

浄瑠璃人形遣いとウェアラブルロボットアームの協調インタラクションに関する研究

研究代表者

蔡 東生

筑波大学 システム情報系 准教授

1 研究開始当初の背景

今後 10 年, 自律的な知能と感情を持つ, 用途に合わせた各種協働ロボットが備わったスマートホームが当たり前になり, 介護の一翼をも担うことになる. しかし, 協働ロボットがスマートホームの情報インテリジェントハブとして, 利用者に受け入れられるようになるまでの時間と範囲を決定づける重要な要素があることが最近分かってきた (McKinsey Qtr, 2017). それは「信頼 (Neurobotic Trust)」である. 信頼は, 第一に人と協働で行うタスクを確実に遂行できることによって確立される. しかし, 人々は近年の自動運転車のように AI 駆動のデバイスやシステムにより多くの任務を課すようになるが, 共存のための信頼を築く上で鍵となるのは, 単なる人型に留まらないロボットを生み出すことにある. 人々は, 心と心の結びつきを求めているのである. 調査の結果, 利用者は, ロボットにタスクを遂行してもらえると満足はするものの, 利用者とのインタラクションから, 目線, 表情, しぐさ, 動きからよりロボットのパーソナルな気持ちや感情が読み取れた時に喜び・信頼を感じる. このロボットインタラクションから感じる信頼を Neurobotic Trust と呼ぶ. 信頼を確立するためには, インタラクションを通じ人とながり, 関わりを深める必要がある. この感情デザインを文楽の匠、人形使い間の合図である「ホド」「ズ」をもとに行うことが本研究の経緯である.

2 研究の目的

今後, 世界では, AI, IoT, ビックデータ処理, 5Gなどをベースに情報家電が急速にスマートホームに導入されてくる. その中, 日本では, 超高齢化社会が急速に進む. スマートホームで暮らす, 高齢者や利用者は, 情報家電を使いこなす, 介護などのサービスを受けるために, これらの複雑な情報家電を使いこなす必要がある. 人は, インタラクションにおいて相手のしぐさ, 表情, 動作等から, 相手の感情を読み取れたとき喜びを感じ, 相手に, 親しみ, 信頼を感じる (メラビアン効果). すなわち, ホームロボットが今後家庭に普及する決定的な要素の一つはこの信頼である. この, 信頼の獲得に, 千年以上の歴史で培われた, 人形浄瑠璃文楽の技と匠を生かすのが本研究の目的である.

文楽人形は据え置かれていて, 単にかわいらしい人形である. しかし, 3 人の人形遣いが手をいれて動かし始めると, たちまち, 見る人に強い感情移入が起こり始める. このしくみ, 匠の技はまだまだ良く解明されていない. 桐竹勘十郎 (紫綬褒章, 研究協力) 一座の協力のもと, これを解明し, 「ホド」と「ズ」という人形遣いの合図を中心に, 文楽人形と人とのインタラクションを解明し, ロボットと人とのインタラクションデザインに取り組んでいくのが本研究の目的である.

3 研究の方法

千年以上前の庶民の木偶から始まる日本最古の機械的からくり構造をもつ人形・浄瑠璃人形文楽の感情動作表現・インタラクションを解析し, その動き・インタラクションを, 固有モード分解 (Huang, 2009) し, 三味線のビートから基本動作をセグメント化する. その分解・セグメント化された, 基本感情動作表現の部品化を科学的に行う. 部品化された, 文楽の感情動作表現を AI 搭載ホームロボットの感情表現動作に再利用し, 人とロボットのインタラクションデザインを行うことを目的とする. そのため, 文楽桐竹勘十郎 (紫綬褒章, 研究協力者) 一座の協力と教えを得, 文楽人形の動きを, 高精度に, モーションキャプチャし, 非線形信号として固有モード分解し (Huang, 2009), 分解信号を三味線のビートからセグメント化し, 伝統芸能文楽人形の感情動作の部品化・再利用を行う. 主遣いは首と右手を, 左遣いは左手を, 足遣いは両足を操作し, 3 人で一つの文楽人形を操る. 人形カラクリとその感情表現メカニズムを解明するため, モーションと音楽データ (三味線) を桐竹勘十郎一座の協力のもと文楽劇場で同時に採集し, 人形遣いが合図として使う, 「ホド」と「ズ」を抽出・

部品化する。

4 研究の結果

4-1 三味線、義太夫語りのスペクトログラム

本研究では、キャプチャした文楽の演目である妹背山婦女庭訓の杉坂屋の段での、主人公、おみわが手を合わせる場面の、三味線、義太夫、人形遣いの関係を、時間周波数スペクトル（スペクトログラム）、ヒルベルト変換を用いたヒルベルトスペクトラム、ヒルベルト位相を用いて分析する。

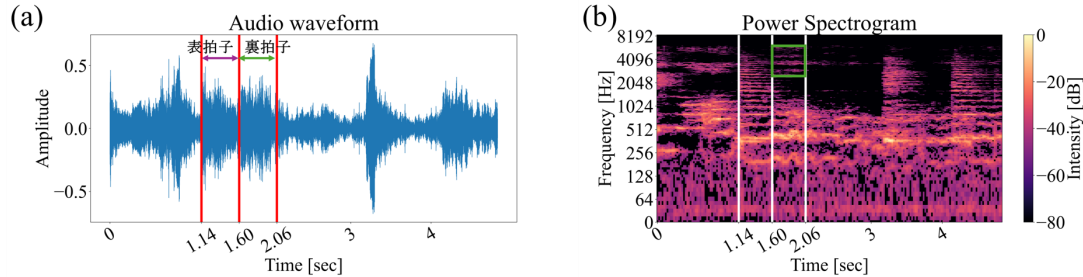


図1 (a)「杉坂屋の段」の一部のオーディオ波形グラフ (b)「杉坂屋の段」の音楽のスペクトログラム

図1(a)は、横軸を時間、縦軸を音の振幅（V）とした音声波形グラフである。図1(b)において、横軸は時間を、縦軸は周波数を、色の濃淡はスペクトラム強度（dB）を示す。図1より、約1.14秒に三味線の打音が発生し、その半拍子後、約1.6秒から2.06秒に、緑の四角で示した、「うなり」と呼ばれる義太夫が音を上げた高音部が発せられ、「裏拍子」であることが確認できる。

義太夫は主遣いよりわずかに早く主導的に裏拍子を使い、音高を上げ、「うなり」により、次の語りの、リズム速度を教える。義太夫は裏拍子、つまり一拍の後半で語尾を上げている。義太夫は「月のえがおお～～」のフレーズにおいて、その前の「えがお」が表拍子で、「お～～」の後半の「お」を裏声で半音上げ、伸ばすか、縮める。半拍の裏拍子を使って「序破急」と呼ばれる合図を出している。能、文楽では、リズムを変える時、能では掛け声、文楽では語りにおいて、通常表拍子と裏拍子は同じ長さであるが、発した裏拍子の長さを変えることにより、次のリズムの長さを変える。すなわち、変化させた裏拍子の倍の長さが、次のリズムの長さとなる。ここで、「お～～」という「お」音を重ね伸ばす発声は、浄瑠璃では「うなり」と呼ばれる。さらに、「ズ」の一所作（手を合わせる所作）のリズム時間長さを決定する。

4-2 瞬時位相と瞬時周波数を用いた解析

次に、人形胴体の背中に付けたマーカの軌跡のTRC(Trace)データに対して、HHT をかけたヒルベルトスペクトラムを図2(a)に示す。 x 軸は時間、 y 軸は周波数、右側のカラーバーは振動振幅を示す。図2(b)は、人形背中(Spine)のヒルベルト位相角 $\theta(t)$ を示す。 x 軸は時間、 y 軸はヒルベルト位相角 $\theta(t)$ を表す。図中 $\theta(t)$ の範囲は、 $-\pi \leq \theta(t) \leq \pi$ となる。

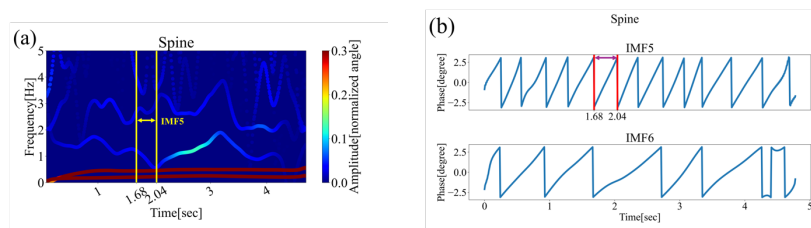


図2 (a)背中のヒルベルトスペクトル(b) 背中のヒルベルト瞬時位相

「ホド」は、義太夫の裏拍子より約 0.08 秒遅れて発生しており、義太夫が人形の動きをリードしていることがわかる。

図 2 では、1.6 秒から義太夫は半音上げて裏拍子を使い始める。0.08 秒遅れて、主遣いは人形を右にシフトし、「ホド」の合図を発する。これは図 2(b) の IMF5 で確認できる。赤い線で囲まれたのが、「ホド」のヒルベルト位相である。図に示すように、IMF5 の約 1.68 秒から 2.04 秒までの約 0.4 秒間が「ホド」であり、ヒルベルト位相により「ホド」の合図が検出されている。

図 3 は、首、左腕の関節角周波数のヒルベルトスペクトラムを示す。横軸は時間、縦軸は角周波数、右側のカラーバーは振動振幅を示す。

図 3(a)、(b) はそれぞれ、首、左腕関節オイラー角周波数のヒルベルトスペクトラムである。図 3(a) において、黄色の縦線(「ズ」の開始時間)は約 1.95 秒、次の縦線(「ズ」の終了時間)は約 2.75 秒であり、図 3(a) の IMF6 が首の「ズ」の動きを示している。最初の黄色の縦線は約 2.14 秒、次の黄色の縦線は約 3.0 秒を表し、IMF6 は左前腕の主遣いの「ズ」に従って左遣いが左手を、前で手を合わせるように動かしている所作のヒルベルトスペクトラムである。

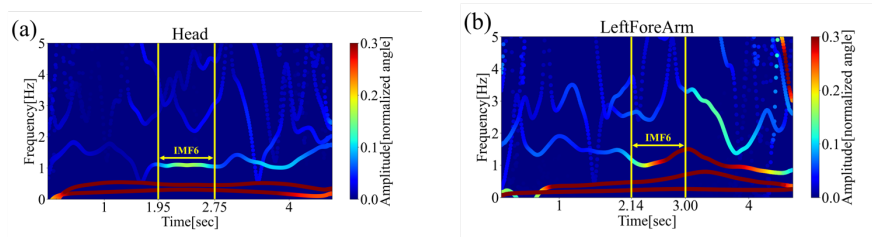


図 3 各関節角度のヒルベルトスペクトラム (a) (b)それぞれ首、左前腕のヒルベルトスペクトラム

図 4 は、各関節角度ヒルベルト位相を示す。横軸は時間、縦軸はヒルベルト位相角 $\theta(t)$ を表す。

図 4(a) は、赤線で囲まれる約 1.95 秒から 2.75 秒までの IMF6 スペクトラムが、主遣いが出す「ズ」に対応している。図 4(b) は、左前腕の IMF6 のヒルベルト位相角を示す。約 2.14 秒から 3.0 秒の間が、左遣いが「ズ」に従って動かしている手を合わせる左手の所作を示している。左前腕は主遣いの「ズ」の合図に約 0.2 秒遅れて反応し、約 0.2 秒長く動かしている。

「ホド」は「ズ」の始まりの合図である。同時に、義太夫の出す裏拍子と同様、主遣いは「ホド」を所作の裏拍子として用いている。即ち、主遣いは「ホド」の動かす速度と動作の大きさを裏拍子のように利用して、左遣いに合図を送っている。その意味で、義太夫の出す裏拍子と、主遣いが出す「ホド」は対応している。義太夫は次のリズムを、主遣いは次の所作の速度、方向等を、それぞれ、裏拍子と「ホド」という合図として出している。

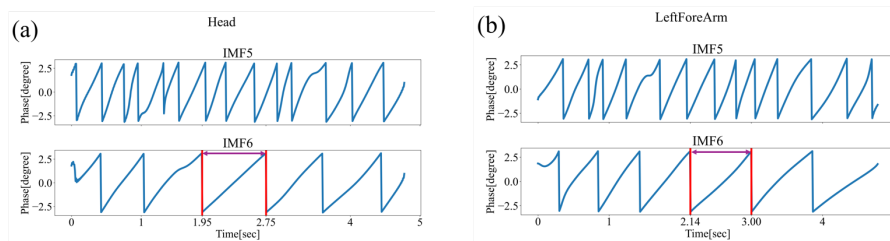


図 4 (a), (b)首、左前腕の「ホド」に対応する IMF5 のヒルベルト位相

「ホド」の役割は重要で、人形が胸の前で「手を合わせる」ためには、左右の手の動きの速さ、大きさ、方向を合わせ、その動作ごとに、同期させる必要がある。このように、人形遣いは、義太夫の語り中さりげなく出される裏拍子に合わせ、「ホド」と「ズ」を用いて協調的な人形の操作を実現している。裏拍子、「ホド」、「ズ」は人形劇に埋め込まれており、観客にはその合図の意味がわからないようになっている。

4-3 首と左腕の軌跡

図 5 は、「ズ」における、首と左前腕の運動軌跡を XY 平面に投影したものである。軌跡の傾き、スケールは異なるが、(a) (b) の軌跡はほぼ一致する。さらに (b) の軌跡を 4~5° 右に回転させると、軌跡はほぼ完全に一致する。これは、左遣いが 4~5° 左斜めから見ているため、主遣いが、左手位置を補正しているためと考えられる。匠の技である。

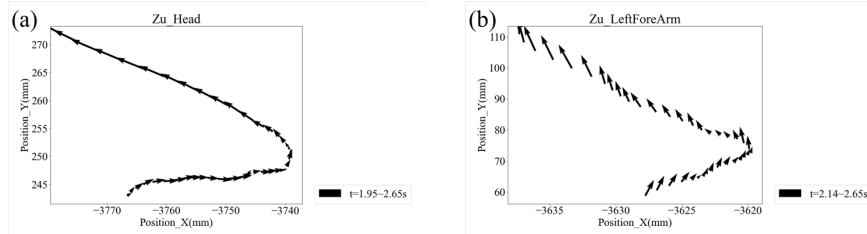


図 5 「ズ」を使った、(a) 首と (b) 左前腕部分の軌跡の比較図

4-4 序破急を使った文楽に於ける即興的非言語コミュニケーション

図 2(b) 「ホド」を示す IMF5 と図 3(a, b) 「ズ」を示す IMF6 のそれぞれの位相周期を比較すると、図 2(b) 「ホド」の位相周期は約 0.4 秒、「ズ」の位相周期は約 0.8 秒である。「ズ」の位相周期は、「ホド」の位相周期の倍になっており、義太夫が裏拍子で出す合図と一致している。これは、「ホド」が「ズ」における所作のリズムを規定していると考えられる。同時に、「ホド」により左遣いが操作する左手の動きの速さや大きさなどが規定されている。この協調動作は事前に決まっているわけではなく、義太夫と主遣いがその場その場で、即興的に、他の演者である左遣いや足遣いなどに合図を出し実現している。

文楽では、義太夫は物語の展開に合わせて、その場で即興的にリズムの緩急を変化させ、感情を作り出す。能も同様に、リズムの緩急を再帰的に変化させ物語を展開していく。主にリズムの緩急の変化を使った感情表現、演技方法を「序破急」と呼ぶ。

【参考文献】

- [1] Duncan Jr S. Nonverbal communication[J]. Psychological Bulletin, 1969, 72(2): 118.
- [2] Mandal F B. Nonverbal communication in humans[J]. Journal of human behavior in the social environment, 2014, 24(4): 417-421.
- [3] Candrasari Y. Nonverbal Communication Reconstruction on Facebook[J]. Jurnal The Messenger, 2021, 13(1): 94-107.
- [4] 植田一博, 櫻哲郎, 成田友紀, 等. 文楽人形遣いの協調のメカニズム[C]//人工知能学会全国大会論文集 第 27 回 (2013). 一般社団法人 人工知能学会, 2013: 1H4OS02b5-1H4OS02b5.
- [5] 渋谷友紀, 森田ゆい, 福田玄明, 等. 文楽人形遣いにおける呼吸と動作の非同期的関係: 日本の古典芸能における「息づかい」の特殊性[J]. 認知科学, 2012, 19(3): 337-364.
- [6] 渋谷友紀, 櫻哲郎, 佐々木正人, 等. 文楽における浄瑠璃と人形遣いの呼吸の同期[J]. 認知科学, 2017, 24(4): 518-539.
- [7] 植田一博, 櫻哲郎, 成田友紀, 等. 文楽人形遣いの協調のメカニズム[C]//人工知能学会全国大会論文集 第 27 回 (2013). 一般社団法人 人工知能学会, 2013: 1H4OS02b5-1H4OS02b5.
- [8] 櫻哲郎, 成田友紀, 沢井和也, 等. 文楽人形遣いの協調操作を実現する非言語情報通信[J]. 電子情報通信学会論文誌 D, 2013, 96(1): 195-208.
- [9] 櫻哲郎, 森田寿郎, 植田一博. 文楽人形の協調操作における動作特徴の抽出[J]. ヒューマンインタフェース学会論文誌, 2009, 11(3): 255-264.
- [10] 櫻哲郎, 森田寿郎, 植田一博. 文楽人形の動作表現技術の解明・協調操作を実現する動作要素“ほど”の抽出[C]//日本デザイン学会研究発表大会概要集 日本デザイン学会 第 56 回研究発表大会. 一般社団法人 日本デザイン学会, 2009: A16-A16.

- [11] Hattori M, Furuta S, Nishizawa S, et al. An analysis of the amplitude factors of the Bunraku puppet's motion axis-for the description, analysis, and generation of humanoids' motions[C]//Smc 2000 conference proceedings. 2000 ieee international conference on systems, man and cybernetics.'cybernetics evolving to systems, humans, organizations, and their complex interactions'(cat. no. 0. IEEE, 2000, 2: 900-905.
- [12] Hattori I, Furuta S, Nishizawa S, et al. A method to generate humanoid's actions based on the phase and amplitude factors of its motion axes-an analysis of the Bunraku puppet's motion axis[C]//Proceedings 9th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. IEEE RO-MAN 2000 (Cat. No. 00TH8499). IEEE, 2000: 388-393.
- [13] Hattori H, Nakabo Y, Tadokoro S, et al. An analysis of the Bunraku puppet's motions based on the phase correspondence of the puppet's motions axis-for the generation of humanoid robots motions with fertile emotions[C]//IEEE SMC'99 Conference Proceedings. 1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (Cat. No. 99CH37028). IEEE, 1999, 2: 1041-1046.
- [14] Dong R, Cai D, Hayano S, et al. Investigating the Effect of Jo-Ha-Kyū on Music Tempos and Kinematics across Cultures: Animation Design for 3D Characters Using Japanese Bunraku Theater[J]. Leonardo, 2022, 55(5): 468-474.
- [15] Dong R, Ni S, Wu B, et al. Analyzing Jo-Ha-Kyu Mechanism in Japanese Traditional Performing Art Ningyo Joruri[C]//2022 IEEE Intl Conf on Dependable, Autonomic and Secure Computing, Intl Conf on Pervasive Intelligence and Computing, Intl Conf on Cloud and Big Data Computing, Intl Conf on Cyber Science and Technology Congress (DASC/PiCom/CBDCCom/CyberSciTech). IEEE, 2022: 1-5.
- [16] Dong R, Chen Y, Cai D, et al. Robot motion design using bunraku emotional expressions focusing on Jo-Ha-Kyū in sounds and movements[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(5): 299-312.
- [17] Dong R, Chen Y, Cai D, et al. Robot motion design using bunraku emotional expressions focusing on Jo-Ha-Kyū in sounds and movements[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(5): 299-312.
- [18] Dong R, He Y, Cai D, et al. Interacting with Humanoid Robots: Affective Robot Motion Design with 3D Squash and Stretch Using Japanese Jo-ha-kyu Principles in Bunraku[M]//ACM SIGGRAPH 2021 Talks. 2021: 1-2.
- [19] Akira T. The Beauty of 'Jo-Ha-Kyū': Japanese Music Thinking Style Revives Today[J]. Ongaku no Tomo magazine, 2004.
- [20] Dong R, Chen Y, Cai D, et al. Robot Motion Design Using Bunraku Emotional Expressions—Focusing on Jo-Ha-Kyū In Sounds And Movements[J]. Advanced Robotics, 2020, 34(5): 299-312.
- [21] Chieko Y. Standards and transformations in narration of Tayu[J]. Kyoto City University of the Arts, 2017.
- [22] Huang N E. Hilbert-Huang transform and its applications[M]. World Scientific, 2014.
- [23] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A: mathematical, physical and engineering sciences, 1998, 454(1971): 903-995.
- [24] Wang G, Chen X Y, Qiao F L, et al. On intrinsic mode function[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(03): 277-293.
- [25] Fried B D, Conte S D. The plasma dispersion function: the Hilbert transform of the Gaussian[M]. Academic press, 2015.
- [26] Diebel J. Representing attitude: Euler angles, unit quaternions, and rotation vectors[J]. Matrix, 2006, 58(15-16): 1-35.
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_angles
https://review.ieice.org/regist/regist_baseinfo_j.aspx

- [28] Niu J, Liu Y, Jiang W, et al. Weighted average frequency algorithm for Hilbert–Huang spectrum and its application to micro-Doppler estimation[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(7): 595-602. Nelias C, Sturm E M, Albrecht T, et al. Downbeat delays are a key component of swing in jazz[J]. Communications Physics, 2022, 5(1): 237.
- [29] 丹波明. 「序破急」という美学: 現代によみがえる日本音楽の思考型[J]. (No Title), 2004.
- [30] Butterfield M W. Why do jazz musicians swing their eighth notes?[J]. Music theory spectrum, 2011, 33(1): 3-26.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
3D Topology of Transient Bifurcation Just Before Substorm Onset	Radioscience Letter	2024
Iterative Layerwise Training for Quantum Approximate Optimization Algorithm, Physical Review A	Physical Review A	2024
Structural Color in Amber-Entombed Wasp: A Detailed Study Using NS-FDTD Simulations	Trans. IEEE Access	2024
Identifying and Visualizing Terrestrial Magnetospheric Topology using Geodesic Level Set Method	Computer Graphics Forum	2023