間隔は\$0.0002\$秒とした。

### 3.4 結果

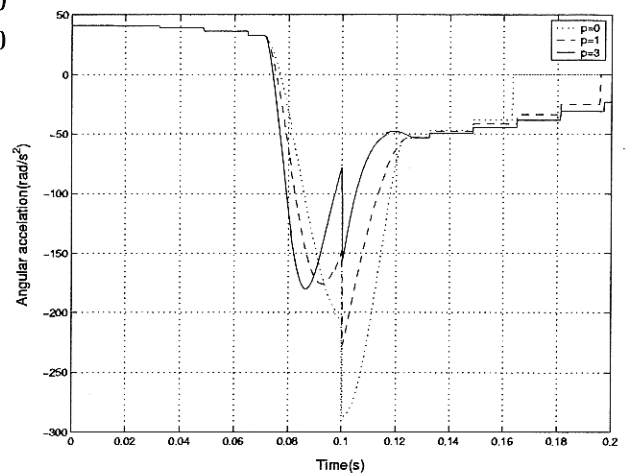


Fig. 11 正の角加速度で接触した場合（シミュレーション）

対象物とぶつかる瞬間の角加速度が正のとき (Fig. 11) と、負のとき (Fig. 12) を想定し、それぞれエネルギー損失パラメータを\$p = 0, 1, 3\$と変化した。

Fig. 11とFig. 12を比較してみると、明らかに挙動が異なる。Fig. 11では一旦正の向きに動いた後、再びより大きな反力を受けているのに対し、Fig. 12では単純に反力を受けて跳ね返っている。これを計測結果と照らし合わせてみると、角加速度正で接触したときの方が音が響きやすいと考えられ、角速度の挙動が変化している場所で音が発生するものと思われる。

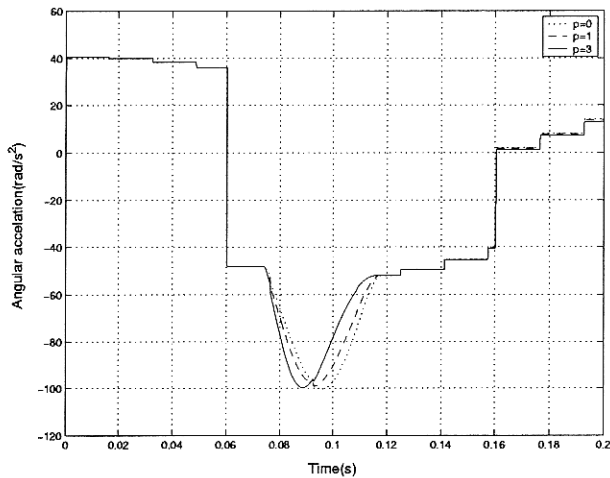


Fig. 12 負の角加速度で接触した場合（シミュレーション）

また、Fig. 12ではエネルギー損失の値によってそれほど大きな変化はみられないが、Fig. 11ではエネルギー損失が小さいほど大きな反力を受けていることがわかる。Fig. 4との比較より、人は音が鳴った直後にある程度のトルクをかけて跳ね返りを抑えているようである。

## 4. 実験

シミュレーションで得られた結果が実際の動きにも当てはまるかどうかを確認するため、簡易モーターを用いて実験を行った。

### 4.1 条件

以下の道具を用いて実験を行った。

- ラジコン用サーボモーター（Futaba製）
- 対象物とする打楽器（音階パイプをナイロン線で張ったもの）
- バチ（木製）

モーター内部の可変抵抗から、角度に相当する電圧を取得し、鍵打ち動作の様子を確認した。シ

ミュレーションと同様、ぶつかる際の角加速度の向きを変えて行った。

### 4.2 結果

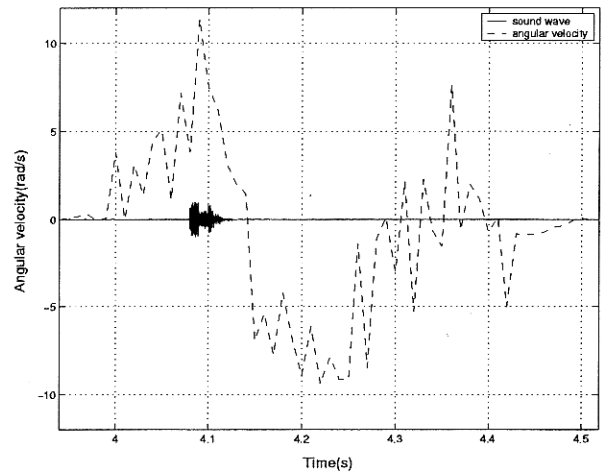


Fig. 13 正の角加速度で接触した場合（実験）

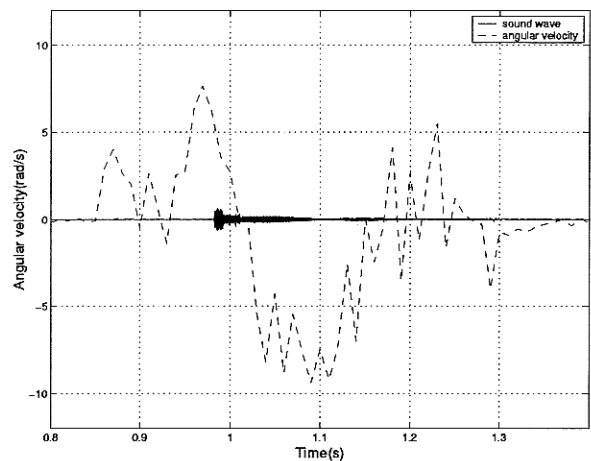


Fig. 14 負の角加速度で接触した場合（実験）

Fig. 13, 14は、得られた角速度のデータを音の波形と一緒にグラフ化したものである。Fig. 13では音が鳴った後も挙動に目立った変化はなく、角速度が大きくなっているのに対し、Fig. 14では音が鳴った後、わずかではあるが傾きに変化がみられる。これは、反発力を受けた結果、トルクのかかり方が変化した為と思われる。また、実際に鳴った音も、Fig. 13の方は鈍い音がただで響きは

なく、それに対しFig. 14の方では響きのある音が出た。

### 4.3 考察

今回の実験では、対象物との接触時に、トルクの向きによってどのように挙動が変化するかを確認した。

結果として、トルクが正の向きにかけられている場合に音は響かないという、計測とは逆の結果になったが、角速度は音が発生した後も大きくなっており、振動を押さえつけているために当然の結果と思われる。

一方、トルクが負の向きにかけられている場合には、ある程度音が響いた。Fig. 14は計測で得られたグラフと角速度の変化の様子が似ており、音の発生時に傾きがわずかに変化しているのが確認できる。つまり実際には角加速度が正の向きへと増加している状態で音が鳴っており、これまでに得られた見解と一致する。また、このことから、自動的に鍵打ち動作を行わせる場合には、接触時における角速度は負であるのが望ましいといえるだろう。

## 5. おわりに

鍵打ち動作について、計測、シミュレーション、実験を行い、どのようなときに音が響くのかについて考察を行った。その結果、負の角加速度で対象物と接触させ、跳ね返りの途中でトルクの状態が変化する場合に音が響く傾向にあることがわかった。

今後は、鍵打ち動作の全体を模擬するようなシミュレーション・モデルを構築し、それに基づいた制御法でハードウェアを動かす予定である。また、今回のような単独動作では曲として演奏することができないため、連続した鍵打ち動作のモデルへと拡張していきたい。

## 参考文献

- 1) 梶谷 誠:音楽ロボット, 日本ロボット学会誌, 14-2, 156/159 (1996)
- 2) 藤田 隆史, 服部 忍: 周期衝突振動における衝撃特性, 日本機械学会論文集, 45-395, 737/746 (1979)
- 3) 池浦 良淳, 藤井 祥央, 猪岡 光: 手腕系の衝撃吸収特性, 日本機械学会論文集, 60-580, 117/123 (1994)