産業用ヒューマノイドロボットによる打撃音フィードバックを用いた
ミュージカルソーのチューニング制御の考察廣垣 俊樹^{*1}, 青山 栄一^{*1}, 福家 祐輔^{*2}, 三島 明^{*1}, 三浦 諄之^{*3}

Investigation of tuning control for musical saw based on hit sound feedback motion with an industrial humanoid robot

Toshiki HIROGAKI^{*1}, Eiichi AOYAMA^{*1},
Yusuke FUKU^{*2}, Akira MISHIMA^{*1} and Atsuyuki MIURA^{*3}^{*1} Department of Mechanical Engineering, Doshisha University
1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan^{*2,*3} Graduate Student, Doshisha University

1-3 Miyakodani, Tatara, Kyotanabe-shi, Kyoto 610-0321, Japan

Received: 19 August 2020; Revised: 29 December 2020; Accepted: 6 May 2021

Abstract

We attempt to construct a novel automation technology based on the hammering task and its sound feedback process with an industrial humanoid robot equipped with an integrated system of vision, sound and dual arm motion. First, we focus on a musical saw to achieve a tuning motion as its basic study because it is considered to be difficult to control a kind of unknown and unclear tool under beginning operation. Second, we discuss its characteristics to develop the tuning motion based on dual arm motion and sound feedback system. Third, we attempt to cooperate on hammering task by right arm and bending task by left arm for the musical saw with estimating its hit sound. As a result, it can be seen that the proposed system using an industrial humanoid robot makes it feasible to achieve sufficient tuning motion for the musical saw such as unknown and unclear tool. Therefore it is demonstrated that the proposed approach is found to be useful to construct the automation technology based on the hammering task and its sound feedback process with an industrial humanoid robot.

Keywords : Factory automation, Industrial humanoid robot, Hammering task, Sound feedback motion, Manufacturing system

1. 緒 言

これまでに産業用ロボットは生産性や品質の向上, コスト低減に大きく貢献してきた. 産業用ロボットのプログラムはティーチング・プレイバック方式が一般的に採用されており, これによりシステムを構築して, 専門特化型の作業を実現させてきた. しかしながら, ティーチング・プレイバック方式は事前にロボットの行動を詳細に決めなければならず, ティーチングに時間と労力を要するためマルチタスクな作業への導入に不向と考えられている. その一方で, 2013 年末に労働安全衛生規則が緩和され, 協働運転要求事項を満たすロボットについて安全柵なしでの運用が可能となった. そこで工場現場における人手不足の解消や働き方改革に対応するため, 人とロボットが協調して作業を行う協働ロボットの導入(榊原, 2017)が進められつつある. そのため, ティーチング・プレイバック方式からリアルタイム制御によるマルチタスクで可変性のあるシステムへの移行が求められてきている. その中で従来の画像情報の認識に加えて, 機械学習を導入したリアルタイムな音の認識に関する報告例(岡他, 2020)も増える現状から, 音の認識に基づくリアルタイム制御の特性を有する双腕産業用ヒューマノイドロ

No.20-00293 [DOI:10.1299/transjsme.20-00293], J-STAGE Advance Publication date : 14 May, 2021

^{*1} 正員, 同志社大学理工学部 (〒610-0321 京都府京田辺市多々羅都谷 1-3)^{*2} 同志社大学大学院^{*3} 学生員, 同志社大学大学院

E-mail of corresponding author: thirogak@mail.doshisha.ac.jp

ボットの研究開発のニーズも増大する可能性が高くなってきている。

一般にヒューマノイドロボットは、人の作業環境がそのまま使える、人の使う道具がそのまま使える、人の形をしていることそのものに意味がある（梶田他，2014），などが特徴とされ、工場の作業現場での人との協働作業に親和性が高いものと考えられる．そこで著者らは、産業用ヒューマノイドロボットの音認識機能と双腕協調動作に着目して、片腕でペットボトルから水をガラス円筒容器に注ぎ、他腕でその容器の側面を連続的に打撃動作を与えることで打撃音を発生し、その打撃音の変化で容器内の水量を推定して、規定の水量を容器に供給する打撃音フィードバックシステムを開発した（廣垣他，2017）．その結果、従来の画像処理のようなパッシブな認識ではなく、対象物に積極的に打撃を加えて情報を取得するアクティブ認識と双腕協調の動作により、ガラス円筒容器のように比較的単純で扱いが容易な対象・道具に対しては高度な作業を具現化できることを示した．しかしながら大変形で柔軟性を有して扱いが難しいような対象・道具に対しての有効性は不明であった．一方で自動車工場での自動化技術の開発から、労働力不足や高齢者介護の負担などの課題に対してロボットが作業や生活に入りこみ、製造だけでなくアシスタント、福祉、などの分野でも役立てる新しい技術の開発が進められてきている．その中で、人の使う道具をロボットが使えるようにするための基礎として楽器の演奏の動作が代表例のひとつとされている（高木，2006）．楽器の演奏では、各楽器の特性を解析してそれぞれを専門ロボット・専用機で自動演奏して芸術的なレベルを目指す検討（Maes et al., 2011）と、汎用的なロボットやマニピュレータで汎用的な様々な楽器を対象に発音させる制御技術の高度化を目指す検討（Bretan and Weinberg, 2016）に大別されるが、後者が主に上述に対する基礎として重要と考えられる．

そこで本報では、様々な楽器の中でも大変形の柔軟性を有して扱いが難しい対象・道具としてミュージカルソーに着目して、開発した打撃動作に基づくアクティブ認識と双腕協調の動作の適用を試み、その有効性について検討する．主に発音させる目的での汎用的なロボットによる打撃動作と楽器の演奏としては、ドラムを扱った研究（Schaal et al., 2011），さらに木琴の演奏に関する例（Bretan and Weinberg, 2016）など数例の報告があるが、楽器が大変形して扱いが高度な対象ではなかった．さらに打撃音フィードバックに基づく制御を扱ったものでもなかった．それに対してミュージカルソーは西洋のこぎりを使用した楽器で、のこぎりの柄を固定して、先端を手で把持して力を加えて大変形の屈曲をさせながらマレットで打撃する、または端を弓で擦ることで発音する楽器である．楽器の中でもミュージカルソーを扱った研究は極めて少なく発音メカニズムの解明が試みられた程度である（金子他，2010）ため、扱いの難しい未知の対象・道具の一つと考えられる．そこで作業現場での未知の対象・道具をリアルタイム制御で扱う場合を想定して、着目した対象物に積極的に打撃を加えて情報を取得するアクティブ認識との双腕協調の動作の手法の適用を試みた．その結果、打撃音フィードバックシステムにより十分な精度でミュージカルソーの発音制御が可能であり、人と同等の道具の操りチューニング動作が可能であることが判明したので結果を報告する．

2. 対象とした産業用ヒューマノイドロボット

図 1(a)に示したカワダロボティクス社製の産業用ヒューマノイドロボット Hiro（以下 Hiro と称する）を先行研

Fig. 1 Used humanoid robot.

究(廣垣他, 2017)と同様に使用した. 頭部にはステレオカメラおよびステレオマイクを取り付けてあり, 視覚・聴覚からのマルチモーダル制御を可能としている. さらに胸部にはスピーカが内蔵され, 人とのコミュニケーションも可能である. 各関節・リンク, 座標, 回転方向等の定義を図 1(b)に示す. 制御軸数は, 本体 15 DOF, ハンド部 8 DOF (片手 4 DOF) の計 23 DOF である. また動作は PTP (Point to Point) 制御であり, 速度制御は台形加減速である.

3. 弾性ばちを用いた打撃動作

一般に, ヒトがマレットで楽器などの打撃動作を遂行する場合には手首のスナップ運動と呼ばれる俊敏な反転運動が重要とされている. そのため運動方向の急激な反転が不可欠となるが, ロボットが苦手な運動である. そこでヒトが作業に応じた道具を用いるように, ロボットにも制御上の特徴とその動作に応じた適切な道具を用いることで打撃動作を達成する手法を先行研究(廣垣他, 2017)で検討した. すなわち打撃音に基づくアクティブ認識のための打撃動作として, 図 2 に示すゴム製弾性ばちと図 3 に示すインプットシェーピング制御の組み合わせ手法を提案している. 弾性ばちの主要諸元を表 1 に示す. 図 1(a)は両腕に弾性ばちを保持した状況を示している. ロボットアームの先端に, アーム長さに比べて短い弾性ばちを保持(打撃側が木製で球状先端)して打撃動作を遂行する. すなわち図 3 のように, ばちを(1)水平の釣り合い位置に保持し, (2)図 1 中の肩関節(RSP or LSP)を y_r 軸回りに CCW 回転させてばちの球状先端をばちの曲げ 1/4 固有周期に近い時間で引き上げ, (3)その直後に肩関節を逆転の CW 回転で同様に 1/4 固有周期に近い時間で戻す(固有周期に近い半正弦波の入力)と, (4)曲げ共振したばち先端は水平の釣り合い位置を超え大きく下降して最下点付近で打撃動作を行う. ただしゴムは高い減衰性を有するため(5)打撃後に再び上昇した先端は釣り合い位置を少し超えた付近までしか上昇することなく, (6)次の周期の振動は小さな振幅となり打撃に関与しないようにインプットシェーピングで調整して, ヒトが手首でマレットを扱うスナップ運動と同等かつ安定した打撃動作を具現化している.

Fig. 2 Flexible rubber sticks.

Table 1 Dimensions of elastic drumstick.

Length L [mm]	225
Holding length l [mm]	18
Breadth of a rubber stick b [mm]	10
Height of a rubber stick h [mm]	10
Equivalent mass m [10^{-3} kg]	35.6
Spring constant k [N/m]	14.2
Damping coefficient c [10^{-3} Ns/m]	0.149
Natural cycle T_n [s]	0.315
Natural angular frequency ω_n [1/s]	20.0

Fig. 3 Vibration of a flexible rubber stick.

4. ミュージカルソーの振動特性の評価と考察

4・1 ミュージカルソーの先端の支持方法

図 4(a)に示すミュージカルソー (MUSSEHL & WESTPHAL 製 Tenor) を用いた. のこぎり部分の厚さは 1 mm である. ミュージカルソーは西洋ののこぎりを使用した楽器で, のこぎりの柄を太ももで挟みのこぎりの先端を右手で保持し, 力を加えて S 字等に屈曲させその間の適切な箇所を左手のマレットで叩く, または端を弓で擦る

ことで発音する楽器である。演奏者が S 字の曲率等を調節することで楽音の音階を変化させることができる（金子他，2010）。本報ではミュージカルソーの柄を台に水平に固定し、ロボット右手で打撃動作を行い、のこぎりの先端を保持した左手を図 1 中 z , y 軸に対し負方向へ動かしていくことでミュージカルソーの曲率を変化させ

(a) Overview of musical saw

(b) playing a musical saw

Fig.4 Musical saw.

(a) One point fixing jig

(b) Two point fixing Jig.

Fig.5 Fixing jig at tip of musical saw for playing.

Fig.6 The posture of the humanoid robot.

た. ミュージカルソーを演奏する場合, 演奏者は図 4(b)に示すように親指でのこぎりの先端付近のやや柄側を上面から押し当て, さらに人差し指で先端付近を下面から支え, のこぎり部分の曲げによる先端と S 字の曲率を調整し音階を変える. これを再現するためにロボットの左手先に図 5(a)のようにローラーの 1 点で支える治具を取り付け, ミュージカルソーの先端を単純に上から図中 P_1 の荷重で支持点を上面から押さえつけ曲げの曲率を制御する方法と, 図 5(b)のように位置の異なる上下二つのローラーの 2 点で支える治具を取り付け, ミュージカルソーの先端付近の 2 点を挟み込む図中 P_1 と P_2 の荷重〔図 4(b)中の親指と人差し指の役割〕で両支持点の上下方向に押さえることで曲げと S 字の曲率半径を再現する方法を考えた. それぞれ 1 点支持法, 2 点支持法と称する. また治具を取り付けたときのロボットの姿勢の例を図 6 に示す.

4・2 クラドニ図形を用いたミュージカルソーの振動モードの推定

ミュージカルソーのモード形状を調べるために, 市販の食塩の粒(図 7(a))をミュージカルソー上に図 7(b)のように振りまき, のこぎりの側面を弓でこすることによって自励振動を起こすと粒は振動によって移動し, 振動の節に集まる性質を利用し, 節の位置とその模様(クラドニ図形)を観測した. 1 点支持法, 2 点支持法それぞれに支持荷重 P_1, P_2 の方向を鉛直(支持部の 2 点を水平)に維持しながら, 釣り合い位置から鉛直方向に支持部に変位 $v_l = 100, 110, 120$ mm (粒が自由落下しない限界値)を与えたときのクラドニ図形を図 8(a)(b)に示す. ただし変位 v_l は短辺端部(図 5 中の b 部)から長手方向に 50mm 内側(図 5 中の $-y_m$ 方向)位置で定義する. 図 8(a)(b)より, ミュージカルソーには格子状のモードが現れることがわかる. 一般に短形板の振動では同様に格子状のクラドニ図形が現れることが知られている(N.H.フレッチャー他, 2012). 図 9 のように長辺方向の節の数(振動の端は除く)

(a) Salt particles

(b) Musical saw before vibration

Fig.7 Setup for Chladni figure test.

(a) One point fixed

(b) Two point fixed

Fig.8 Chladni figures.

Fig.9 Definition of mode (m,n) .

が m , 短辺方向の節の数 (振動の端は除く) が n のときの振動モード (m,n) とされる. またミュージカルソーの発音の振動はどちらの端にも節が届くことはない (フレッチャー他, 2012) とされており, 端からの減衰の起こらない閉じ込めモードが主体と考えられている. したがって本ミュージカルソーもモードは $(2,0)$ が演奏の主モードとなるものと考えられる. また 1 点支持法と 2 点支持法で変化する周波数範囲を比較すると前者の方が広く, その一方で閉じ込め $(2,0)$ モードが柄に近い位置で生じていることもわかる.

4・3 有限要素解析を用いたミュージカルソーの振動解析

そこで有限要素解析を用いて $(2,0)$ モードに相当するモード形状とその周波数について検討する. 解析ソフトには株式会社エヌ・エス・ティ製の Femap を用いた. ミュージカルソーは図 10(a)に示すように単純な台形型と近似し, 1 点支持法は図 11(a), 2 点支持法は図 11(b)に示すような支持点に強制変位を与える条件で解析した. ここでは材質は SS400 鋼とした. また図 10(b)に示すような同じ長さ・板厚で同表面積である長方形型のモデルも作成して同様の条件で比較した.

1 点支持法で支点到 $v_l=100, 150, 200$ mm の変位を与えた際の固有振動モード (以後, 図中モードの等高線は赤紫色部が節部で, 青から緑・黄・赤色部が腹部でその順に面外方向の相対的な振幅が大きいことを示す) を図 12(a)に, 2 点支持法で $v_l=100, 150, 200, 250$ mm の変位 (ただし 2 点間の水平を維持) を与えた際の固有振動モードを図 12(b)に示す. 図 12(a)より, $v_l=200$ mm では $(2,0)$ モードが現れず, $(2,1)$ モードが現れ, $v_l=250$ mm では $(2,0)$, $(2,1)$ モードが現れず, $(2,2)$ モードが現れることがわかった. このことから, 1 点支持法ではたわみ v_l が大きくなるにつれ, 周波数が大きく変化すると共に高次のモードへと推移していくことがわかる. その場合は両モードの複数の周波数の混在が予想され, 純音を維持することが難しくなることがわかる. 図 12(b)より, 2 点支持法では $v_l=200, 250$ mm でも $(2,0)$ モードを保っており, 振動の腹が先端へと移動し閉じ込め $(2,0)$ モードの長辺が短くなることがわかる. したがって, 周波数の変化が小さいものの $(2,0)$ モードが変化をしないため, 純音の維持に有効な支持法であることがわかる.

次に長方形型のモデルで同様に 1 点支持法で先端に $v_l=100, 150, 200$ mm の変位を与えた際の固有振動モードを図 13(a)に, 2 点支持法で $v_l=100, 150, 200, 250$ mm の変位を与えた際の固有振動モードを図 13(b)に示す. 図 13(a)よ

Fig.10 Model of musical saw.

Fig.11 Fixed condition for model.

Fig.12 (2,0) mode in one point fixed in trapezoidal model (Antinode areas are green, yellow and red) .

り, $v_l = 50, 250\text{mm}$ では閉じ込めモードの長辺に沿って短辺方向に大きく波打つ(2,0)モードが現れ不安定であり, さらに閉じ込め(2,0)モードの長辺が顕著に短くなる傾向がわかる. また図 13(b)より, 2 点支持法では $v_l = 200, 250\text{mm}$ でも(2,0)モードを維持しており, モードの長辺の長さが短くなるが, 西洋のこぎりである台形型と異なり, モードの中心位置は移動しないことがわかる. また, このときの変位と固有振動数の関係(解析値)を図 14 に示す. 図 14 より, 台形型において 1 点支持法では周波数の変化幅が大きい線形的な関係, 2 点支持法では周波数の上昇が収束する曲線的な関係を示すことがわかる. 台形型の 1 点支持法では音階 C#5(554.365 Hz)~E6(1318.510 Hz), 2 点支持法では音階 D#5(622.254 Hz)~A5(880 Hz)まで含まれ, 長方形型については, 1 点支持法では音階 F#5(739.989 Hz)~G#5(830.609 Hz), 2 点支持法では音階 G5(783.991 Hz)~A5(880 Hz)までが含まれることがわかる. これより長方形型は台形型に比べて得られる音階が非常に少なく, ミュージカルソーとして台形型の西洋のこぎりが用いられるのは, 屈曲による周波数の変化幅が長方形型に比べ大きく, かつ 1 点支持法でも比較的安定した(2,0)の主モードを維持できるためと考えられる.

4・4 ヒューマノイドロボットで屈曲させた際のミュージカルソーの周波数特性と安定した純音の維持

実際のミュージカルソーに対して 4.2 節の変位 v_l を大きく変化させた時, 1 点支持法, 2 点支持法における主モードの固有振動数の関係(実測値)を図 15 に示す. 図 15 より, 前節のモデルによる図 14 の解析結果と同様に, 1 点支持では線形的, 2 点支持では周波数の上昇が収束する曲線的な関係となることがわかる. 1 点支持法では音階 D#5(622.254 Hz)~A5(880 Hz), 2 点支持法では音階 C#5(554.365 Hz)~F#5(739.989 Hz)までを確認することができた. これより, 1 点支持法はより高い周波数音域を, 2 点支持法はより低い周波数音域を発生させることができることがわかる. ただし 1 点支持法では高い周波数で主モードが変化して純音性が下がる傾向にあった.

そこで主モードによる純音を安定して維持しながら広い周波数音域を確保するためには、これら二つの支持法を組み合わせることが必要と考えられる。よってロボットの姿勢を図 16 のように変更し、 y_m, z_m 方向の変位の他に、 x_m 軸まわりの手首回転も含めた先端の制御方法を考えた。この先端の制御法では図 17 のように 自重でのたわみ以上の v_l を与えた場合、 x_m 負(CW)方向へ回転させると片方の支点が外れ、1 点固定法へと変化する。自重のたわみ以下の v_l を与えた場合に関しては 1 点支持と 2 点支持の連続性が崩れ、現象が複雑化するためここでは考慮しな

Fig.13 (2,0) mode in one point fixed in rectangle model (Antinode areas are green, yellow and red).

Fig.14 Relationship between frequency and deflection (calculated value).

Fig.15 Relationship between frequency and deflection (measured value).

Fig.16 the Combination fixed method.

Fig.17 One point fixed in rotating.

いこととする。したがって先端から 80mm 内側での自重のたわみは約 50 mm のため、本報では $v_l = 60 \sim 200$ mm (左手の移動の限界)を検討の対象とした $v_l = 60, 100, 200$ mm についてそれぞれ x_l まわりの回転角 $\theta = -35 \sim 35^\circ$ まで動かした時の主モードの周波数の変化を図 18, 図 19, 図 20 に示す。また明らかに主モードの純音から外れる発音が生じた場合は対象外とした。図 18 では $\theta = 10^\circ$, 図 19 では $\theta = -10^\circ$, 図 20 では $\theta = -25^\circ$ で 2 点から 1 点支持に変化した。さらに図 19 はその変化時の不連続性が顕著であった。したがってミュージカルソーは発音の周波数が広い 1 点支持法を基本として先端のたわみ (位置) を変化させる一方で、閉じ込め(2,0)モードを維持して純音の安定性を高めるため、先端のたわみ角に対してさらに回転角 θ を加えて 2 点支持法にする制御手法が有効と考えられる。すなわち先端の変位 v_l が増大すると θ は適切に減少する組み合わせ制御が必要となる。

ただし v_l と θ の組み合わせは無限にあるので、その 2 変数の間に線形的な拘束条件を設定し制御する。 v_l [mm] と θ [rad] を定数 v_0 [mm] と係数 r [mm] を用いて線形的に結合させ

$$v_0 = v_l + r\theta \quad (1)$$

とし、周波数がピークを示した $v_l = 60$ mm, $\theta = 0.176$ rad (10°), $v_l = 200$ mm, $\theta = 0.436$ rad (-25°) で係数を決定すると $r = 229.1$ mm, $v_0 = 100$ mm となる。式(1)は $v_l = v_0$, $\theta = 0$ を原点として、原点からのたわみに対し正方向なら屈曲を弱め、負方向なら屈曲を強める度合いを決定する係数が r であると解釈でき、 r が v_0 に比べて十分大きければ 2 点支持法と同等になる。 $v_l = 200$ mm での 1 点支持法は 4.3 節より安定した(2,0)モードが発生しない可能性があり好ましくない。その場合、2 点支持法を維持するための回転角度は $\theta \leq -28^\circ$ が必要であること、さらに図 20 より、

Fig.18 Relationship between frequency and angle of rotation ($v_l = 60 \text{ mm}$).

Fig.19 Relationship between frequency and angle of rotation ($v_l = 100 \text{ mm}$).

Fig.20 Relationship between frequency and angle of rotation ($v_l = 200 \text{ mm}$).

880Hz以上の周波数を得るには、 $\theta \leq -20^\circ$ である必要性を考慮すると、 $v_l = 200 \text{ mm}$ に対し $-0.436 \leq \theta \leq 0.349 \text{ rad}$ ($-28 \leq \theta \leq -20^\circ$)が成り立つように v_0, θ を設定する。また式(1)は $v_l = v_0, \theta = 0$ を原点とし、そこでも音が発生することが望ましい。よって図20より $\theta = 0$ において $60 < v_l$ が成り立つ必要がある。これらの連立した条件をまとめると次式のようなになる。その範囲(図20中の青色部)と式(1)で選択した (θ, v_0) の関係を図21に示す。三角形で示される範囲の重心付近に、決定した係数の組み合わせが位置することもわかる。

$$-0.436r + 200 < v_0 < -0.394r + 200, \quad 60 < v_0 \quad (2)$$

Fig.21 Workable range and target v_0 and θ .

Fig.22 Relationship between frequency and deflection (Combination fixed end).

この拘束条件に従って $v_l = 60 \sim 200 \text{ mm}$ まで動かした際の周波数の変化を図 22 に示す. 図 22 より, 式(1)に基づく組合せ制御の周波数は 1 点支持法と 2 点支持法の間にあり, 変位に対する周波数の変化の線形性を維持しながら, 広い周波数の発音{音階 C#5(554.365 Hz)~A5(880 Hz)}が可能となることがわかる.

5. 打撃音フィードバックを用いたミュージカルソーのチューニング制御の検討

製造現場で用いる道具は, 個体のバラツキや使用による摩耗・劣化により日々その性能が変化する場合が多い. 例えば円板のこ刃の腰入れでは台金に部分的な塑性変形を加えてその残留応力により固有振動数を変化させる手法が知られている(坂東他, 2010)が, 使用中に残留応力の一部開放などの変化が生じると固有振動数が微妙に変化する. 楽器も同様に個体のバラツキや日々の劣化が生じるため, 演奏者が演奏前に試演やその結果に基づくチューニングなどが遂行される. すなわち道具に合わせて作業者がその使用動作を微修正し, また逆に道具をチューニングしてその性能を回復・発揮する場合が多い. そこで本章では, 産業用ヒューマノイドロボットが画像や音の情報をリアルタイム制御で道具に合わせての動作の微修正を試み, さらに道具をチューニングして目的の性能を発揮する手法に取り組む. ここでは打撃音の情報によるアクティブ認識に基づく打撃音フィードバックと双腕協調の動作のタスクを検討する. ケーススタディとして左右の腕で異なる動作が必要で, さらに未知かつ大変形して扱いが難しい道具としてミュージカルソーを対象に, その発音の音階のチューニング制御を遂行する.

5・1 ロボット左手によるミュージカルソーの曲率の決定

図 22 の組み合わせ制御法における発音の周波数と先端のたわみ(変位) v_l の関係を線形近似すると, 次式のようになる.

$$f' = 2.555v_l + 389.9 \quad (3)$$

ここで f' は先端たわみの入力で推測される周波数[Hz]である. ここで f_0 は目標の周波数[Hz], f_i は検出された周波数[Hz], f_e は周波数の偏差[Hz], K_{pl} は比例ゲイン[mm/Hz], T_i は積分時間[s], T_d は微分時間[s]として, 式(3)に目標周波数を代入して得られる目標の先端たわみ v_l と, そこから変数間の拘束条件(1)で求まる目標の回転角 θ で左手を動作した後, 右手の打撃動作で発音した結果に対して先行研究(廣垣他, 2017)で提案した周波数に対しての打撃音フィードバックの手法を適用して, 目標の周波数へと収束させる双腕協調の動作を遂行する. すなわち発音した周波数に対して式(4)より目標周波数の偏差を算出し, さらにその偏差に対して式(5)に示す PID 制御で左腕の動作を修正する.

$$f_e = f_0 - f_i \quad (4)$$

$$\Delta v_l = K_{pl} \cdot \left(f_e + \frac{1}{T_i} \int_0^t f_e d\tau + T_d \frac{df_e}{dt} \right) \quad (5)$$

打撃を行う毎に音認識を行い, 左手を Δv_l 移動 [同様に式(1)に基づき $\Delta \theta$ 回転] することとし, リアルタイム性を考慮して動作周期は 1s でその動作を繰り返す.

平均律の音階において半音の周波数差は音が高くなるほど広くなる. そこで対象とした音階で最も低い音 C#5 (554.365Hz)を基準に周波数の許容誤差を決定する. C5 と C#5 の間には 31.11Hz の周波数差が存在するので, この 10%以内の 3.11Hz を許容誤差のしきい値とする. すなわち本システムの音認識のサンプリング周波数は 44.1kHz, データ数は 16384 点であるため, 周波数分解能は 2.69Hz であることも考慮し, 半音の周波数差の 10%である 3.11Hz 以内であれば十分収束したとして, 目標の周波数 f_0 に対する左手の先端たわみ v_l と回転角 θ とする.

5・2 ロボット右手によるミュージカルソーの打撃位置の探索

打撃音を周波数解析し, 最大値およびその次のピークを示す周波数に着目する. このパワースペクトル密度

(PSD)[dB]をそれぞれ P_{s1} , P_{s2} とし, その差 $P_{s12} = P_{s1} - P_{s2}$ [dB]は主モードと外乱モードの音のエネルギー比と考えられる. この値が大きいほど純音に近い発音の打撃動作を具現化しているものと考えられる.

一般に平板を面外方向に加振した場合, 加振点の位置により生じるモードに依存性を有する(沼田, 山崎, 2012)ことが知られている. さらに図 23 に $v_l=60, 100, 150, 200\text{mm}$ で式(1)の拘束条件を与えた際の有限要素解析による主モードを示す. 図より腹の位置がミュージカルソー長手方向に大きく変化している様子がわかる. したがって, 左手の動作に合わせて右手の打撃位置を変化させる必要があるものと考えられる. そこで左手の動作に対しての右手の打撃位置の現場での探索方法を検討する.

図 23 で主モードの振動の腹の長さは長手方向に約 150mm であり, この範囲を打撃することができれば閉じ込め(2,0)モードの振動数を発生させることができると考えられる. また腹の重心の位置は長手方向 $y_m=120\sim 400\text{mm}$ 程度の範囲にある. そこで最初に腹の位置の存在範囲を, 長手方向の腹の長さ (本報では約 150mm) を 3 等分した 50 mm の間隔 (幅方向は常に中点) で順に打撃すればその位置の粗探索が可能である. その結果の中で P_{s12} 値が最も大きい打撃位置が少なくとも閉じ込め(2,0)モード内となる.

Fig.23 (2,0) mode in combination fixed condition (Antinode areas are green, yellow and red).

$v_l=200\text{mm}$, $\theta=0.436\text{rad}$ (-25°) を与えたとき, $y_m=250\text{mm}$ で最も PSD 差 P_{s12} が大きくなった. $y_m=250, 270\text{mm}$ を打撃したときの周波数分析の結果を図 24(a)(b)に示す. 図 24(a)より, $y_m=250\text{mm}$ では(2,0)モードである 912Hz の他に 962Hz のピークが現れ, $y_m=270\text{mm}$ ではほとんど発生していないことがわかる. このモードは図 23 の $v_l=200\text{mm}$, $\theta=0.436\text{rad}$ (-25°) の計算において(2,0)モードの周波数に近接して 1 つ高い周波数で生じる図 25 に示すような外乱となる固有振動数のモードであると考えられる. $y_m=270\text{mm}$ ではこのモードの節になり, (2,0)モードの腹となる点を打撃することができたため, 響きのよい純音を発生させることができたと考えられる.

次に閉じ込め(2,0)モード内でその腹の重心位置を探索するため, その粗探索の位置を初期値として y_m 方向の探索幅 Δy_m を次式の P 制御則に従い制御する.

$$\Delta y_m = K_{pr} (\text{sgn}[dP_{s12}/dt]) (P_{s0} - P_{s12}) \quad (6)$$

K_{pr} は比例ゲイン[mm/dB], sgn は符号関数, P_{s0} は目標 PSD 差である. 打撃を行う毎に音認識を 1 回遂行し, 右手を移動し, その動作周期は 3s とした. 図 25 に示す主な外乱モードの節の長手方向の間隔が約 15mm であることから, 目安としてその 1/2 である 7.5mm 以内に収束させることができれば十分であると考えられる. ここで図

24(a)(b)に着目すると主モード 912Hz と外乱モード 962Hz のピークの PSD 差は 19.09 dB を示している. 20dB の差でエネルギーは 100 倍となることも考慮すると, 目標 PSD 差 P_{s0} は 20dB に設定すれば十分と考えられる.

Fig.24 FFT analysis of sound by impact.

Fig.25 Another mode in combination fixed condition (Antinode areas are green, yellow and red).

5・3 ロボット両手の動きを組み合わせたミュージカルソーのチューニング制御

図 4(b)に示すようにミュージカルソーは人の太ももで挟み固定し先端付近を左手で保持して発音させるが, 演奏日により柄部の固定や保持位置は厳密に同じではなく, また演奏者の体形の差やそれまでの屈曲履歴による自重のたわみの差などの影響を受ける. したがって演奏などの前に, その日の姿勢で発音のチューニング動作をする場合が多い. 現場で人が利用する道具も同様に作業者がそれぞれ調整・チューニングしてから使用する場合が多い. そこで現場でヒューマノイドロボットが道具を扱う場合を想定して, 目標とする発音の周波数を設定して, 現場でのミュージカルソーの発音チューニング制御を試みる.

第 1 ステップは発音の純音性の確保に着目して, 各音階の周波数を式(3)に代入して各音階の左手の v_l を仮決めし, それぞれの各音階に対して 5.2 節の手法で右手の打撃位置を決定する. その結果で左手による先端 v_l と右手の打撃位置 y_m の協調動作の組み合わせの仮決定とする. 第 2 ステップは目標周波数 (目標音階) に対しての正確さに着目して, それぞれの音階に対して 5.1 節の手法で左手に式(4)の周波数偏差に基づく式(5)の PID 制御を遂行する. 最終の第 3 ステップは, 各音階に対して式(6)に基づき再度右手の打撃位置の微調整を遂行して, 最終的に各音階に対しての左手の先端 v_l と右手の打撃位置 y_m の協調動作の組み合わせを決定する. 対象とした音階の中でも高い周波数でチューニングが難しい目標音階 880 Hz (A5) の周波数に関して, 以下でそのプロセスを検討する.

まず第 1 ステップでの打撃位置 y_m と時間の関係を図 26 に示す. ここでは 0 ~ 18s が 50mm ずつ移動させて打撃する動作, 18 ~ 21s が最も PSD が大きい点に移動させる動作, 21 ~ 51s が式(6)に従って動かす動作を表す. ここでは $K_{pr} = 8.0 \times 10^{-1} [\text{mm/dB}]$, $P_{s0} = 20 \text{ dB}$ とした.

図 26 より, 右手の打撃位置が $y_m = 250 \text{ mm}$ 付近に収束していることがわかる.

次に第 2 ステップで左手による PID 制御を遂行した場合の各打撃動作に対する最大ピーク周波数と経過時間の関係を図 27 に示す. ここでは $K_{pl} = 1.0 \times 10^{-1} [\text{mm/Hz}]$, $T_i = 1.0 \times 10^2 [\text{s}]$, $T_d = 5.0 \times 10^{-1} [\text{s}]$ とした. 図 27 より, 周波数は 5.1 節で設定した半音を基準にした絶対値の許容誤差 $\pm 3 \text{ Hz}$ を 880Hz の目標周波数においても維持しており, 十分な

Fig.26 Relationship between hammering position and time (first trial).

Fig.27 Relationship between frequency and time.

Fig.28 Relationship between hammering position and time (second trial).

精度の達成が確認できる。

最後の第3ステップとして、さらに打撃位置の探索を遂行した場合の打撃位置 y_m と時間の関係を図 28 に示す。図 28 より、 $y_m = 260$ mm 付近に収束していることがわかる。また 5.2 節の図 25 に示す外乱モードを防ぐために必要な精度として、打撃位置は 260mm に対して ± 7.5 mm 以内を達成していることがわかる。第1ステップと比較して y_m が若干増加したのは、第2ステップで左手にPID制御を用いて調整を行った際にたわみが増加し、腹の位置が先端へと若干移動したためであると考えられる。

以上により、提案する打撃音フィードバックシステムに基づきヒューマノイドロボットの左右の腕に異なるタスクを実行し、扱いが難しい道具の一種であるミュージカルソーに対して目標音階 (880Hz) にチューニング制御を遂行できることを示すことができた。それぞれの音階に対し同様のタスクを遂行して、左手の先端位置と右手の打撃位置の組み合わせテーブル (lookup table) を取得し、その結果に基づく動作で演奏ができる可能性を示すことができた。それは人と同等に複雑な操作が必要となる道具を扱うことができる可能性を示したものである。

6. 結 言

本報では大変形の柔軟性を有して扱いが難しい対象・道具としてミュージカルソーに着目して、産業用ヒューマノイドロボットを用いて対象物に積極的に打撃を加えて情報を取得するアクティブ認識と、双腕協調の動作の統合を試みた。その結果、提案する打撃音フィードバックシステムにより十分な精度でミュージカルソーの発音制御が可能であり、人と同等の道具の操りチューニング動作が可能であることが判明した。その結果を以下にまとめる。

- 1) 西洋の台形のこぎり型のミュージカルソーの演奏・発音の主モードは閉じ込め(2,0)であることを, クラドニ図形および有限要素法解析に基づき解明することができた. また発音の周波数はのこぎり先端の曲げ変形(ひずみ)で制御され, さらに主モード(純音)の維持のため先端に回転を加えて屈曲させる動作が必要であることが判明した.
- 2) 長方形薄鋼板は台形に比べて先端の曲げ変形(ひずみ)を与えても発音の主モードである閉じ込め(2,0)の周波数変化が小さい. さらに閉じ込めモードの長辺に沿って短辺方向に大きく波打つ(2,0)モードが現れ不安定であり, さらに閉じ込め(2,0)モードの長辺が顕著に短くなる傾向があることがわかった.
- 3) ミュージカルソーの発音制御として, 発音の周波数の広い先端部の1点支持法に基づきそのたわみ(位置)を変化させる一方で, 閉じ込め(2,0)モードを維持して純音の安定性を高めるため先端部の2点支持でのたわみ回転角 θ を加える手法を提案した. すなわち左腕の先端の変位 v_l とその回転 θ を適切に組み合わせる制御が必要であることがわかった.
- 4) 音響アクティブ認識と双腕協調の動作のケーススタディとして, それぞれの周波数・音階に対して右腕でミュージカルソーの適切な位置を打撃し, その打撃音の変化に基づき左腕の先端変位とその回転角を微修正するタスクを試みた. その結果, 提案するシステムで十分な精度のチューニング動作が可能であることが判明し, それは人と同等に複雑な道具の操りを達成できる可能性を示すことができたものと考えられる.

文 献

- 坂東慎之介, 日野順市, 岩田弘, 橋本浩二, 台金の温度分布を利用した丸鋸の腰入れ, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.772 (2010), pp. 3330-3335.
- Bretan, M. and Weinberg, G., A survey of robotic musicianship, Communications of the ACM, Vol.59, No.5 (2016), pp. 102-109.
- N.H.フレッチャー, T.D.ロッシング, 岸憲史, 久保田秀美, 吉川茂, 楽器の物理学, 丸善出版, (2012), pp.79-86, 665-666.
- 廣垣俊樹, 青山栄一, 杉浦義久, 小林飛翔, 産業用ヒューマノイドロボットを用いた打撃動作と打撃音フィードバックに基づく応用の考察, 日本機械学会論文集, Vol.83, No.855 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00132.
- 金子淳一, 細矢直基, 古屋耕平, ミュージカルソーの発音メカニズムに基づく薄板構造物の低振動・低騒音設計, 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2010 講演論文集, (2010), 111, pp.1-6.
- 梶田秀司, 比留川博久, 横井一仁, 原田研介, ヒューマノイドロボット, オーム社, (2014), pp.1-2.
- Maes, L., Raes, G.W. and Rogers, T., The man and machine robot orchestra at logos, Computer Music Journal, Vol.35, No.4 (2011), pp.28-48.
- 水本武志, 音楽とロボット, 情報処理, Vol.57, No.6 (2016), pp.538-540.
- 水野雅史, 土田広信, 本郷昭三, 伊地知武吉, 水野進, 渡辺一憲, 打音解析によるメロン果実の熟度判定, 園芸学会雑誌, Vol.60, No.1 (1991-1992), pp.83-88.
- 沼田臨, 山崎徹, 振動伝達パワー抑制のための振動インテンシティに基づく加振点選択法, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.791 (2012), pp.2355-2368.
- 岡大輔, 小林康弘, 茂木和弘, 白石洋一, 機械学習に基づくリアルタイム打音検査の実用化, エレクトロニクス実装学会誌, Vol.23, No.2 (2020), pp.135-138.
- 榊原伸介, 知能ロボットによる工場自動化と IoT, AI 活用について, システム制御情報学会論文誌, Vol.61, No.3 (2017), pp.101-106.
- Schaal, S., Kotosaka, S. and Sternad, D., Nonlinear dynamical systems as movement primitives, Proceedings of First IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2000), pp.1425-1436.
- 鈴木昭夫, 吉川一三, 建築・土木分野の検査ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.5 (1986), pp.544-547.
- 高木宗谷, トヨタパートナロボット, 日本ロボット学会誌, Vol.24, No.2 (2006), pp.62-64.

References

- Bando, S., Hino, J., Iwata, H., and Hashimoto, K., The tensioning for a tipped saw using the temperature distribution on its base metal, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.76, No.772 (2010), pp.

3330-3335(in Japanese).

- Bretan, M., and Weinberg, G., A survey of robotic musicianship, Communications of the ACM, Vol.59, No.5 (2016),pp. 102-109.
- Fletcher, N. H., Rossing, T.D., Kishi K., Kubota H. and Yoshikawa S., Musical instrument physics, Maruzen Publishing, (2012), pp.79-86, 665-666(in Japanese).
- Hirogaki, T., Aoyama, E., Sugiura, Y. and Kobayashi A., Investigation of hammering task and application based on its hit sound feedback motion with an industrial humanoid robot, Transactions of the JSME(in Japanese), Vol.83, No.855 (2017), DOI:10.1299/transjsme.17-00132.
- Kaneko, J., Hosoya, N. and Furuya, K., Minimization of vibration and sound radiation of thin plate structures based on musical saw mechanism, Proceedings of JSME Dynamics and Design Conference 2010 (2010), 111, pp.1-6 (in Japanese).
- Kajita, S., Hirukawa, H., Yokoi, K. and Harada,K., Humanoid robot, Ohmsha (2014) (in Japanese).
- Maes, L., Raes, G.W. and Rogers, T., The man and machine robot orchestra at logos, Computer Music Journal, Vol.35, No.4 (2011), pp.28-48.
- Mizumoto, T., Music and robot, Transactions of Information Processing Society of Japan, Vol.57, No.6 (2016), pp.538-540(in Japanese).
- Mizuno, M., Tsuchida, H., Hongo, S., Ijichi, T., Mizuno, S. and Watanabe, K., Evaluation on ripening stage of melon fruits by acoustic impulse response method, Transactions of the JSHS, Vol.60, No.1,(1991-1992)pp.83-88 (in Japanese).
- Numata, N. and Yamazaki, T., Determination method of an excitation force point for reducing structure-borne transmitted power on flexible plates based on structural intensity, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.78, No.791 (2012),pp.2355-2368 (in Japanese).
- Oka, D, Kobayashi, Y., Motegi, K. and Shiraishi, Y, Practical realization of real-time product inspection by hammering sounds based on machine learning technique, Journal of The Japan Institute of Electronics Packaging, Vol.23, No.2 (2020), pp.135-138(in Japanese).
- Sakakibara, S, Automation, Application of IoT and AI with an intelligent robot, Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers Vol.61, No.3 (2017), pp.101-106 (in Japanese).
- Schaal, S., Kotosaka, S. and Sternad, D., Nonlinear dynamical systems as movement primitives, Proceedings of First IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (2000),pp.1425-1436.
- Suzuki, A. and Yoshikawa, H., Inspection robot of the field of building, engineering works, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.4, No.5 (1986),pp.544-547(in Japanese).
- Takagi, S., Toyota partner robots, Journal of the Robotics Society of Japan, Vol.24, No.2 (2006), pp.62-64 (in Japanese).