

氏名	まつお いくお 松尾 行雄
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成13年7月11日
学位授与の根拠法	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名	東北大学大学院工学研究科(博士課程)電気通信工学専攻
学位論文題目	3次元空間内の近接した複数ターゲットのエコー定位に関する研究
指導教官	東北大学教授 矢野 雅文
論文審査委員	主査 東北大学教授 矢野 雅文 東北大学教授 阿部 健一 東北大学教授 櫛引 淳一

論文内容要旨

光が使えない環境下での3次元空間や物体を音響情報を用いて探索する技術は産業や医療分野などで広く用いられている。これまでのエコー定位技術はレーダーコンセプトに基づいて指向性の強い音波を用い、そのエコーの到達時間から3次元空間を再構成している。このため探索する空間をスキャンすることが必要となり、時間分解能と空間分解能はトレードオフの関係になる。したがって、探索空間が大きい場合や任意の数のターゲットをリアルタイムで認識することは従来技術では極めて困難になる。これに対し、コウモリは10kHz～100kHzのFM変調された超音波(エミッション)を間欠的に発射することによって、複雑な環境を認識している。複数の物体が存在していても、動いている虫などのターゲット(餌)を知覚し、捕獲することができることから、コウモリは音響情報を空間情報に変換することによって、エミッションの1回の発射により得られたエコーのみから複数ターゲットをリアルタイムで位置定位していると考えられる。

3次元空間で物体を位置定位するためには、ターゲットの奥行きと方向の情報が必要である。生理学的には奥行き知覚に関する大脳皮質の遅延時間同調ニューロンが知られており、特定の遅延時間をもつエコーに対して反応が最大になる。これよりターゲットの奥行きを表現することができるが、方向知覚についてはわかっていない。

3次元空間内の1個のターゲットを位置定位する両耳性のモデルは複数提案されている。コウモリの口や耳の方向特性の結果から理想化された伝達関数を用い、エコーから最尤度推定法により方向を定位する方法が Altes (1978) によって提案されている。これは全ての方向の伝達関数と比較しなければならないので、実際に解くには問題がある。この問題を単純化した方法が Kuc (1994)によって提案されている。この方法では、倍音構造を持つ音を用いて、両耳間音圧差の情報から水平方向を決定し、周波数間の音圧差の情報から垂直方向を決定する。これらの方法では一つのターゲットの方向を定位することができるが、エコーがお互いに干渉するほど、奥行きが近接する二つのターゲットの場合は一意に定位することができない。これは近接した2つのターゲットの場合、2つのエコーは干渉するので、周波数スペクトルはそのターゲット間の遅延時間差(距離差)に依存したピークとノッチを持つパターンとなり、得られたエコーの周波数特性とターゲットの方向に対応する周波数特性が一意に対応しないためである。実際のコウモリでは、2つのターゲット間の遅延時間差が数マイクロ秒のような近接する場合でも正確に知覚できることが示されている。この現象に対して Saillant ら(1993)は近接する二つのターゲットの奥行きを1次元上で定位をする単耳性モデルを提案している。そのモデルでは、エミッションとエコーの遅延時間から近いほうのターゲットの絶対的な奥行きを、エコーの干

渉パターンから二つのターゲット間の遅延時間差を同定している。この単耳性モデルを両耳モデルに拡張すれば、3次元空間内での定位が可能になると思われるが、両耳間の時間差の組合せはターゲットの数を上回るため、各々のターゲットの位置を一意に同定することはできない。複数のターゲットを一意に定位するためには各々のターゲットの奥行きだけでなく、方向の情報が必要である。この方向定位の手がかりとして、コウモリの外耳の伝達関数があり、スペクトル上で音圧が急激に減少するノッチが存在し、この外耳依存のノッチ周波数は方向に依存して変化していることが知られている (Wotton ら, 1995)。本研究ではターゲット間の遅延時間差依存と外耳依存の干渉パターンとを分けることによって近接する二つのターゲットの3次元上での位置を同定する計算論モデルを提案する。

この計算論モデルは4つのブロックから構成される。コウモリのエミッションを参考にし、120k から 20kHz までスイープする FM 変調波を用いる。蝸牛ブロックでは、エミッションとエコーの時間パターンを時間一周波数パターンに変換する。テンポラルブロックでは、この時間一周波数パターンから時間軸上で分離できるエコーをひとつのグループとして抽出し、各エコーグループのオンセット時間から最短ターゲットまでの距離を検出し、オフセット時間から最遠ターゲットまでの距離を検出する。スペクトラルブロックでは、外耳のノッチ周波数が限られた領域で生じることを利用して、各エコーグループのターゲットスペクトルを復元する。このことにより近接したターゲットが存在する場合でも各ターゲットの方向とターゲット間の遅延時間差が同定される。統合ブロックではテンポラルブロックの結果とスペクトラルブロックの結果を統合して各ターゲットの奥行きと方向を同定している。近接する複数ターゲットを3次元上で位置定位するために最も重要であるスペクトラルブロックの説明を中心に、モデルの具体的な処理を以下に述べる。

蝸牛ブロックでは、エミッションやエコーに対して、コウモリを含むほ乳類の聴覚系の特性を模擬して、バンドパスフィルタ群による周波数分解とそのあとに続く包絡線処理が実行される。蝸牛の基底膜の周波数選択性は、101 個の一定なバンド幅をもつ2次の IIR フィルタ群によって表現する。これらのフィルタの中心周波数は、20k から 120kHz の範囲に等間隔に設定している。

テンポラルブロックの目的は、エコーグループのオンセットとオフセットの遅延時間を決定することである。遅延時間を決定するためにテンポラルブロックでは、次の3つの処理が行われる。最初に、各々のバンドパスフィルタチャンネルでのエンベロープパターンにたいし、振幅変化を抽出することによって、オンセットパターンとオフセットパターンが計算される。次に、時間精度の向上のため、バンドパスフィルタチャンネル間の統合処理が行われる。最後に、エミッションとエコー間の相互相関関数によって奥行き軸への変換され、近い方と遠い方のターゲットの奥行きが決定される。

スペクトラルブロックの目的は、エコーのスペクトログラムからターゲット間の遅延時間差と外耳依存のノッチ周波数を決定することである。ここで、ターゲット間の干渉によるスペクトル成分を“ターゲットスペクトル”とよび、外耳での干渉によるスペクトル成分を“外耳スペクトル”とよぶ。

エコー・グループのオンセットとオフセットの遅延時間の中間に対応する奥行きでのエコースペクトルは、ターゲット間の干渉の影響を強く受けているので、ターゲット間の遅延時間差はこの中間奥行きでのエコースペクトルから計算される。このエコースペクトルは、エミッションとエコー間の相互相関関数の対数値として得られる。外耳依存のノッチが存在しない周波数領域でのエコースペクトルは、ターゲット間の干渉による寄与のみを受ける。したがって、外耳依存のノッチが存在しない周波数領域でのエコースペクトルは改良セレクトティブパス基底関数 (W_{sel})と逆畳み込みすることによって、ターゲット間の干渉のみに依存したインパルス応答に変換される。

$$W_{sel}(f_n, d) = C A(f_n) \cos(2\pi d f_n) - \left\{ \sum_f \frac{C A(f) \cos(2\pi d f)}{N} \right\}$$

ここで、 f は周波数で、 d はターゲット間の遅延時間差で、 C は定数である。 N はバンドパスフィルタチャネルの数(ここでは101個)である。 $A(f)$ は、外耳依存のノッチが存在しない周波数領域において値を1とし、外耳依存のノッチが存在する周波数領域において値を0とする。一定振幅を持つ振幅スペクトルが逆畳み込みされたときに、時間0のみで値をもつように第2項を導入している。この関数によって畳み込まれた結果であるインパルス応答を、“セレクトティブパスインパルス応答”と呼ぶ。ターゲット間の遅延時間差は、セレクトティブパスインパルス応答のピーク時間から決定される。

外耳依存のノッチが存在する周波数領域での外耳スペクトルを決定するためには、外耳依存のノッチが存在しない周波数領域でのエコースペクトルから、外耳依存のノッチが存在する周波数領域でのターゲットスペクトルを外挿する必要がある。そのために、遅延時間差に対応する時間と時間0でのセレクトティブパスインパルス応答の値のみを抽出する。この抽出されたインパルス応答は、改良オールパス基底関数(W_{all})との畳み込みによって、全周波数範囲でのターゲットスペクトルに変換される。

$$W_{all}(f_n, d) = C \cos(2\pi d f_n) - \left\{ \sum_f \frac{C \cos(2\pi d f)}{N} \right\}$$

外耳依存のノッチが存在しない周波数領域で、ターゲットスペクトルの形状がエコースペクトルの形状と一致しているならば、ターゲット間の遅延時間差はピーク時間によって表されていると考えられる。

各々のターゲットに対する外耳依存のノッチ周波数は、ターゲットスペクトルとそのターゲットの遅延時間に対応するエコースペクトルを比較することで決定される。近いほうのターゲットの遅延時間は、エコー・グループのオンセットの遅延時間に等しい。遠いほうのターゲットの遅延時間は、近いほうのターゲットの遅延時間とターゲット間の遅延時間差を加えることによって決定される。各々のターゲットに対応するエコースペクトルは、そのターゲットの遅延時間での相互相関関数の対数値として計算される。各々のターゲットのエコースペクトルとターゲットスペクトルは、改良オールパス基底関数と逆畳み込みすることによって、それぞれエコーに依存したインパルス応答、そして、ターゲット依存のインパルス応答に変換される。ターゲット間の干渉に関係する成分を取り除く目的で、ターゲット間の遅延時間差に対応する時間での、ターゲット依存のインパルス応答の値とエコー依存のインパルス応答の値が一致するように補正が行われる。この補正したインパルス応答を“補正後ターゲット依存のインパルス応答”とよぶ。

外耳依存のインパルス応答は、エコー依存のインパルス応答から補正後ターゲット依存インパルス応答を差分することによって計算される。この外耳依存のインパルス応答は、改良オールパス基底関数との畳み込みにより、外耳スペクトルに変換される。各々のターゲットに対する外耳依存のノッチ周波数は、外耳スペクトルの最小振幅周波数である。スペクトラルブロックの出力としては、遅延時間差と外耳依存のノッチ周波数である。

両耳性の統合ブロックでは、各々のターゲットの3次元上での位置がターゲットの奥行きと外耳依存のノッチ周波数の情報を用いて決定される。両耳間奥行き差を使うことによって、水平面上で4つの位置の候補があげられる。しかし

ながら、コウモリの頭のサイズは小さいので、近い方のターゲット間にたいする両耳間奥行き差の情報のみを用いて、ターゲットの水平方向を正確に決定することは難しい。このために、近いほうのターゲット間にたいする両耳間奥行き差を-16 マイクロ秒から 16 マイクロ秒まで(水平方向で -8° から 8° まで)変化させ、それぞれの場合での水平面上での位置の候補をあげる。これに加えて外耳依存のノッチ周波数の情報を用いて、ターゲットの方向が一意に決定される。ターゲットの方向はテンプレートセットのノッチ周波数と計算されたノッチ周波数が一致している方向である。したがって、テンプレートセットのノッチ周波数と計算されたノッチ周波数の差が最小であるという条件を用いて、ターゲットの方向が決定される。

シミュレーション結果では、5つの場合に適用しモデルの有効性を確かめる。最初に、エコーが干渉しないランダムにおかれた5つのターゲットの場合でも、各々のターゲット位置が正確に定位できることを示している。次に、奥行きが近接し、方向が近い場合には各ターゲットの位置は正確に同定でき、方向が離れている場合でもコウモリの行動実験と同じ程度には定位できることを示している。次に、モデルの奥行き分解能を確かめるために、ターゲット間の奥行き差が 4.7 マイクロ秒しか離れていない2つのターゲットに対する結果を示し、ターゲット間の奥行き差を 4.1 マイクロ秒(奥行き軸上で約 1.4 ミリメートル)と同定し、それぞれのターゲットの方向を同定することができている。したがって、本モデルの奥行き分解能は数マイクロ秒であることが示される。最後にモデルのノイズへの耐性を明らかにするために、ノイズとシグナルの比が 5dB の場合の結果を示し、近接する2つのターゲットの位置を正確に定位できている。したがって、任意の複数ターゲットの3次元位置定位において、この計算論モデルの有効性が示される。

論文審査結果の要旨

光が使えない環境下での3次元空間や物体を音響情報を用いて探索する技術は産業や医療分野などで広く用いられている。これまでのエコー定位技術はレーダーコンセプトに基づいて指向性の強い音波を用い、そのエコーの到達時間から3次元空間を再構成している。このため探索する空間をスキャンすることが必要となり、時間分解能と空間分解能はトレードオフの関係になる。したがって、探索空間が大きい場合や任意の数のターゲットをリアルタイムで認識することは従来技術では極めて困難になる。これを解決するには、広がりを持つ音波の1回の発射により得られるエコーから、複数ターゲットをリアルタイムで定位する計算論が不可欠となる。

著者はエコー情報を用いて環境を認識することの出来るコウモリに着目し、FM変調された超音波の1回の発射により得られるエコーから任意の数の複数ターゲットを定位する計算論の研究を行った。本論文はこれらの成果をとりまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、コウモリの聴覚中枢神経系の生理学的な知見を基に任意の複数ターゲットのエコー定位の計算論を述べている。この計算論は4つのブロックからなる。入力ブロックは20~120kHzのFM変調波によるエコーと方向依存的に変化する外耳のノッチ周波数の重ね合わせを時間一周波数パターンに変換する。テンポラルブロックではこの時間一周波数パターンから時間軸上で分離できるエコーをグループに分離し、各グループのオンセット時間から最短ターゲットまでの距離を検出し、オフセット時間から最遠ターゲットまでの距離を検出する。スペクトラルブロックでは外耳のノッチ周波数が限られた領域で生じることを利用して、各エコーグループのターゲットスペクトルを復元する。このことにより近接したターゲットが存在する場合でも各ターゲットの方向とターゲット間の距離を同定できることを示している。統合ブロックではテンポラルブロックの結果とスペクトラルブロックの結果を統合して各ターゲットの距離と方向を同定している。これは重要な成果である。

第3章では、この計算論を様々な場合に適用してその有効性を確かめている。まず、エコーが干渉しないランダムにおかれた5つのターゲットの位置が正確に定位出来ることを示している。ターゲットの奥行きが近接し、方向が近い場合には各ターゲットの位置は正確に同定でき、方向が離れている場合でもコウモリの行動実験と同じ程度には定位できることを示している。近接したターゲットの奥行き分解能は $4.1\mu\text{sec}$ (1.4mm) である。またノイズ/シグナル比が5dB程度であっても正確に定位できることを示している。これらの結果はこの計算論の有効性を示すもので、評価できる。

第4章では、上記の方法論がシステムを構成する部位の時定数よりはるかに良い時空間分解能が得られる機構について考察をし、さらに精度を向上させるための方法についても検討を行っている。また本計算論と生理学との対応関係を明らかにするための実験手法についても提案している。これらは本計算論の発展性を示すもので、興味深い議論である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、生体システムの音響定位の機構に基づいた新しい音響定位システムへの展望を拓いたもので、生体システム工学、音響情報工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。