

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 11 日現在

機関番号：21401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21700140

研究課題名（和文） 可搬性の高い聴覚ディスプレイシステムの開発

研究課題名（英文） A development of the auditory display with high portability

研究代表者

渡辺 貴治 (WATANABE KANJI)

公立大学法人秋田県立大学・システム科学技術学部・助教

研究者番号：20452998

研究成果の概要（和文）：頭部伝達関数（head-related transfer function, HRTF）は、音源から聴取者の鼓膜面上までの音の伝搬を表している。音源信号に HRTF が畳み込まれた音は、聴取者に仮想的な音源を知覚させる。本研究では、計算機の描画用プロセッサである GPU(graphics processing unit)を用いて並列処理をすることで、42 個までの仮想音源を同時に制御可能な聴覚ディスプレイシステムを開発した。また、ノート型 PC への実装も可能であり、可搬性の高いシステムを実現した。

研究成果の概要（英文）：A head-related transfer function (HRTF) represents characteristics of sound propagation from a sound source to each eardrum of a listener. The sound convolved with HRTF makes a listener localize a virtual sound. In this study, an auditory display system that is able to control up to 42 virtual sounds is developed by processing the convolution in parallel on GPU (graphics processing unit). This system can be implemented into a notebook computer. Therefore, the system also has a high portability.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 600,000 | 180,000 | 780,000 |
| 2010年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 2011年度 | 500,000 | 150,000 | 650,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 1,600,000 | 480,000 | 2,080,000 |

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・メディア情報学・データベース

キーワード：バーチャルリアリティ, 頭部伝達関数, HRTF, 聴覚ディスプレイ, GPGPU

1. 研究開始当初の背景

(1) 聴取者の両耳に入力される音は、音源から出力された後、直接聴取者に到達する音と、室の床や壁面、あるいは聴取者自身の身体において反射・回折した音が重ね合わさったものである。このような系において、音源を入力、鼓膜面上の音を出力とすると、伝搬における反射・回折の影響を伝達関数として表現でき、特に、室内の反射・回折の影響が

ない場合を頭部伝達関数と呼ぶ。任意の音信号に頭部伝達関数を畳み込むことで、ある位置に音源があるときに両耳に入力される信号を模擬することができ、聴取者に仮想的な音源を知覚させることができる。

(2) 頭部伝達関数などを用いて仮想音源を提示・制御するシステムを一般に聴覚ディスプレイシステムと呼ぶ。頭部伝達関数は音源

位置に依存するため、仮想音源ごとに頭部伝達関数を切り替えて畳み込みを行う必要がある。また、聴取者の頭部の動きに追従できるように実時間制御を行うには、高速に処理する必要がある。

(3) 計算機内の描画用プロセッサである GPU(graphics processing unit)を、汎用の計算に用いる GPGPU(General-Purpose computing on GPU)が様々な分野で発展してきている。GPU は並列処理によって高速演算が可能であり、消費電力も比較的小さいという長所がある。

2. 研究の目的

頭部伝達関数の畳み込み処理によって仮想音源を提示する聴覚ディスプレイシステムを、携帯可能な機器によって実現することを目的とする。従来のシステムは、DSP ボードなどの高性能な演算装置を使用しているが、それらと比較して性能が劣る携帯機器で実現するため、本研究では、頭部伝達関数の簡略化による計算量の低減や、GPGPU に基づくシステムの実装について検討を行う。

(1) 頭部伝達関数の周波数特性は複雑であるが、聴覚の性質を考慮すると、頭部伝達関数の微細な構造までは知覚していないと考えられる。そこで、一部の帯域に関して周波数特性を簡単な形状にすることで、聴感上仮想音源の知覚に影響を受けないような簡略化が可能であると予想される。そこで、本研究では、頭部伝達関数の簡略化法を提案し、その効果を主観評価実験によって示す。

(2) GPU によって頭部伝達関数の畳み込み処理を行うシステムの実装を行う。畳み込み演算は、和積演算が主であり、単純な計算を高速に行えると言われている GPU に適していると思われる。しかしながら、実際にどの程度の性能であるかは不明であるため、実装したシステムの評価も行う。

3. 研究の方法

(1) 頭部伝達関数を音信号に畳み込むことで、元の信号の周波数特性が変化する。聴覚は、その変化を手掛かりとして音源位置を知覚(定位)していると言われている。もし、頭部伝達関数の一部の帯域を平坦な特性に置き換えたならば、その帯域に関しては音源位置の情報が付加されないといえる。本研究では、そのような平坦化を適用することを頭部伝達関数の簡略化と呼ぶこととする。簡略化を適用する帯域としては、以下の2つの考え方に基づいて決定した。まず、音波の性質として、低域に関しては頭部における回折による回り込みが起こることから、左右耳のレベル差が小さく、かつ音源方向による相違も小さいと思われるため、定位の手掛かりが少

ないと考えられる。そこで、低域に対しては、両耳の頭部伝達関数に対して簡略化を適用する。一方、高域に関しては、頭部における回折が起こりにくく音源に対して反対側(影領域)の耳に入射される音のレベルが小さくなるため、左右耳のレベル差が生じ、それを音源方向の手掛かりとして利用できる。しかし、聴覚の周波数分解能を考慮すると、周波数特性の微細な形状は知覚していないと考えられる。そこで、高域に対しては、影領域の頭部伝達関数について両耳間のレベル差は保つようにした上で、簡略化を適用する。

以上の簡略化の効果と簡略化を適用可能な帯域を明らかにするために、聴取実験を行った。本研究では、定位に影響を受けないことが重要であるため、簡略化した頭部伝達関数もしくは元の頭部伝達関数を畳み込んだ音信号を被験者に提示し、知覚した仮想音源の方向を回答させた。その結果得られる定位精度が同程度であれば、簡略化が適用可能であると言える。実験は、簡略化を適用する帯域を低域のみ、高域のみ、低域及び高域、の3種類についてそれぞれ行い、簡略化による定位への影響と簡略化が適用可能な帯域を検討した。

(2) 聴覚ディスプレイシステムの実装として、GPU を用いた並列処理による高速化を実現する。本研究では、NVIDIA 社が無償で提供している CUDA を用いて開発を行った。CUDA は、標準の C 言語を採用しており、さらに複数の OS に対応しているため、汎用性の高いシステムが実現できると思われる。

聴覚ディスプレイシステムは、基本的には音源信号に頭部伝達関数を畳み込むことで、仮想的な音源を再現するものである。さらに、本研究のシステムでは、音源の移動や聴取者の頭部の動作に対する相対的な音源位置の変化も想定している。そのためには、対応する音源位置に対して測定された頭部伝達関数を選択したり、測定されていない位置に対しては補間することで算出することも必要である。すなわち、システムとしては、頭部や音源位置の取得、畳み込む頭部伝達関数の選択・算出、畳み込み、音信号再生を実装する必要がある。この中で、畳み込む頭部伝達関数の選択・算出する処理と畳み込み処理については、和積演算の繰り返しが多いことから、並列に行うことで高速化が可能であるため、GPU による処理が適していると考えられる。そこで、上記2つの処理に対しては GPU で行い、他の処理はホストとなる PC の CPU で行うようなシステムの実装を行った。

(3) 実装したシステムの評価として、まず、計算速度について評価を行った。(2)の実装を行った結果、1音源では十分短い時間で処

理が行えることが確認できたため、同時に畳み込む頭部伝達関数を増加させた場合についても計算速度の評価を行った。すなわち、複数の音源位置に仮想音源を配置させることが可能なシステムとして、処理可能な音源数についての評価も行った。実装は、主にデスクトップ型 PC にて行い、性能を評価した上で、ノート型 PC への移植を行った。

4. 研究成果

(1) 頭部伝達関数の簡略化に関する聴取実験の結果を図 1, 2 に示す。それぞれ、簡略化を適用した高域あるいは低域の境界周波数と、被験者の回答から算出した定位精度の関係を表したものである。図 1 は、仮想音源の提示方向に対する被験者が解答した方向の差の平均値である平均定位誤差を示している。図 2 は、両耳を結ぶ直線を境界としたときに、提示した音源方向の内、前方のものに対して被験者の回答が後方に誤った場合、あるいはその逆の場合の割合である前後誤り率を示している。なお、各図で Lower boundary frequency が 0 kHz、かつ Higher boundary frequency が 20 kHz の場合が簡略化を適用していない条件の結果である。つまり、それと同程度の値であれば、同様の定位感が得られたと評価できる。分散分析の結果、低域に関しては 1 kHz 以下、影領域の高域に関しては 4~8 kHz 以上の帯域を簡略化しても、簡略化を適用していない場合の結果と定位精度に有意な差が見られなかった。すなわち、それらの帯域は簡略化によって定位に影響しないことが示唆された。

頭部伝達関数の簡略化やモデル化の研究は、国内外問わず様々な方法が提案されているが、左右の耳で異なる帯域に簡略化を適用した例はほとんどなく、本研究で得られた成果は、頭部伝達関数の新しい簡略化あるいはモデル化の方法に発展可能なものであると考えられる。また、頭部伝達関数に含まれる定位の手掛かりに関する研究において、例えば、高域では 8 kHz 以上の帯域に手掛かりがあると報告されているが、本研究の結果から、影領域については、その帯域の情報がなくとも定位可能であることが示唆されている。したがって、この成果は、定位の手掛かりに関する研究において新しい知見が得られたと位置づけられる。本研究で簡略化を適用した帯域は、音源信号の周波数特性の形状には影響を与えないことから、畳み込み処理を行う必要がない。すなわち、仮想音源を生成する処理において計算量の低減が可能となり、今後の展望として、低減した分を例えば部屋の音響的特性を付加する処理に割り当てるなど、より高い臨場感のある仮想音空間を再現可能なシステムの実現に寄与できるものと考えている。

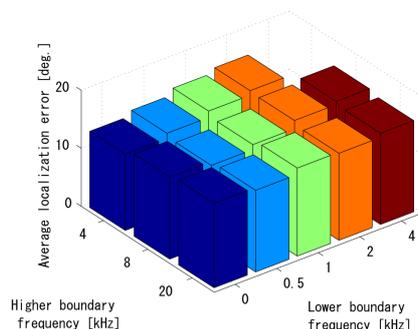


図 1 平均定位誤差

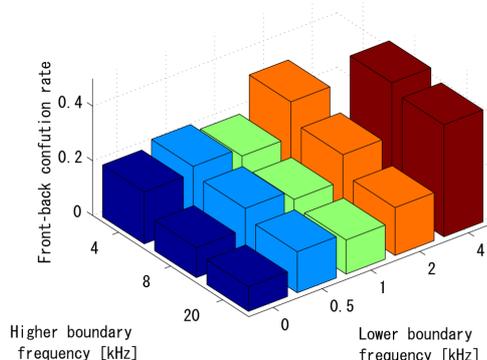


図 2 前後誤り率

(2) 本研究のシステムは、入力信号をある時間長のブロックに分割して処理することとした。あるブロックの処理が終了し音信号を再生している間に、次のブロックの処理を終えることができれば、聴取者には連続的に音が提示されるため、実時間動作が可能であるといえる。図 3 に、1 ブロックにおける処理の流れを示す。図中の“音像制御処理”における 3~7 の各処理の内部を並列処理とすることで、高速化を実現した。さらに、異なる音源位置の頭部伝達関数を畳み込む処理を並列に行うことで、本システムは仮想音源を複数提示することも可能である。GPU を用いた聴覚ディスプレイシステムは、国内外でも例がなく、本研究独自の成果であると言える。さらに、複数の仮想音源を提示可能なシステムの例もほとんどなく、それが実現できたこともこの分野における大きな貢献であると言える。

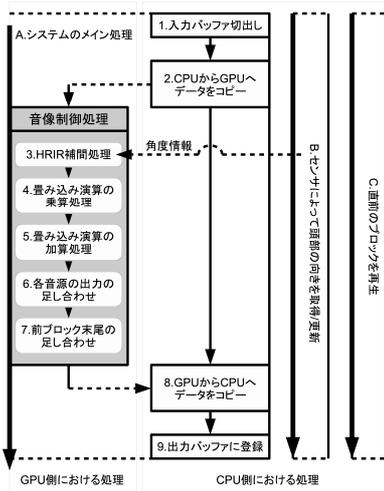


図3 実装した聴覚ディスプレイシステムの処理の流れ

(3) 実装したシステムの性能評価として、仮想音源数の増加に対する1ブロックの処理時間の計測を行った。処理時間が1ブロック分の音信号の長さよりも短ければ、連続的な音信号として提示することができ、聴取者に処理遅延を感じさせることがなく、実時間動作が可能であると言える。図4に、処理する仮想音源数に対する処理時間の結果を示す。現在のシステムでは、1ブロック分の音信号は45msと設定されているため、図から、42音源までであれば、あるブロックの音信号を再生し終える前に次のブロックの処理を終えることで、連続的に再生されると考えられる。つまり、42音源までは同時に提示でき、かつ実時間動作可能であると言える。なお、聴覚ディスプレイシステムの先行研究において、システムの処理遅延が50ms以下であれば、定位に影響が見られないことが示されている。したがって、本システムは、定位に関しても処理遅延による影響が見られないシステムであると考えられる。

多数の音源を使用するシステムとして、例えば国内ではホールなどでの使用を想定した22.2chのシステムが開発されている。本研究のシステムは、提示可能な音源数で単純に比較すると、同等以上のシステムを仮想的に実現可能であると言える。また、複数の仮想音源を直接音と反射音を再現するために用いることで、残響のある室を模擬することも可能であると考えられる。つまり、単一の音源方向の頭部伝達関数しか処理できないシステムでは無響空間しか再現できないことと比較して、室の種類もある程度柔軟に再現可能なシステムであると言える。

なお、同様の評価は行っていないが、ノート型PCへの移植も行い、国内の研究会での発表の際に、デモンストレーションを行った。

したがって、当初の目標である可搬性のあるシステムの実現も達成できたと言える。今後の展望として、スマートホンへの実装が考えられる。現状のスマートホンでもGPUの性能が向上しており、本システムの成果に基づいた聴覚ディスプレイシステムの実現が可能であると思われる。

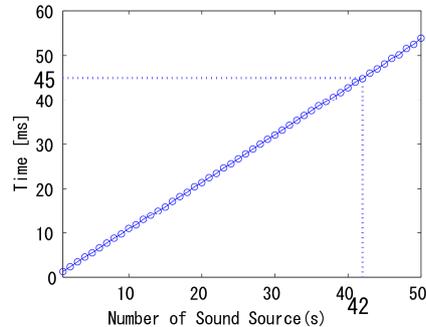


図4 仮想音源数に対する処理時間

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

① Kanji Watanabe, Ryosuke Kodama, Sojun Sato, Shouichi Takane, Koji Abe, Influence of flattening contralateral head-related transfer functions upon sound localization performance, *Acoust. Sci. & Tech.*, 査読有, Vol. 32, 2011, 121-124, DOI: <http://dx.doi.org/10.1250/ast.32.121>

[学会発表] (計10件)

① 渡邊貫治, 及川祐亮, 高根昭一, 佐藤宗純, 安倍幸治, GPGPUに基づく複数音源を同時提示可能な聴覚ディスプレイシステムの性能評価, 日本音響学会聴覚研究会, 2011年10月1日, 富山県牛岳温泉リゾート

② 及川祐亮, 渡邊貫治, 高根昭一, 佐藤宗純, 安倍幸治, 聴覚ディスプレイシステムにおけるGPGPUによる畳み込み処理の並列化とその効果, 日本音響学会, 2011年9月20日, 島根大学

③ 及川祐亮, 渡邊貫治, 高根昭一, 佐藤宗純, 安倍幸治, GPGPUに基づく聴覚ディスプレイシステムにおける音像制御処理の並列化に関する検討, 情報科学技術フォーラム, 2011年9月8日, 函館大学

④ 及川祐亮, 渡邊貫治, 高根昭一, 佐藤宗純, 安倍幸治, GPGPUに基づく聴覚ディスプレイシステムにおける畳み込みの並列化の実装と性能評価, 電気関係学会東北支部連合大会, 2011年8月26日, 東北学院大学

⑤ Kanji Watanabe, Ryosuke Kodama, Sojun Sato, Shouichi Takane, Koji Abe, Influence of band-limited flattening of

HRTFs on sound localization performance, International Congress on Acoustics, 2010年8月23-27日, オーストラリア(シドニー)

⑥ Kanji Watanabe, Ryosuke Kodama, Sojun Sato, Shouichi Takane, Koji Abe, Influence of simplifying the spectral form of HRTFs on the contralateral side upon localization, International Workshop on the Principles and Applications of Spatial Hearing, 2009年11月11-13日, 蔵王ロイヤルホテル(宮城県)

⑦ Kanji Watanabe, Ryosuke Kodama, Sojun Sato, Shouichi Takane, Koji Abe, Subjective Evaluation of Sound Localization Performance with HRTFs Simplified on the Contralateral Side, Audio Engineering Society 14th Regional Convention, 2009年7月23-25日, 科学技術館(東京都)

⑧ 渡邊貫治, 小玉亮介, 佐藤宗純, 高根昭一, 頭部伝達関数の周波数特性の簡略化が定位に及ぼす影響に関する一検討, 日本音響学会, 2010年3月8-10日, 電気通信大学(東京都)

⑨ 小玉亮介, 渡邊貫治, 佐藤宗純, 高根昭一, 安倍幸治, HRTFの低域の周波数特性の簡略化が方向定位に及ぼす影響に関する一考察, 日本音響学会, 2009年9月15-17日, 日本大学工学部(福島県)

⑩ 小玉亮介, 渡邊貫治, 佐藤宗純, 高根昭一, 安倍幸治, HRTFの低域の周波数特性の簡略化が定位に及ぼす影響に関する基礎的検討, 電子情報通信学会, 2009年8月3-4日, 東北大学(宮城県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 貫治 (WATANABE KANJI)

公立大学法人秋田県立大学・システム科学
技術学部・助教

研究者番号: 20452998

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: