Vol.2015-MBL-74 No.12
Vol.2015-UBI-45 No.12
2015/3/2

超音波の反射波情報から対象物の材質を推測する手法の基礎的検証
Not only measuring distance to the target but also comprehending what the target is

秋田 純一[1,a)]　小松 孝徳[2]

概要：一般的な超音波センサは，対象物に向け発信した超音波の反射波を受信するまでの時間を計測し，対象物までの距離を検出するものである．つまり，反射波がどのような形状をしているのかといった情報は，超音波センサでは使用されていないのが現状である．しかしその反射波には，対象物の表面で反射する際に，対象物に関する材質などの物理的な情報を含んでいることが期待される．本稿では，超音波センサの反射波の波形やスペクトルなどの詳細な情報を分析することで，対象物までの距離だけではなく，その材質をも同時に測定できるかどうかについての基礎的な検討について報告する．

1. はじめに

物体までの距離を非接触で測定する方法は，赤外線や超音波を用いる方法など，これまで様々な手法が提案されている．特にその中でも，超音波の反射波の到達時間を利用する計測方法は，対象物の形状や材質などの性質に依存せずに安定かつ高精度な計測が可能であることから，分野を問わず様々な場面で使用されている．例えば生産工程での液面高計測や移動ロボットの障害物検知，魚群探知機などですでに実用化されており，さらに盲人用の歩行補助具などの応用分野も開拓されている [*1]．

このように，超音波による距離計測技術は様々な分野で応用されているが，それに加えて，対象物のより詳細な情報をその反射波から得ることが可能であることが報告されている．例えば植阪・小齊 [1] は，視覚障碍者の歩行を支援する電子移動補助具（ETA：Electronic Travel Aids）[2] として製品化されている K Sonar [*2] を用いることで，自らの周囲の対象物までの距離のみならず，その対象物の素材を弁別（具体的には，「表面が滑らかなもの」であるのか「表面が柔らかく凹凸があるもの」の弁別）が可能であると報告している．この K Sonar という製品は，超音波の反射波を可聴音に変換することで，音の高低によって距離を，音の有無によって方向を示すものであるが，その際に，素材の違いを「表面が滑らかなものは，キンキンとした硬い音が，柔らかい凹凸のあるものは，ザワザワした柔らかい音」といった音色の差異として理解することができると報告している．つまりこのシステムは，対象物（障害物）までの距離をフィードバックすることを目的に設計されていたものの，対象物までの距離のみならずその対象物の材質までフィードバックするという想定外の機能をも有していたといえる．

すなわち，超音波を用いる非接触計測においては，距離計測に用いられる反射波の到達時間の情報に加え，反射波の波形やそれがもつ情報を解析することで，その対象物の材質などの高次の情報を得ることが可能と考えられる．本研究では，様々な材質の対象物に照射した超音波の反射波がもつ情報の分析から，その波形の物理的特徴と対象物の材質との間の関係を把握することを目的とし，本稿ではその基礎的な検証結果について述べる．

2. 関連研究

超音波を用いて対象物の情報を非接触で得る技術は，前述のような反射波到達までの時間情報を用いる距離計測がよく知られている．ロボットの障害物検知のような単一点

[1] 金沢大学
Kanazawa University, Kadoma, Kanazawa, Ishikawa 920–1192, Japan
[2] 明治大学
Meiji University, Nakano 4-21-1, Tokyo 164–8525, Japan
[a)] akita@is.t.kanazawa-u.ac.jp

[*1] 例えば，みるぶる http://www.affection-j.com/miruburu.html など
[*2] http://www.ksonar.com/

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

に対する計測に加え，医療用途における超音波イメージング（いわゆる超音波エコー検査）では，反射波の到達時間の二次元分布情報を用いて，二次元の距離情報分布（いわゆるデプスマップ）を得ている．この手法では，対象物による超音波の反射のみならず，物体内（体内）で性質の異なる材質の境界面において超音波が反射されることやその特性の差異も利用することで，奥行き方向の材質の分布の情報を得ることができる．同様の手法は，金属内部の亀裂などの計測でも用いられている．

その一方，超音波の発信・受信機構を生来の器官として備えている生物も存在している．例えばコウモリやイルカは，超音波を発する発信器と，その反射波の受容器を有しており，獲物の探索や移動の際の障害物の検知を行っていることが知られている．特に獲物の探索においては，発する超音波の周波数を動的に変えることで照射する超音波の周波数帯域を広げ，さらに対象物（獲物）の移動に伴う反射波のドップラーシフト量をも計測することで，対象物の移動速度や移動方向，さらには大きさなどの多様な情報を取得していると示唆されている [3], [4]．このような生体が持つ機能を模擬し，特に反射波の時間情報に注目した上で，個々の魚の大きさや種別を識別できるように魚群探知機の機能を拡張しようとする研究もある [4]．

3. 超音波計測

3.1 測定原理

図 1 に，一般的な超音波を用いる計測システムの構成を示す．超音波発信子 TX は所定の周波数で振動し，それが空気の振動を生むことで超音波を発生する．実際に発生する超音波は，発信子に加える電圧波形に加えて，発信子の周波数特性にも影響を与えている．また発信子に加える駆動波形は，時間とともに周波数を変化させる（チャープ信号）ことで，超音波の周波数特性を広げることも可能である．

ここで発信された超音波は空間中を伝播し，様々な物体に衝突して反射波を生じる．この反射波を生じるのは，計測対象の物体 Obj に限らず，壁などの測定対象ではない物体も含まれる．ただし超音波は，比較的直進性が高いため，発信子の正面にある物体以外の物体からの反射波は，非常に弱くなる傾向がある．この反射波が，観測者がもつ受信子 RX に到達すると，その空気振動によって受信子に電圧が発生し，これが観測電圧波形となる．

一般に受信される反射波は，測定対象の物体に反射しているため，測定対象の何らかの情報を含んでいることになる．このうち，最もよく用いられるのは，反射波が到達するまでの時間であり，これを計測することで対象物までの距離を求めることができる．この場合は，反射波の波形や振幅などの情報は重要ではなく，受信機では反射波の到達の有無のみを観測すればよいため，受信波の波形の歪を考慮しなくてもよいなど，測定の高い安定性を容易に得られることになり，幅広い応用分野で利用されている．

さらに反射波は，対象物体での反射を生じる際に，対象物体の物理的な性質の影響を受けることが考えられる．例えば，空気中で伝搬しやすい 40 kHz の超音波の波長は約 9 mm であることから，反射波は対象物体の表面の 10 mm 程度の物理的構造の影響を受けることが考えられる．さらに反射という現象を，単なる波の反射のみならず，到達波が対象物体での物理構造を励起し，それによる二次生成波の生成と考えることもできる．この理解によれば，反射波は対象物体の物理的な性質，例えば弾性係数や水分含有量などの情報も含んでいると考えられる．なお空気中では周波数の高い超音波ほど減衰することが知られており，例えば 40 kHz の超音波は，1/10 に減衰する距離が 20 m 程度であるのに対し，200 kHz の超音波では 3 m 程度であり，周波数が高い超音波ほど，空気中の非接触計測に用いるのは困難となる．

以上のように，超音波の反射波そのものの性質を詳細に分析することで，対象物体のより詳しい性質を非接触で計測することが，原理的には可能であると考えられる．

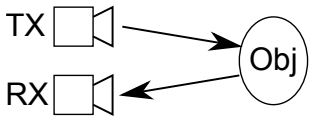


図 1 超音波を用いる非接触計測システムの一般構成
Fig. 1 System configuration of measurement using ultra-sonic wave

3.2 反射波の解析方法

3.1 節で述べたように，対象物体の詳細な物理的な性質を計測するためには，反射波の特性を計測することになる．本稿では，送信波として，時間と共に性質の変化しない定常的な超音波波形を用いると仮定する．すなわち送信波の振幅や波形形状，周波数は一定であるとする．そのため，受信波も，照射後十分時間がたてば，定常的な波形信号となるとみなすことができる．対象物体の物理的な性質は，反射波の周波数特性に反映されると考えられるため，反射波の周波数スペクトルを求め，それがもつ特徴量と，対象物体の物理的な性質との関連を見いだすように方針を設定した．

図 2 に，40 kHz の正弦波で駆動した送信波から対象物体での反射で得られた反射波のスペクトルの例を示す．送信周波数と同じ基本波である 40 kHz の成分以外に，その整数倍の周波数の高調波や，それらの間の周波数の成分が存在することがわかる．このような周波数スペクトルの特徴をあらわす指標の一つとして，次式で定義される THD (Total Harmonic Distortion) が知られている．

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

$$\mathrm{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \cdots + V_n^2}}{V_1} \quad (1)$$

ここで V_1 は，周波数スペクトルにおける基本波成分の電圧振幅であり，V_i はその i 倍の周波数の成分の電圧振幅である．すなわち THD は，正弦波からの歪み度合いを表す指標ということができ，この値が小さいほど正弦波に近くなる．

この THD に似た指標として，次式で定義される THD+N と呼ばれる指標も知られている．

$$\mathrm{THD+N} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \cdots + V_n^2 + N^2}}{V_1} \quad (2)$$

ここで N は，基本波とその整数倍の周波数以外の周波数成分の和であり，一般には増幅器のノイズ成分などを含む．この THD+N は，基本波の整数倍の周波数成分以外の周波数成分も考慮した，正弦波からの歪み度合いの指標と考えることができる．

さらに周波数スペクトルの特徴を表す他の指標として，次式で定義する $\mathrm{S_1NR}$(Primary Signal to Noise Ratio) を考える．

$$\mathrm{S_1NR} = \frac{V_1^2}{P_{\mathrm{total}}} \quad (3)$$

ここで P_{total} は，基本波を含む全周波数帯域の成分の電圧の二乗和，すなわち反射波全体がもつパワーである．なおパワーは電圧の二乗に比例するため，$\mathrm{S_1NR}$ の定義では，次元をそろえるために分子では V_1 を二乗している．

これらの指標は，いずれも基本波とそれ以外の周波数成分の関係を表す指標といえるが，これらは，対象物が超音波を反射する際の情報を含んでいることが期待される．すなわち，照射された超音波が対象物体にぶつかり，散乱波や反射波という二次波が生成され，それらが受信器に到達されて観測されるが，その際，それらの二次波の周波数特性は，対象物体の振動特性の非線形性などの効果を含んでいると考えられる．そしてその特性は，対象物体の物理的性質（例えば硬さや表面のざらざらさ，水分含有量など）を反映しているとも考えられる．

前述の周波数スペクトルの特徴量をあらわす指標のうち，次式で定義される THD と THD+N の差 THD_N は，基本波とその高調波成分以外の間の周波数成分の比率をあらわす指標とみることができるが，これは上記のように対象物体の物理的性質を反映していることが期待される．

$$\mathrm{THD_N} = (\mathrm{THD}) - (\mathrm{THD+N}) \quad (4)$$

また $\mathrm{S_1NR}$ も，基本波以外のすべての周波数成分の比率をあらわす指標であることから，やはり対象物体の物理的・化学的性質を反映していることが期待される．

次節では，いくつかの性質の異なる対象物体に対して，この THD_N と $\mathrm{S_1NR}$ を計測し，それらと対象物の物理的性質との関連を検証した実験結果について述べる．

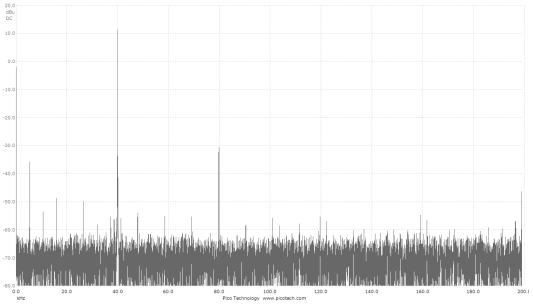


図 2　反射波の周波数スペクトルの例
Fig. 2　Example of powe spectrum of received ultrasonic wave

4. 評価実験

4.1 実験概要

様々な物理的性質を持つ対象物を用意した上で，これらの対象物に超音波を照射し，その反射波を計測した上で THD_N および $\mathrm{S_1NR}$ を計測する実験を行った．本実験においては，以下のような 13 種類の対象物を用意した．

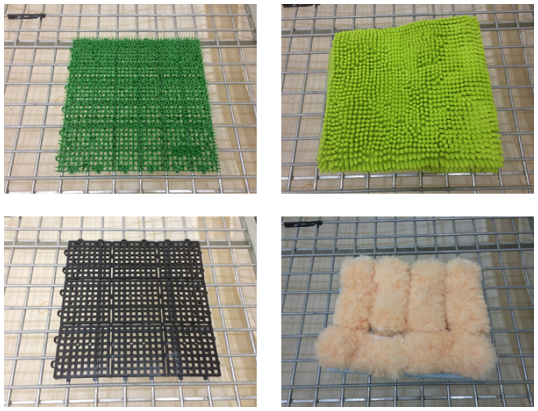


図 3　実験で仕様した対象物の一部：（左上）人工芝，（右上）バスマット，（左下）プラスチックマット，（右下）クイックルワイパー
Fig. 3　Four out of 13 materials used in this experiment.

- 吸音材（図 6 参照）
- バスマット（図 3 右上参照）
- 鉄板
- スポンジ（肌理の細かい白色のウレタン製のもの）
- クイックルワイパー（図 3 右下参照）
- 黒プラスチックマット（図 3 左下参照）
- スタイロフォーム
- 人工芝（図 3 左上参照）
- 吸振ゴム
- ベニヤ板
- アクリル板
- コルク板
- ポリプロピレンフィルム（A4 サイズの書類を収納するクリアファイル）

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

これらの対象物は，我々の生活空間において日常的に使用されている素材の中から，広範囲に選択されたものである．そしてこれらの対象物に対して，超音波を照射し，その反射波を計測した．超音波の送信と受信は，図 4 のような超音波の送受信機を製作して用いた．送信側では，マイコン (Cypess 社・CY8C24123) によって 40 kHz の正弦波信号を発生し，これを電流駆動能力の高いオペアンプ (Linear Technology 社・LT1632) によって 20 Vp-p まで増幅し，超音波振動子 (SPL 社・UT1612MPR) を駆動して超音波を発生させた．なお，この超音波振動子の半値減衰角度は 50 [deg] である．対象物体からの反射波は，超音波振動子 (SPL 社・UR1612MPR) によって受信され，その信号をオペアンプ (National Semiconductor 社・LM358) による非反転増幅回路によって 1000 倍に増幅され，出力された．この出力信号を，PC 接続型オシロスコープ (Pico Technology 社・Picoscope2205A) によって取得し，PC 上で周波数スペクトルを求めた．なお超音波送信器と受信器の間隔は 10 [cm] とした．

前述の対象物を，超音波送信器と受信器の中央の前方 265 [mm] に，送信器と受信器を結ぶ線分に対して垂直な位置に設置した．なお，対象物の高さおよび幅は 300 [mm] に統制した．対象物は台座上に設置した万力で固定したが，対象物単独で自立できない素材（例．バスマット，クイックルワイパーなど）の場合は，スタイロフォームに巻き付けたり，貼りつけるなどして垂直に固定された．超音波センサと対象物との具体的な位置関係を図 5 に示す．

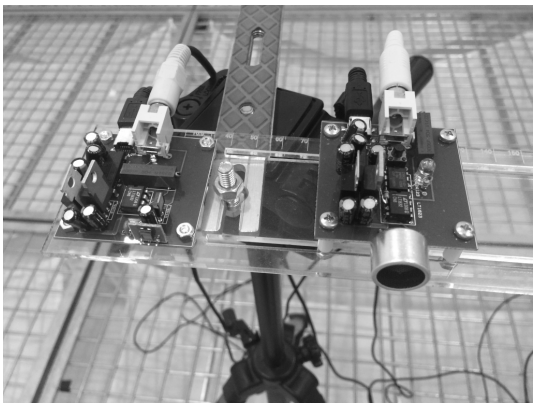


図 4　製作した超音波の送受信器
Fig. 4　Developed ultrasonic transmitter and receiver

なお，データの測定は金沢大学内に設置された無響室にて実施され，実験系は壁面から 2[m] 以上離れている．また対象物を設置してから十分の時間を置いた後に定常状態と判断されてから測定を行った．

4.2　結果・考察

それぞれの素材の対象物に対して求められた THD_N と $\mathrm{S_1NR}$ の値を表 1 と表 2 に示す．なお各素材に対して，時

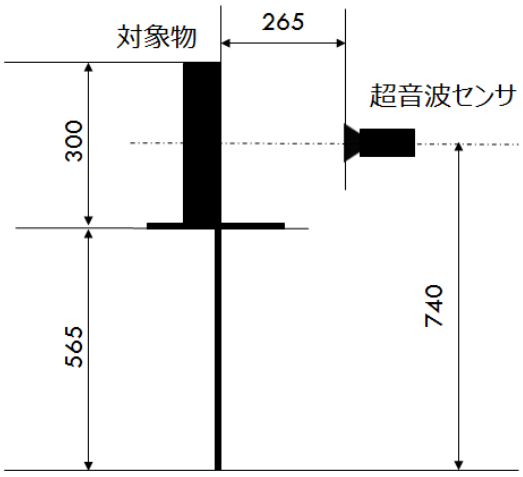


図 5　超音波センサと対象物の位置（単位：[mm]）
Fig. 5　Experimental setting of an ultrasonic sensor and an object

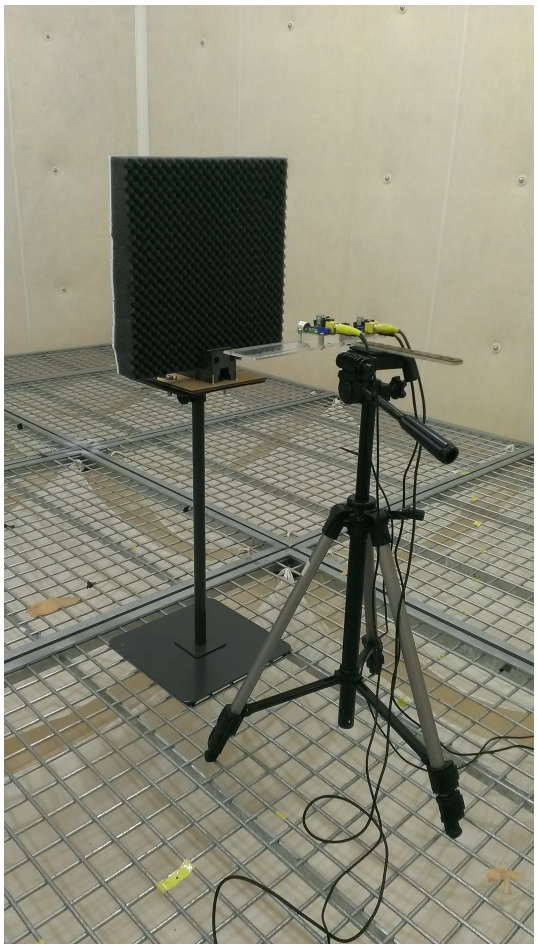


図 6　実験風景（対象物：吸音材）
Fig. 6　Experimental scene (Object: acoustic absorption material)

間をおいて 2 回の計測を行い，それぞれの値と，両者の平均値をあわせて示した．

表 1，表 2 の結果から，それぞれの 2 回の測定の平均値を，THD_N の小さい順に並べかえて並べたものを表 3 に示

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

Vol.2015-MBL-74 No.12
Vol.2015-UBI-45 No.12
2015/3/2

表 1　計測された THD_N の値 (単位: [dBc])
Table 1　Measured THD_N

対象物	1 回目	2 回目	平均
吸音材	-9.23	-9.88	-9.56
バスマット	-10.74	-10.19	-10.47
鉄板	-3.16	-2.42	-2.79
スポンジ	-10.25	-9.91	-10.08
クイックルワイパー	-8.26	-7.99	-8.13
黒プラスチックマット	-6.55	-3.41	-4.98
スタイロフォーム	-2.48	-2.19	-2.34
人工芝	-7.89	-3.28	-5.59
吸振ゴム	-4.24	-4.35	-4.29
ベニヤ板	-3.50	-3.75	-3.63
アクリル板	-4.19	-3.86	-4.03
コルク板	-2.57	-3.25	-2.91
ポリプロピレンフィルム	-3.52	-1.89	-2.71

表 2　計測された S_1NR の値 (単位: [V^2/W])
Table 2　Measured S_1NR

対象物	1 回目	2 回目	平均
吸音材	2.20	2.66	2.43
バスマット	2.28	2.31	2.29
鉄板	4.00	6.21	5.11
スポンジ	2.11	2.56	2.34
クイックルワイパー	1.92	3.16	2.54
黒プラスチックマット	3.82	3.54	3.68
スタイロフォーム	5.95	5.26	5.61
人工芝	2.24	5.07	3.66
吸振ゴム	3.22	2.73	2.98
ベニヤ板	5.07	4.20	4.63
アクリル板	3.53	3.76	3.64
コルク板	5.20	4.76	4.98
ポリプロピレンフィルム	3.48	6.34	4.91

表 3　THD_N と S_1NR の小さい順の順位
Table 3　Sorted order by the values of $THD_N$and S_1NR

	THD_N 順位	S_1NR 順位
バスマット	1	1
スポンジ	2	2
吸音材	3	3
クイックルワイパー	4	4
人工芝	*5*	*7*
プラスチックマット	*6*	*8*
吸振ゴム	7	5
アクリル板	8	6
ベニヤ板	9	9
コルク板	10	11
鉄板	11	12
ポリプロピレンフィルム	*12*	10
スタイロフォーム	13	13

す．この結果から，まず傾向として，THD_N，S_1NR がいずれも小さな値をとる素材は，バスマット，スポンジ，吸音材，クイックルワイパーであり，これらはいずれも，やわらかい素材，あるいは外力に対して変形しやすい素材といえる．逆に THD_N，S_1NR がいずれも大きな値をとる素材は，スタイロフォーム，鉄板，コルク板，ベニヤ板であり，これらはいずれも，変形しにくい素材といえる．すなわち THD_N，S_1NR は，対象物体の素材の硬さ（変形しやすさ）という物理的特徴を反映していることが示唆される．

また表 1，表 2 では，1 回目と 2 回目で測定値に大きな差があるところがあることもわかる．例えばプラスチックマットや人工芝は，THD_N, S_1NR いずれも両者で大きな差がある．またポリプロピレンフィルムでは，THD_N で大きな差がある．これらは計測誤差の可能性もあるが，プラスチックマットや人工芝はいずれも表面に数 [mm]〜数 [cm] の大きさの凹凸がある素材であることから，超音波の反射特性が，素材の材質に加えて，表面の形状による乱反射などの物理的な構造の影響を受けている可能性が考えられる．この影響は，対象物と超音波照射の位置関係を時間と共に変化させながら測定し，その測定値の変化を観察することで，ある程度は補正が可能であると考えられる．

1 回目と 2 回目で測定値に大きな差がある素材（表 3 中の斜体・下線で示した箇所）を除くと，THD_N，S_1NR の順位が入れ替わる素材は，コルク板・鉄板のグループと，ポリプロピレンフィルムのところである．これらの差は，THD_N と S_1NR に反映されている物理的性質の差であると考えられるが，それらの詳細は，今後の課題としたい．

5. おわりに

本稿では，一般的な超音波センサでは注目されていなかった反射波の形状に注目し，そこから対象物の物理的特徴が把握できるかについて基礎的な検討を行った．その結

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan

果，反射波における基本波とその高調波成分以外の周波数成分の比率を表す THD_N および S_1NR という二つの指標に注目することで，対象物のおおよその物理的特徴が把握できることが示唆された．具体的には，これらの両方の値が小さい場合，対象物は柔らかく，変形しやすい素材であり，これらの値が大きい場合，対象物が固く変形しにくい素材であるという傾向を観察することができた．また反射波の形状の解析は，一般的な超音波センサの機能である距離計測（超音波を照射してから反射波を受信するまでの時間計測）とは独立して行えるために，距離を測定しながら形状についての情報を同時に把握が可能であるということも確認された．

将来的には，反射波の形状解析による対象物の素材同定手法を確立するためにさらなる追加実験の実施，さらには，CyARM[5] などのアクティブセンシングシステムへ実装した場合の反射波の形状解析などを進めることで，本稿で提案した手法の有効性およびその応用範囲について詳細に検討を重ねていく予定である．

参考文献

[1] 植阪友理・小齊香織：人は音によって素材を弁別できるのか？–電子移動補助具 K Sonar を用いた素材カテゴリー同定実験から–，第 28 会日本認知科学会全国大会，P1–33 (2010).
[2] Farmer, L. W. & Smith, D. L.: Adaptive technology. In B. B. Blasch, W. R. Wiener, &R. L. Welsh (Eds.), Foundations of orientation and mobility, 231–259. New York: AFB Press (1997).
[3] 山崎英夫・小川泰正・力丸裕・渡辺好章：カグラコウモリのソナーパルス特性：ヤエヤマカグラコウモリとテラソカグラコウモリの比較, 音響学会聴覚研資料, H-99-103: pp.1–8 (1999).
[4] 赤松友成：イルカのソナーに学ぶ新しい魚群探知技術，遺伝，Vol. 61, No. 1, 38–42 (2007).
[5] Akita, J., Komatsu, T., Iyo, K., Ono, T., & Okamoto, M.: CyARM: haptic sensing device for spatial localization on basis of exploration by arms, Advances in Human-Computer Interaction, Volume 2009, Article No. 6 (2009).

ⓒ 2015 Information Processing Society of Japan