

## 空間情報の聴覚提示法に関する研究

6D-5

冬木真吾 金子俊一 本多庸悟  
東京農工大学工学部電子情報工学科

## 1. はじめに

本研究は、空間内での位置情報を聴覚に提示する方式の検討を目的とする。具体的には、両耳間の音の強度差、時間差および持続時間などを用いる提示方式について検討し、視覚障害者などをサポートするための将来技術の基礎的検討を行なう。

位置情報はある物体の観測者からの方向と距離で表現され、この2つの量を先の両耳間差などを用いて提示することによって、音の情報だけでたとえば机の上の物体の位置を知覚させることの可能性を探る。

## 2. 音の強さの定式化[1]

聴覚器官は、音の大きさ、高さを感じる器官である。大きさは音圧によって、音の高さは周波数による。このとき、両者の関係は一義的に定まるものではなく、音の強さ（音圧）が同じでも、周波数が変われば音の大きさの感覚が変わることもある。しかし、本研究では、音高については、音種の識別にのみ用いることとし、方向および距離の提示には音圧のみを用いることとする。

通常、音波は空気中を粗密波として伝搬する。このとき、変化する音圧を実行値音圧 $\bar{p}$ とすると、最大瞬時音圧 $\delta p$  [Pa] (時間関数)を用いて、

$$\bar{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\delta p)^2 dt} \quad [\text{Pa}] \quad (2.1)$$

とあらわされる。

また、音波の進行方向に垂直な面の単位面積を単位時間に通過するエネルギー量で音の強さ $I$ をあらわすので、これの成り立つ平面波に限り、

$$I = \frac{\bar{p}^2}{\rho c} \quad (2.2)$$

$c$  : 音の速度 [m/s]

$\rho$  : 媒質の密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$\rho c$  : 固有音響インピーダンス

が与えられる。我々の聞くことのできる音の強さは、最大と最小の比が $10^{12}$ にも及ぶので、通常、基準的な音の強さと比較して、対数表現を用いて表現している。

## 3. 二次元位置の聴覚提示法

左右両耳間の提示音の強度差を用いる。また、前後では強度差がほとんど等しいので、前半面の左右90度範囲のみを提示領域とする。

## 3.1 方向角度の提示

通常、方向角度の知覚には両耳に到達する音波のわずかな時間差と音圧差が利用されている[4]。図1のように正中面に対して $\theta$ の角度で入射してきた音波の両耳からの距離差により強度差が生じる。伝搬路の差 $dl$ は、

$$dl = r\theta + r \sin \theta \quad (3.1)$$

であるので、このときの時間差 $dt$ と音の強さの差 $dI$ は、それぞれ

$$dt = \frac{dl}{c} = \frac{r}{c} (\theta + \sin \theta) \quad (3.2)$$

$$dI = I \sqrt{\frac{1}{(D - r \sin \theta)^2} - \frac{1}{(D + r\theta)^2}} \quad (3.3)$$

となる。実際は、周波数、頭、耳介による遮蔽、回折に影響されこのように単純ではない。この強度差および時間差を再生し、あたかもその方向に音源が存在するような提示をする。

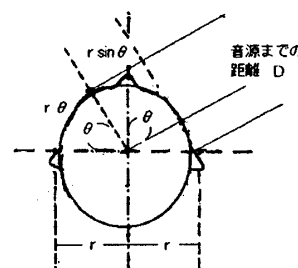


図1 両耳間の距離差

## 3.2 距離の提示

(3.3)式からわかるように、音の強度差は音源までの距離に反比例して減衰する。この減衰量を用いて距離感を提示することが考えられるが、実際には強度差の識別限界以内という制限をもつことなどから距離提示は困難であった。

そこで、2種類の提示音の提示期間の差を利用する方式を提案する。一方を基準距離をあらわす基準音とする。もう一方を提示距離に対応させる。基準音と目標提示音との提示期間の時間的な「ずれ」により、距離の違いを知覚させる方式である。

## 3.3 角度、距離の提示の合成

方向角度の提示法と距離の提示法は、基本的には競合しないと考えられる。したがって、これらの2方式を同時に利用することによって方向角度および距離の同時提示が可能となる。この段階で、観測者を座標中心とした2次元極座標空間を表現することができる。

### 3.4 提示音

方向知覚の時に、頭部の回折の影響を受けるのは、その波長から約1000Hz以上の音波であることがわかる[4]。したがって角度提示に使用する音はそれ以上の周波数がよい。また、距離提示の基準音は、より低く倍音の関係にない音とし、2音の識別を容易にした。

### 4. 実験

まず角度の提示実験を行う(実験1)。未経験の被験者4人(TS, IM, SS, TM)について、角度提示に対して知覚した方向にマーカーを置かせる方式で解答を毎回要求した。それぞれ、TM: 3回、IM, SS: 4回、TS: 5回の実験をおこなった。毎回20音を提示した。音源はFM音源とし、出力はヘッドフォンを用いた。提示音は1196Hzの単音とした。計算のためのパラメータとして、1気圧、20℃、音響インピーダンス: 420 kg/mksとした。実験前、10回目直後に、0、左45、左90、0、右45、右90度の順に教師音(正解付き)を提示した。

次に距離の実験を行った(実験2)。被験者3人(TS, IM, SS)について、知覚した距離値(数値)を口頭で解答させた。それぞれ2回ずつ実験を行った。毎回20音を提示した。250mmに相当する1秒間の基準音(762Hz)を用いた。

### 5. 考察

#### 5.1 方向角度の提示実験

図2は、初回と第3回における被験者にわたる平均誤差および変動幅の最少の被験者(TM)、最大の被験者(TS)を示す。変動幅についてはやや大きい個人差が認められた。平均誤差については第3回においてもそれ程大きい改善はみられなかった。幾つかに回数を経るに従って偏差の傾向が見られた。聞き取り調査の結果では、正中面方向(0度)がずれる、という感想を得ている。また、直前の提示角度との差の知覚に関する学習効果が予想された。図3(a)は60度の角度差をもつ提示音のみに対する解答の履歴、(b)は30度の場合である。各々60度、30度に漸近すれば学習効果が確認できることになる。60度における学習効果は顕著であるが、30度の場合は収束が認めにくい。また、回数を重ねることにより、分解能の向上が見られる場合があることがわかった。

#### 5.2 距離の提示実験

図4は、初回と第3回における被験者にわたる平均誤差および変動幅の最少の被験者(SS)、最大の被験者(IM)を示す。方向角度に比べ、精度よく判定している。聞き取り調査では、基準提示音は最大距離(500mm)の半分ぐらいがよい、という感想を得ている。

また、誤答に対して正解音(音のみ)を提示した場合、誤差は±50mm以下となり精度にかなりの向上が見られた。何らかのフィードバック処理に

より精度の向上が期待できると思われる。

疲労に関しては、距離実験において顕著であった。時間経過を知覚するために集中する必要があったことを示唆している。より自然な知覚を促すために改善する必要がある。

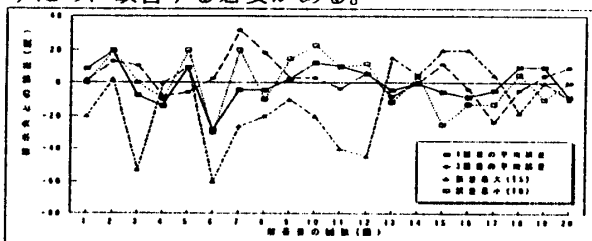


図2 平均誤差と個人の変動幅の最大・最小

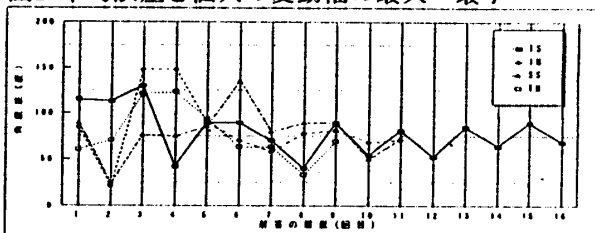


図3(a) 60度の角度差を持つ提示音にたいする解答

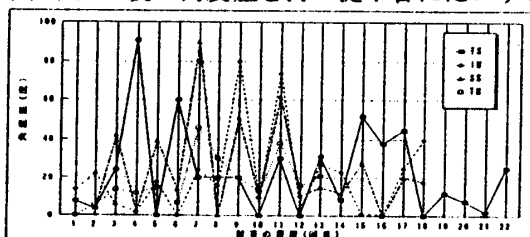


図3(b) 30度の角度差を持つ提示音にたいする解答

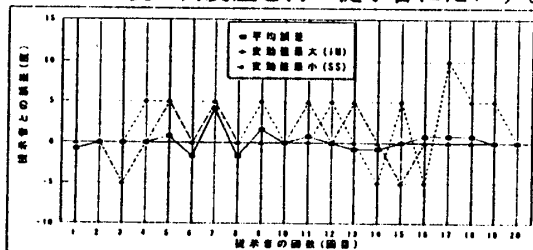


図4 平均誤差と個人の変動幅の最大・最小

### 6. おわりに

角度と距離の分離提示に関する基本的実験を行い、幾つかの有効な知見を得た。今後は同時提示の実験を中心に行い、フィードバックの効果などについても更に検討する予定である。

### 7. 参考文献

- [1] 境久雄, 中山剛: 音響工学講座6, 聴覚と音響心理: 日本音響学会編, コロナ社(1978)
- [2] J. Blauert: Sound localization in the median plane: *Acoustica*, 22, 205(1969/70)
- [3] Y. Makita: On the directional localization of sound in the stereophonic sound field: *E. B. U. Review, Part A*, 73, 2(1962)
- [4] 難波精一郎: 聴覚ハンドブック: 京都, カニヤ出版(1984)