

音声発達過程の構成的理解のための 乳児様発声プラットフォームの開発

Development of Infant-like Vocal Platform for A Constructive Approach to Understanding of Developmental Process for Vocalization

○学 小島 友裕 (阪大) 正 遠藤 信綱 (阪大) 笹本 勇輝 (阪大)
石原 尚 (阪大) 堀井 隆斗 (阪大) 正 浅田 稔 (阪大)

Tomohiro KOJIMA, Osaka University, tomohiro.kojima@ams.eng.osaka-u.ac.jp
Nobutsuna ENDO, Osaka University, endo@ams.eng.osaka-u.ac.jp
Yuki SASAMOTO, Osaka University
Hisashi ISHIHARA, Osaka University
Takato HORII, Osaka University
Minoru ASADA, Osaka University

Several observational studies suggest that the infant vocalization towards language acquisition develops through interactions with caregivers. However, what kind of underlying mechanisms works and how caregiver's behavior affects on this process have not been made clear since it is very difficult to control the infant vocalization. In order to attack this issue, we built an infant-like vocal robot "Lingua" as a controllable vocal platform. Lingua has two features; infant-like voice and high articulation capability. The shape of its vocal tract resembles that of a 6-month-old infant based on the anatomical data, and this may contribute to the former. 7-DOFs for articulation in the tongue is realized by sophisticated design of linkage mechanisms inside miniaturized vocal tract for high capability of its articulation. Preliminary experiments showed that the robot succeeded in vocalizing almost the same fundamental frequency vowel-like utterances similar to that of an infant.

Key Words: Vocal robot, Infant robot, Speech production

1. 緒言

音声言語は、人が他者とコミュニケーションするための重要な手段の一つである。乳児は、養育者との発声やりとりを通じて音声言語を発達させていることが、発達心理学における観察実験により示唆されている[1]。しかしながら、倫理的な問題、あるいは言葉の通じない乳児を扱っているため、乳児の行動を統制して実験することが困難であり、発達様相の記述には及んでも、その機序を理解するまでには至っていない。これに対し、乳児の代わりに乳児と同等の能力を持つ乳児ロボットを統制可能なプラットフォームとして用いることで、その機序の構成的理解に迫るアプローチが注目されている[2]。このようなプラットフォームとして発話ロボットや調音シミュレータ、音声変換、合成音声と考えられるが、乳児の音声発達過程をできる限り再現することが望まれるため、基本的な発声に加えて乱流による音響やリアルタイムなインタラクションが可能である発話ロボットが適すると考え、著者らの研究グループでは、そのような統制実験のための乳児様発声ロボットの開発に取り組んできた[3]。

これまでの研究では、乳児の調音器官を模した人工調音機構を開発し、構造的には乳児と同程度の音域(フォルマント周波数空間)で発声できることを示している[3]。しかしながら、調音のための自由度が少なく、機構的には十分な音域で発声できていない。実験プラットフォームとして用いるためには、乳児と同様に発声できる能力を持つ必要がある。また、統制のために所望の発声をモータ制御によって機構的に再現できる必要がある。

一方、多くの調音自由度を持ち大人と同様の発声が可能でロボットが開発されている[4,5]。特に、WT-7RII[4]は、多自由度の調音機構を制御することで、母音だけでなく子音

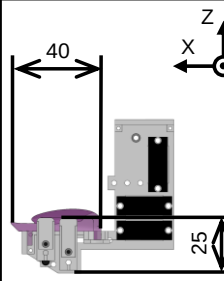
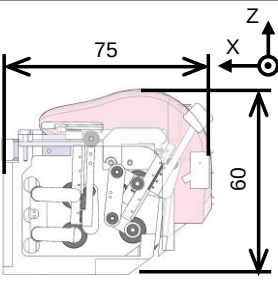
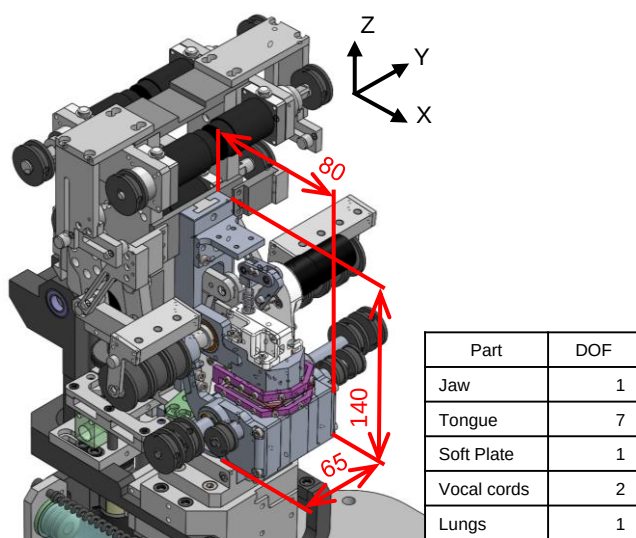
	Infant-like vocal robot[4]	WT-7RII[5]
Size		
DOF	4	7

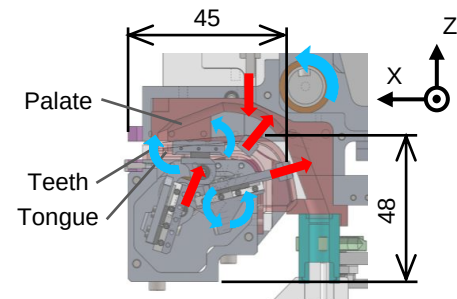
Fig. 1 Size of articulation mechanism and degrees of freedom of the robots

などの複雑な発声も可能である。しかしながら、このロボットは大人の発声の再現に主眼が置かれており、多自由度の調音機構で乳児の発声を再現することには焦点はあてられていない。乳児と大人とは、調音器官のサイズが異なり、それが両者の発声の違いに大きく関わっている。そのため、乳児様の発声を WT-7RII のような多自由度の調音機構で再現するには、小型化の問題に取り組まなければならない。

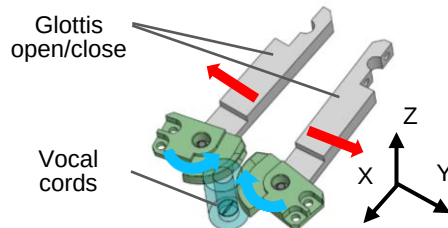
本研究では、乳児発声の再現を目指し、WT-7RII の多自由度調音機構を乳児サイズに小型化することで乳児様発話ロボット Lingua を開発した。本稿では Lingua の調音機構の設計と評価について述べる。



(a) Overview and DOF configuration

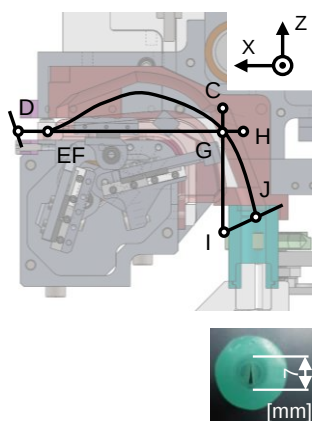


(b) Vocal tract: resonate sound by its deformation



(c) Vocal cords: vibrate by air flow and generate sound

Fig. 2 Lingua: overview and mechanical properties



Parameter	Length [mm]
VT-L (D-to-J)	93
VT-V (I-to-C)	39
PCL (I-to-G)	27
NPhL (G-to-C)	12
VT-H (D-to-H)	65
LTh (D-to-F)	10
ACL (F-to-G)	45
OPhW (G-to-H)	10
VT-O (F-to-H)	55

Fig. 3 Structural properties of the vocal cords and tract of Lingua. Parameters of the vocal tract correspond to those of anatomical data [6]

2. 開発したロボットの仕様・設計

Lingua の概観および自由度構成を図 2 に示す。本機は調音機構、声帯機構および肺機構に分けられ、全 12 自由度を有する。肺機構および声帯駆動機構は WT-7RII のものを使用し、声帯は Sasamoto et al. と同様に軟素材によるものを使用した。以下では主に小型かつ多自由度の調音機構の設計について述べる。

2.1 乳児様調音器官の要件

音響学的に、声道や声帯などの調音器官の大きさが発声特性に影響することが指摘されている。また、声道形状[6]や声帯の寸法[7]は成長と共に変化しており、乳児の音声発達を理解する上で、そのような調音器官を考慮する必要性が示唆されている[8]。そこで、本研究では、乳児の調音器官の形状に関する解剖学的な報告[6,7]を参考に、調音機構を製作した。その寸法(or 仕様)を図 3 に示す。口腔内および舌の幅は、乳児の歯列の成長変化を計測した文献[9]を参考に、

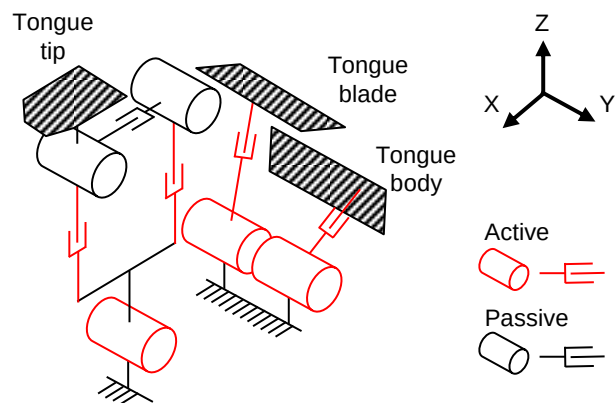
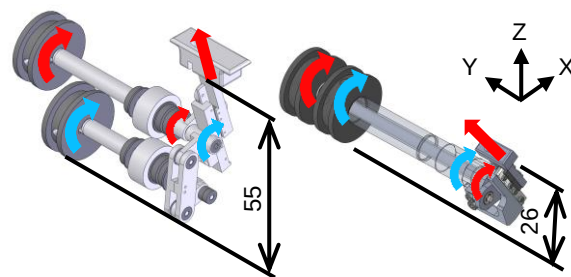


Fig. 4 DOF configuration of Lingua's tongue



(a) WT-7RII

(b) Lingua

Fig. 5 Comparison of the link mechanisms

口腔幅 30mm, 舌幅 15mm と決定した。

2.2 舌機構の小型化

舌機構は図 4 に示す回転と直動を組み合わせた計 7 自由度から成り、それらを構成するリンク機構の小型化を行った。WT-7RII では平行クランクとスライダクランクによる

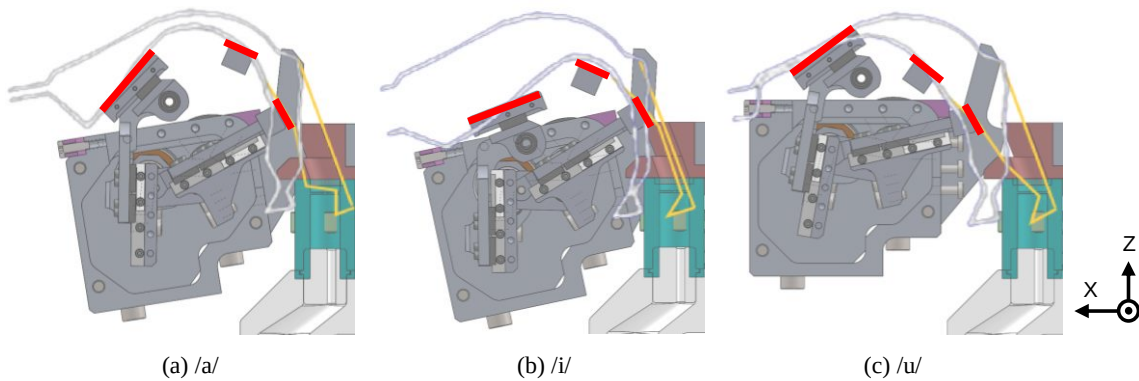


Fig. 6 Lingua's articulation imitating VLAM simulated vocal tract shapes for a 7-month-old child uttering /a/, /i/ and /u/ (yellow lines indicate shapes corrected the angle of the neck)

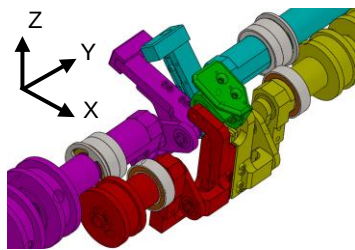


Fig. 7 Overview of the tongue mechanism

複数軸構成であったが (図 5(a)), 平行クランク部を同軸化することによって, 同自由度でありながら大幅な省スペース化を実現した (図 5(b)). 本機構では, すべての回転・直動駆動をこれと同様のリンク機構で実現している.

2.3 機構配置の小型化

機構を駆動することで再現する調音形状の基準として, 図 6 に示すように Boe et al.[10]による乳児の基本 3 母音の VLAM 調音シミュレーションの結果 (図中白色線) を参考にした. 図中の赤線は前・中・奥舌機構の先端を表している.

図 6 のように, 母音毎の調音形状とそれを再現するための機構配置を比較することで, 機構全体の可動域を決定した. その上で, 逆運動学計算により必要なリンク軌道を計算し, 十分な調音形状の再現が可能でありかつ機構全体が乳児と同じ大きさとなるように最終的な機構配置を決定した (図 7 参照).

2.4 機構強度の確保

舌機構は, 機構表面を軟材料で覆っており, 駆動に伴ってリンク機構へ負荷がかかる. そのため, 繰り返し駆動するためには, 各リンクへの十分な降伏強度を確保しなければならない. 前舌は左右の 2 方向からの両持ちとなっているが, 中および後舌は特に伸縮するスライダ部に負荷がかかる. ここでは中舌での例を述べるが, 本機では前述のとおり他の箇所でも同様の機構を採用しているため, 基本的な考え方は変わらない.

実際のリンク機構による舌表面の変形の様子を図 8 に示す. ここで, 舌表面の柔軟素材をばね要素とみなし, 図 9 のように単純なオフセットスライダクランクにばねを接続したモデルで表すことで, 降伏安全率を算出した.

製作した舌表面において想定されるリンクによる押し出

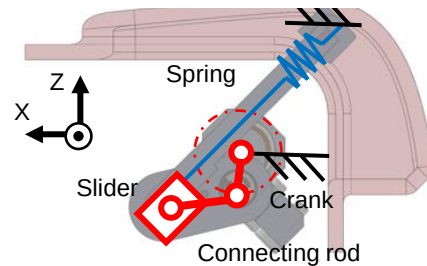


Fig. 9 Spring and linkage model of the tongue blade mechanism.



Fig. 8 Deformation of the tongue made of soft material by the tongue blade linkage

しのストローク限界である 10mm での負荷を測定した. 結果, およそ 0.3-0.4kg であったため, ばね定数 40N/m として, リンクのパーツ毎に FEM で解析を行い, 安全率 5 以上を実現した. 機構の材料はリンクがアルミ, 軸が鉄であるため, これは連続往復の調音運動に対しても十分な強度を有するといえる.

3. 発声実験

本研究では, 開発したロボットの声帯機構および舌機構によって乳児と同等に発声できるかを検証するために, 発声実験を実施した. 具体的には, それぞれの機構を駆動させた時の基本周波数およびフォルマント周波数を計測し, それを乳児のものと比較した.

3.1 基本周波数の計測結果

まず, 声帯機構を用いて基本周波数の計測を行った. 声帯機構を駆動させたときの音声の時間的変化の測定結果を図 10 に示す. 乳児の発声の基本周波数は一般的におよそ 200-2000Hz といわれており, 本機の発声はその範囲内にあるこ

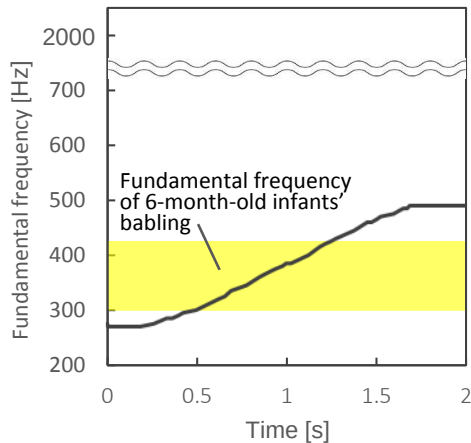


Fig. 10 Result of the fundamental frequency measurement

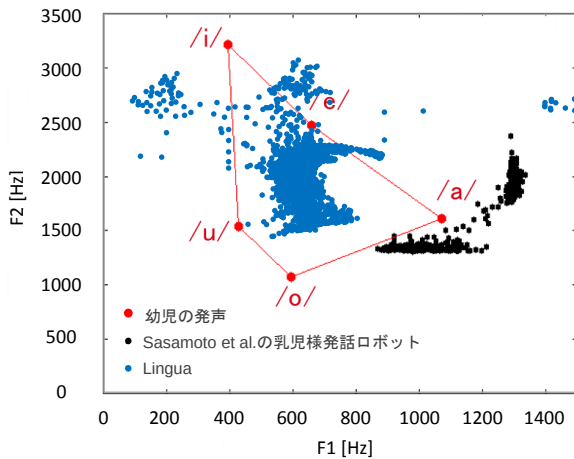


Fig. 11 F1-F2 space of the robot during vocalization

とがわかる。特に、乳児と養育者とのインタラクションを通じた音声の獲得に重要な、言語的な発声である喃語の基本周波数[11]を満たしている。

3.2 フォルマント周波数の計測結果

次に、舌機構を用いて、発声時のフォルマント周波数を計測した。本機の測定結果と Sasamoto et al.の発話ロボット、乳児発声[12]を F1-F2 空間に描いたものを図 11 に示す。図 11 に示すように、先行研究で開発したロボットは乳児の音域とはかけ離れた空間でしか発声できていないのに対し、Lingua は乳児の音域と同様の空間で発声できている。本研究で開発した舌機構を用いることで、乳児と同様の音域での発声が可能であるといえる。よって、本研究における乳児サイズと多自由度の調音機構の両立というアプローチは有効であったといえる。

4. 結言

本研究では、音声発達過程の構成的理解のための実験プラットフォームとして、乳児様のサイズと多自由度の調音機構を両立した乳児様発声ロボットを開発した。具体的には、WT-7RII の調音機構を参考に、舌を駆動する各リンク機構の構造・配置を工夫することで、WT-7RII と同等の 7 自由度を、乳児の解剖学的知見に基づく形状・サイズで実現した。

その結果、基本周波数およびフォルマント周波数について乳児の母音発話に近い発声を再現した。

今後は、モータによる調音制御、泣きを含めた高周波数の再現、子音などの多様な調音の再現、養育者役とのインタラクション実験をする予定である。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費補助金「特別推進研究」(24000012)、同省「医・工・情報連携によるハイブリッド医工学産学連携拠点整備事業－医工情報連携センター構築にむけて－」の助成を受けた。また、早稲田大学理工学術院高西淳夫研究室・スポーツ科学学術院菅田雅彰研究室より人間形発話ロボット WT-7RII の提供を受けた。ここに感謝の意を表します。

文 献

- [1] Bates, E., Dale, P. S., & Thal, D., "Individual differences and their implications for theories of language development," The handbook of child language, pp. 96-151, 1995.
- [2] Asada, M., Hosoda, K., Kuniyoshi, Y., Ishiguro, H., Inui, T., Yoshikawa, Y., Yoshida, C., "Cognitive developmental robotics: A survey", IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, vol. 1-1, pp. 12-34, 2009.
- [3] Sasamoto, Y., Nishijima, N., and Asada, M., "Towards understanding the origin of infant directed speech: A vocal robot with infant-like articulation," IEEE Third Joint International Conference on Development and Learning and Epigenetic Robotics, 2013.
- [4] 福井孝太郎, 迎田美和, 榊原菜々, 草野世大, 菅田雅彰, 高西淳夫, "人間形発話ロボットの開発-子音生成のための新型口唇機構の設計・製作", 第 27 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3K2-01, 2009.
- [5] Sawada, H., Kitani, M., & Hayashi, Y., "A robotic voice simulator and the interactive training for hearing-impaired people," BioMed Research International, 2008.
- [6] H.K. Vorperian, S. Wang, M.K. Chung, E.M. Schimek, R.B. Durtschi, R.D. Kent, A. J. Ziegert, and L.R. Gentry, "Anatomic development of the oral and pharyngeal portions of the vocal tract: An imaging study," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 125, p. 1666, 2009.
- [7] Hans Edmund Eckel, Juergen Koebke, Christian Sittel, Georg Mathias Sprinzel, Claus Pototsching, and Eberhard Stennert, "Morphology of the human larynx during the first five years of life studied on whole organ serial sections," The Annals of Otolaryngology, Rhinology and Laryngology, vol. 108-3, pp. 232-238, 1999.
- [8] Mugitani, R., & Hiroya, S. (2012). Development of vocal tract and acoustic features in children. Acoustical Science and Technology, 33(4), 215-220.
- [9] 葉山淑人, 杉村和昭, 楊静, 進士久明, 内村登, "無歯期から乳歯列完成期に至る歯列弓の成長変化に関する研究", 小児歯科学雑誌, vol. 37-3, pp. 559-572, 1999.
- [10] Boë, L. J., Badin, P., Ménard, L., Captier, G., Davis, B., Macneilage, P., ... & Schwartz, J. L., "Anatomy and control of the developing human vocal tract: A response to Lieberman," Journal of Phonetics, vol. 41-5, pp. 379-392, 2013.
- [11] Whalen, D. H., Levitt, A. G., Smorodinsky, I., & Hsiao, P. L., "Intrinsic F0 in the babbling of infants at ages 6, 9, and 12 months," The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 94-3, 1882-1883, 1993.
- [12] 粕谷英樹, 鈴木久喜, 城戸健一, "年令, 性別による日本語 5 母音のピッチ周波数とフォルマント周波数の変化," 日本音響学会誌, vol. 24-6, pp. 355-364, 1968.