

音情報を用いたロボットハンドによるタスク達成判別および水量推定

Applications of the acoustic information

in the task achievement and the water volume estimation by a robot hand

栗田 雄一, 池田 篤俊, 祖父江 厚志, 小笠原 司

Yuichi KURITA, Atsutoshi IKEDA, Atsushi SOBUE, and Tsukasa OGASAWARA

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology (NAIST)

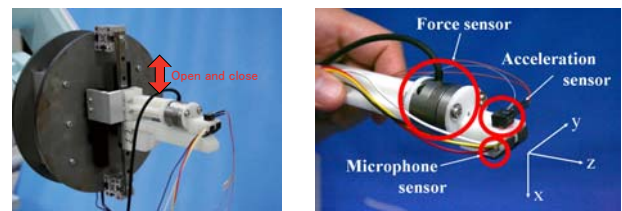
kurita@is.naist.jp

Abstract

Sounds during a work include information of task achievement and material condition. In this paper, we developed a robotic gripper that equips a sound sensor (microphone). We used this robot gripper to judge the task achievement conditions and estimate the water volume in various cups. For applications in the task achievement judgment, the sound information produced during the cable installing task is measured and the usefulness of the sound information is confirmed. For applications in water volume estimation, the glass harp acoustics is used and the experimental results show the system can estimate the water volume with high accuracy.

1 はじめに

人は視覚・力覚・触覚などさまざまな感覚器官から得た情報を有効活用して作業を行っている。そこでこれらの情報を取得するセンサを使い、作業実行や環境認識に用いるロボットやシステムも数多い [1, 2, 3]。一方、音情報の利用に関しては、ディーゼル機関の運転状態を排気音により監視する手法 [4]、音情報を利用して飲み口部分が欠けたピンと正常のピンを区別する手法 [5]、生産ラインの工作機械の監視を音情報を利用して行う手法 [6] などが提案されているものの、これらは監視を主な目的としており、対象が発生する音情報を積極的に利用して作業遂行を行うロボットはほとんどない。人の聴覚能力は力覚や触覚に比べて分解能や情報処理能力が高く、また特に注意を向けなくても情報が得られるため、日常生活や生産現場においても人は極めて自然に音を利用している。将来的にロボットが人と同じ環境で動いたり、人が扱うものと同じ



(a) Developed gripper

(b) Attached sensors

Figure 1: Microphone embedded robot gripper

製品を扱ったりすることを考えた場合、音はもっと積極的かつ有効に使われてしかるべき情報である。

音情報を利用するにあたっては、対象物や環境から音が発生することが前提になる。ここで作業遂行にあたって発生する音は大きく (1) 作業進行にあたって自然に発生する音、(2) アクティブに働きかけて発生させる音、の2種類がある。(1) はケーブルの差し込み時やプラモデルの組み立て時に生じる「カチッ」という音が該当し、(2) は打鍵検査のように中身の状態を知るために対象物を叩いたときの音が該当する。本稿ではこれら2種類の音情報についてそれぞれの効果的な利用方法を検討することを目的とし、音計測と周波数解析による作業の正誤判定実験およびガラス内の水量推定実験を行った結果について報告する。

2 音情報を用いたタスク達成判別 [7]

作業中に発生する音は作業状態や結果に関する情報を含んでおり、作業状態管理や達成状況の把握に有用である。そこで本章ではグリッパの指先に音センサ(マイクロフォン)を搭載し、作業で発せられる音情報を用いてタスク達成判別が可能かを調べた。

2.1 マイクロフォンを内蔵したロボットグリッパ

Fig. 1 に本研究で使用したロボットグリッパを示す。このグリッパは2本の指が開閉する平行グリッパであり、片

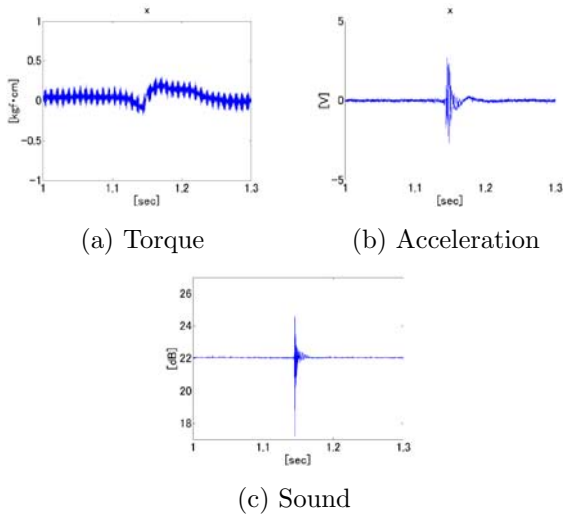


Figure 2: Measured data from the normal cable

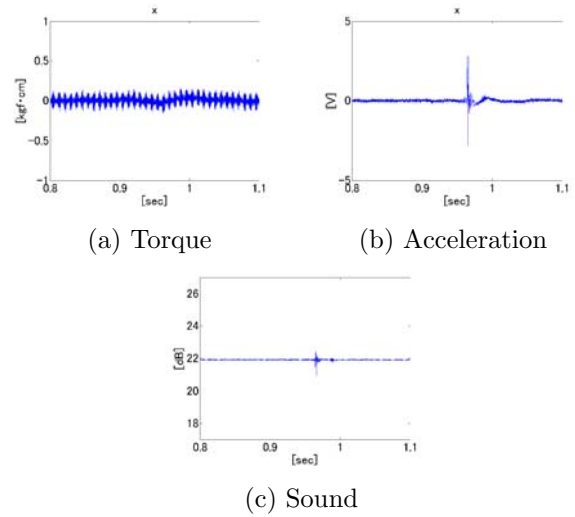


Figure 3: Measured data from the broken cable

方の指に6軸力覚センサ(ピーエルオートテック社 MICRO5/50),指先の外側の部分に小型の加速度センサ(Endevco社 Model 23)が内蔵されている.また小型アンブ内蔵シリコンマイクロフォン(Knowles社 SP0103NC3-3)を指先に埋め込む.マイクロフォンの仕様をTable 1に示す.

2.2 音を用いた作業の正誤判定

2.2.1 実験条件

ここではLANケーブルの挿し込み作業が成功したか否かを,音情報を用いて判定することを試みる.一般的な市販LANケーブルは,そのコネクタ部にツメがついており,正常に挿さると「カチッ」という音が鳴るように作られている.そこで音センサを用いてこの正常挿入時の音がなかったかを判定することで,作業の正誤判定を行う.

実験では2種類のケーブルを用いた.1つはコネクタ部のツメが正常であり,挿した後に機器に固定がされる(正常ケーブル).もう1つはツメが折れており,挿した後も固定がされず,引っ張るとすぐに抜けてしまう(異常ケーブル).このケーブル挿し込み作業を,Fig.1に示したグリップを用いて行い,このときの力センサ,加速度センサ,音センサ情報をそれぞれ測定し,正誤判定が可能かを調べた.

Table 1: Specification of the microphone sensor

Dimension	$6.15 \times 3.76 \times 1.45$ [mm]
Sensitivity	-22 ± 4 [dB]
Frequency range	100 ~ 10,000 [Hz]

2.2.2 実験結果

正常ケーブルと異常ケーブルを使って挿し込み作業を行ったときの x 軸のトルク,加速度および音データをそれぞれFig.2とFig.3に示す.これらの図から,ケーブルが挿し込まれたとき,それぞれのセンサに何らかの反応が観測されることが分かる.そこでこれらセンサデータを用いて正常ケーブルと異常ケーブルの違いを判別することを試みたが,力センサの情報は試行ごとにばらつきが大きく,また加速度センサの情報は周波数解析からも両者を精度良く判別することができなかった.

一方,音データについて周波数解析を行った結果をFig.4に示す.今回の実験設定におけるケーブル挿し込み作業においては,正常ケーブルについては2250[Hz]付近にピークを持つスペクトルが得られた一方,異常ケーブルについてはこのような特徴は見られなかった.このことは,周波数のピーク値付近のスペクトル形状を用いることで,正常・異常ケーブルの判別ができる可能性を示唆する.

そこでこのスペクトル形状の特徴を用いることにより正常・異常ケーブルの判別を行えるかを調べた.ケーブル挿し込み作業の達成判別のフローチャートをFig.5に示す.まずケーブル挿し込み時の音情報を測定し,それに対してフーリエ変換をかける.得られたフーリエ変換データをあらかじめ取得してあった正常挿入音のフーリエ変換データと比較し,ピーク周波数 ± 300 [Hz]の範囲で相関値を計算する.相関値が一定値以上であれば成功,それ未満であれば失敗と判断する.

判定の閾値を0.8として,Fig.6に示すようにマニピュレータを使った差し込み作業実験を行ったところ,正常ケーブルについては10回中8回において作業が成功したと判定し,異常ケーブルについては10回中10回を作業が失敗したと判定した.このことから本手法により90%の精度で作業達成判別が可能であることが分かった.な

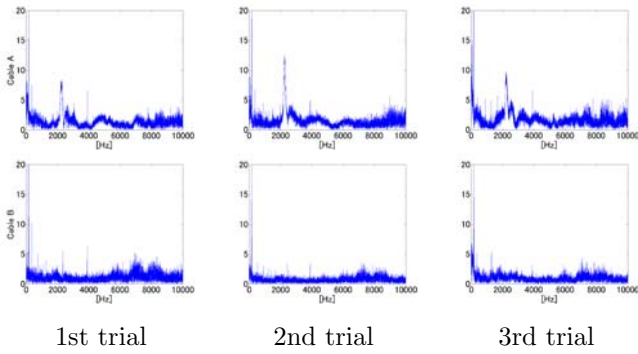


Figure 4: FFT of the sound data (top: normal cable, bottom: broken cable)

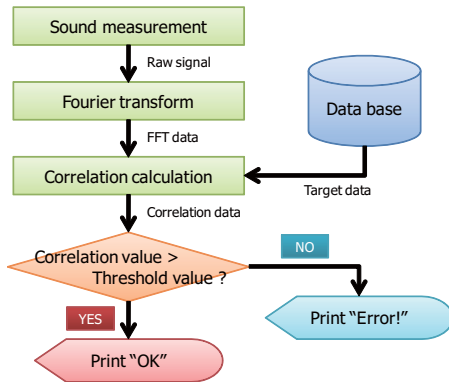


Figure 5: Flowchart of the task achievement judgment

お正常ケーブルについて挿入が成功したにもかかわらず失敗と判定した理由は、スムーズな挿し込み作業が行えず別の音が発生していたり、爪部分の剛性が弱く差し込み時の音が小さかったことが原因であった。

3 音情報を用いたグラス内の水量推定 [8]

本章では対象にアクティブに働きかけて音を発生させることで、対象物の状態推定が可能であるかを検証することを目的として、グラス内の水量推定実験を行う。

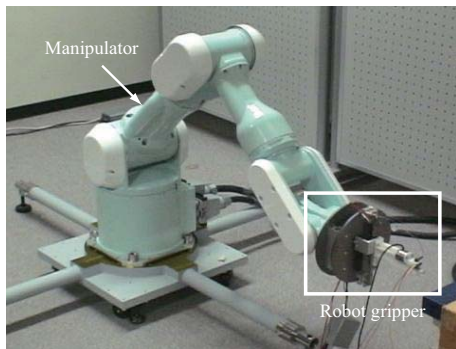
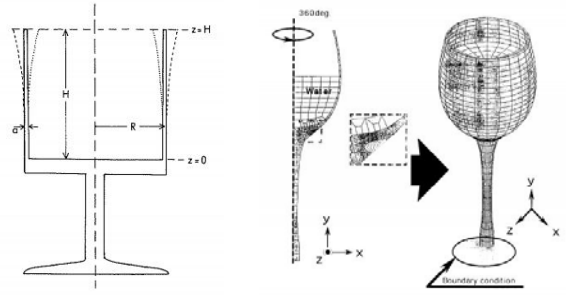


Figure 6: Cable insertion experiment



(a) French's model [9] (b) Oku's model [10]

Figure 7: Glass models

3.1 グラスハープの音響特性に関する従来研究

物理学の分野ではグラスハープの音響特性を解析的に明らかにしようとする研究が行われており、例えば French は Fig. 7(a) に示すグラスの基本振動モードを力学的性質から解析的に調べ、最終的に次の関係が成り立つことを示している [9] :

$$\left(\frac{f_0}{f_h}\right)^2 \approx 1 + \frac{\alpha \rho_l R}{5 \rho_g a} \left(\frac{h}{H}\right)^4 \quad (1)$$

ここで H はグラスの高さ、 h は水で満たされている高さ、 f_0, f_h はそれぞれ空のときおよび高さ h まで水で満たされたグラスの振動周波数、 ρ_l, ρ_g はそれぞれ水およびグラスの密度、 a, R はそれぞれグラスの厚みと半径、 α は定数である。このような解析モデルに基づく音響特性の導出結果は元のモデルと同一の形状・特性をもつグラスに対してはよく一致するものの、異なる形状・特性を持つグラスに対しては必ずしも一致せず、また複雑な形状のグラスに対する一般的な解析モデルを導出することは難しい。そこで Oku らは有限要素解析 (FEM) により実験的によく一致する音響特性の導出法を提案している [10]。Oku らは Fig. 7(b) に示す形状のグラスの音響特性について、次式の関係を得たとした :

$$\frac{f_h}{f_0} = 1 - 0.5 \left(\frac{V_h}{V_H}\right)^3 \quad (2)$$

ここで V_h, V_H はそれぞれ高さ h まで満たされた水量と一杯まで満たされた水量である。

そこで本稿ではこれら従来研究の結果を用いて、次章に示すマイクロフォンを内蔵したグリッパと5種類のグラスを使って周波数の計測からグラス内水量の推定が可能であるかを調べる。

3.2 音を用いた水量推定

3.2.1 実験条件

Fig. 8 に実験に利用するグラスを示す。本稿では、ガラス製 (glass1, glass2)、陶器製 (ceramic1, ceramic2)、ステンレス製 (stainless) の5種類を使用した。これらのグ



Figure 8: Glasses used in the experiment and their full capacity

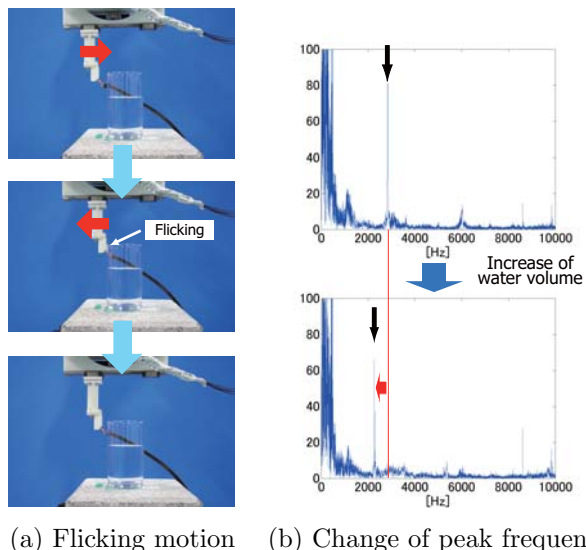


Figure 9: Flicking by the robot gripper

ラスの縁に Fig. 9 に示すようにロボットグリッパの先端をはじくようにあてることで振動を発生させ、そのときの音をマイクロフォンにより計測する。計測した尾情報にフーリエ変換をかけた上で、本稿では振動の1次モードに相当するピーク値をガラスの振動周波数として、まず空の状態における振動周波数 f_0 を手動で設定する。次に水を 20 [ml] ずつグラスにそそぎ、同様にロボットグリッパによるはじき動作を行うことで振動周波数の変化を計測する。ここで Oku らの式 Eq. 2 によれば、水を入れた状態のガラスの振動周波数 f_h は、空の状態の振動周波数 f_0 の半分以下にはならない。そこで f_h は $[f_0/2 \sim f_0]$ の範囲における最も大きな周波数のピーク値として自動取得する。

3.2.2 実験結果

前節で説明した方法により各ガラスの音響特性変化を計測した。各ガラスの水量と周波数ピーク値との関係を Fig. 10 に示す。ガラスによって基本振動周波数が異なること、そして水量が増えるにつれて周波数のピークが徐々に下がっている様子が確認できる。

こうして得られたガラスの音響特性が、従来の解析的・

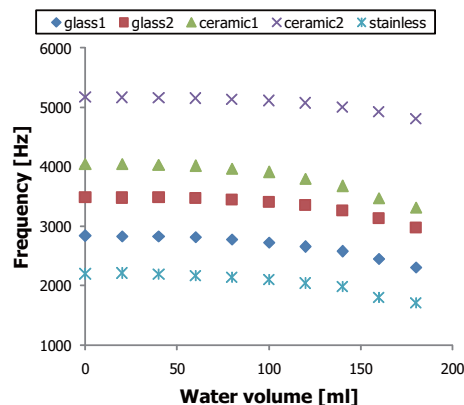


Figure 10: Relationship between the water volume and the peak frequency

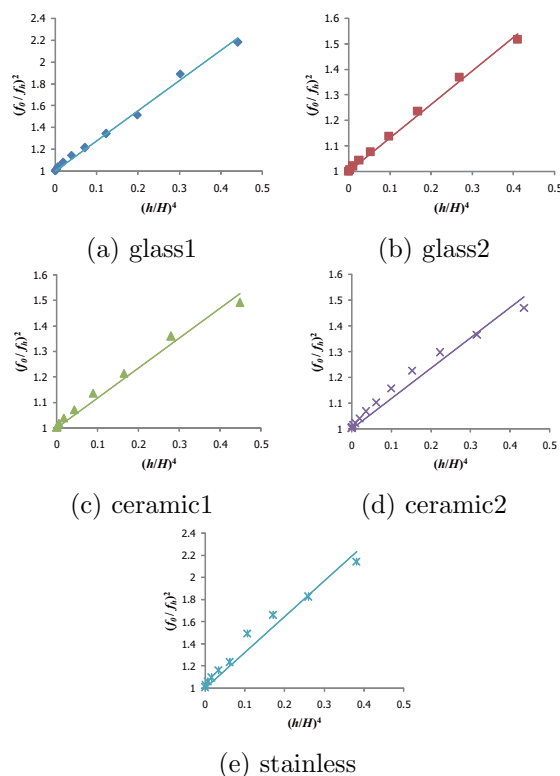


Figure 11: Results of French's estimation

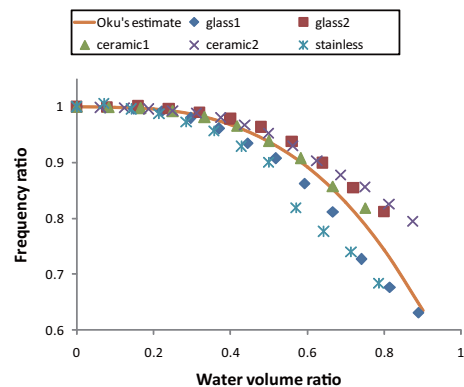


Figure 12: Relationship between the volume ratio and the frequency ratio based on Oku's model

Table 2: RMSE[%] between the measured data and the fit curve based on the proposed method

	Estimation by all points			Estimation by 3 points		
	a	b	RSME	a	b	RMSE
glass1	0.52	2.49	3.70	0.50	2.54	5.88
glass2	0.38	3.06	1.04	0.38	3.15	1.32
ceramic1	0.41	2.75	1.00	0.41	2.84	1.40
ceramic2	0.29	2.47	1.47	0.29	2.61	2.13
stainless	0.57	2.31	3.94	0.58	2.50	5.59

実験的な音響特性関係式と一致するかを確認する。Fig. 11 は各ガラスの $(\frac{f_0}{f_h})^2$ と $(\frac{h}{H})^4$ との関係を示した図であり、また図中の直線は最小 2 乗法で計算した縦軸との切片が 1 の近似直線である。French の解析式が当てはまるのであれば、これらの関係は近似直線上にのるはずである。図を見ると、ガラス製のガラス (glass1, glass2) は比較的良好に一致するものの、それ以外のガラスでは French の式の適用は困難であることが予想される。

次に Fig. 13 は横軸に水量変化率 $\frac{V_h}{V_H}$ 、縦軸に周波数変化率 $\frac{f_h}{f_0}$ をとって両者の関係を示した図であり、図中の曲線は Oku の関係式 Eq. 2 を当てはめた結果を示している。水量が少ないうちは周波数変化が少ないが、半分以上を超えた辺りから急激に周波数変化が起こる性質が共通して確認できる。Oku らの式はこの性質をよく表現できている一方、ガラスの形状や特性を補正する変数が式中に存在せず、個々のガラスの違いをそのままでは表現できない。

そこで本稿では、Oku らの式を拡張し、変数 a, b を使って以下の関係式をたて、これら変数を各ガラスがもつパラメータとして最小 2 乗法により推定することを提案する。

$$\frac{f_h}{f_0} = 1 - a \left(\frac{V_h}{V_H} \right)^b \quad (3)$$

この関係式に基づき、それぞれのガラスのパラメータを推定した結果を適用した図を Fig. 13 に、推定結果および RMSE 誤差を Table 2 に示す。ここで図中の実線は計測したすべての点を利用してパラメータ推定した結果を、破線は水量がゼロ、半分、いっぱいの状態の 3 点のみを利用してパラメータ推定した結果を意味する。このように提案手法によりガラスごとの音響特性をよく表現できていることが確認できる。またパラメータ推定においては 3 点のみの情報だけを使っても精度に大きな違いがないことも確認できる。これは、あらかじめ水量がゼロ、半分、いっぱいの状態の 3 点の振動周波数さえわかれば、音情報計測から水量を精度よく推定できることを意味する。

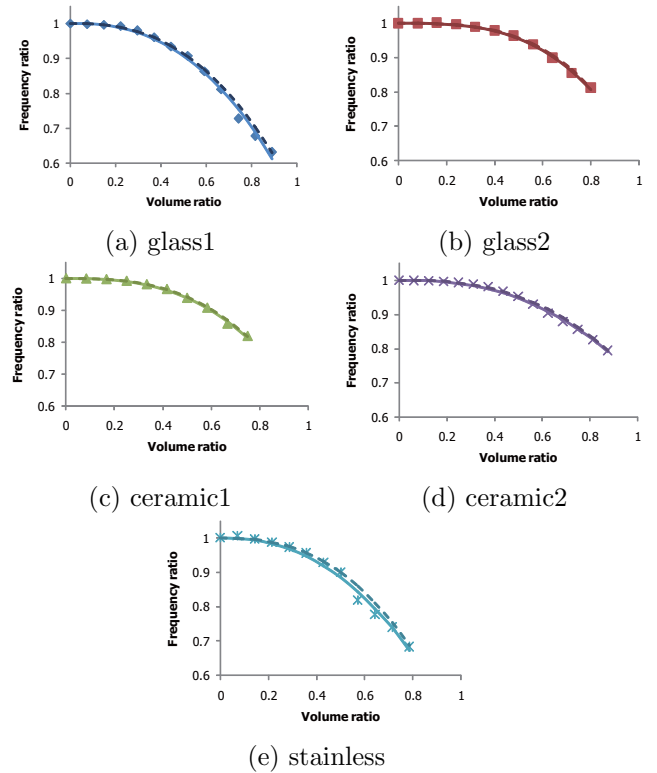


Figure 13: Results of the proposed estimation method

3.3 ロボットフィンガのはじき動作による水量推定

3.3.1 マイクロフォン内蔵ロボットフィンガ

ここでは Fig. 14 に示す多指ロボット [11] の指にマイクロフォンを装着し、ガラスの縁をはじいた時の音を計測することで、他のセンサ情報を一切使わずにガラス内の水量を推定する実験を行う。

3.3.2 実験条件

Fig. 8 に示した 5 種類のガラスに対して、20 [mℓ] ずつ水量を増やしながらかはじき動作を行って音情報計測およびフーリエ変換を行い、3.2.1 節と同様の手法でピーク周波

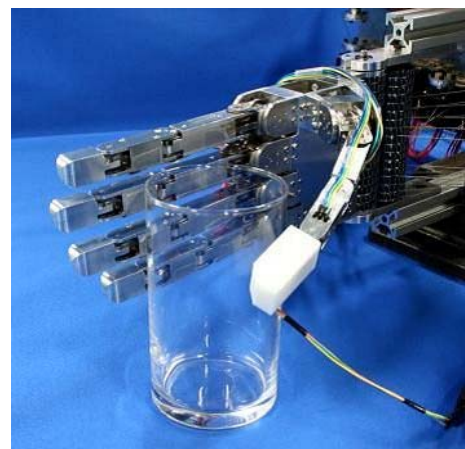


Figure 14: Anthropomorphic robot hand with a microphone sensor

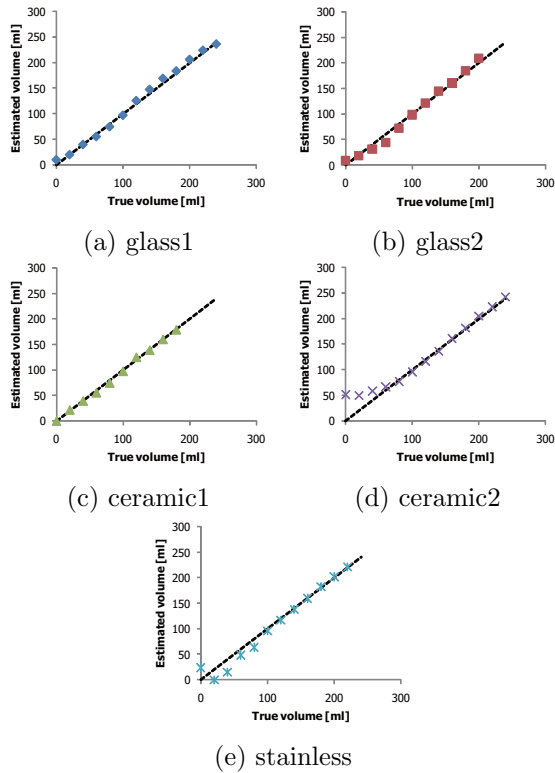


Figure 15: Experimental results of the water volume estimation

数の自動取得を行った。また得られたピーク周波数から、Table 2 に示したパラメータのうち、水量がゼロ、半分、いっぱいの 3 状態の周波数から推定したパラメータ値と、Eq. 3 とを利用して水量推定を行った。

3.3.3 実験結果

水量の真値と推定結果の関係を Fig. 15 に、真値との誤差の平均およびその最大容量との比を Table 3 に示す。これらの結果から、水量にして 2~10 [mℓ] 程度、割合にして 1~3 [%] 程度の誤差で水量推定が可能であることが確認できた。なお推定誤差は水量が少ないときに比較的大きくなりやすい。これは Fig. 13 に示したように水量が少ないときはグラスによらず周波数変化が少ないため、振動周波数の計測誤差が水量推定結果に大きく影響することが原因と考えられる。

Table 3: Estimation error by the robot hand

	Average [mℓ]	volume ratio [%]
glass1	4.85	1.80
glass2	5.74	2.30
ceramic1	2.15	0.90
ceramic2	10.15	3.17
stainless	9.32	3.33

4 おわりに

本稿では (1) 作業進行にあたって自然に発生する音、(2) アクティブに働きかけて発生させる音に着目し、これら 2 種類の音情報についてそれぞれの効果的な利用方法を検討した。実験の結果、作業時に発する音のスペクトル波形を用いることで、ケーブル差し込みの正常・異常を 90 % の精度で判別できることが分かった。またグラスハープの音響特性を用いることで、3 % 程度の誤差でグラス内の水量推定が行えることが分かった。今後は、音のアクティブセンシング技術を用いることで、作業遂行をより柔軟かつロバストに行えるロボットシステムの開発に取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] J. Park and G. Kim, “Development of the 6-axis Force/Moment Sensor for an Intelligent Robot’s Gripper,” *Sensor and Actuators A*, vol.118, No.3, pp.127-134, 2005.
- [2] A. Morales, P. J. Sanz, A. P. del Pobil, and A. H. Fagg, “Vision-based Three-finger Grasp Synthesis Constrained by Hand Geometry,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol.54, No.6, pp.496-512, 2006.
- [3] P. A. Schmidt, E. Mael, and R. P. Wurtz, “A Sensor for Dynamic Tactile Information with Applications in Human-robot Interaction and Object Exploration,” *Robotics and Autonomous Systems*, vol.54, No.12, pp.1005-1014, 2006.
- [4] 水谷博, 木村隆一, 濱本宏: “音による船用ディーゼル機関の燃料弁噴射圧の異常検出”, *日本音響学会誌*, Vol.43, No.8, pp553-563, 1987.
- [5] 岡田賢, 上條哲平, 石川稜威男: “ニューラルネットワークを用いた打音の特徴抽出”, *電子情報通信学会技術研究報告*, Vol.102, No.398, pp.1-6, 2002.
- [6] 大澤拓也, 陳連怡, 中村隆, 藤本英雄: “切削異常検出のための加工音の解析”, *日本機械学会東海支部総会講演会講演論文集*, Vol.2003, No.52, pp.187-188, 2003.
- [7] 祖父江厚志, 池田篤俊, 栗田雄一, 高松淳, 小笠原司, “音による作業タスク達成判別のためのマイクロフォングリッパ”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, RSJ2008AC1K3-06, 2008.
- [8] 栗田雄一, 祖父江厚志, 池田篤俊, 小笠原司, “グラスハープの音響特性を利用したはじき動作による水量推定”, 第 27 回ロボット学会学術講演会, 1A3-04, 2009.
- [9] A. P. French: “In Vino Veritas: A study of wineglass acoustics” *American Journal of Physics*, 51, 8, pp.688-694, 1982.
- [10] K. Oku, A. Yarai, and T. Nakanishi: “A New Tuning Method for Glass Harp Based on a Vibration Analysis that Uses a Finite Element Method”, *Journal of the Acoustical Society of Japan (E)*, 21, 2, pp.97-104, 2000.
- [11] Y. Kurita, Y. Ono, A. Ikeda, and T. Ogasawara, “Human-sized Anthropomorphic Robot Hand with Detachable Mechanism at the Wrist,” 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2271-2276, 2009