

### 3次元音場を利用したモバイルコンピューティング向けのナビゲーションインターフェイス

城井 学† 松岡 聡† 林 一輝†

3次元音場を用いたナビゲーションシステム 3D Audio Compass を提案する。ユーザは3次元音場によって従来のナビゲーションシステムより直感的なナビゲーションを受けることができる。更に、視線や身体を奪わないので、ユーザは実世界タスクに集中できる。また、そのプロトタイプを VRML を用いて実装し、仮想空間上でのナビゲーションタスクによって評価を行った。その結果、3次元音場によるナビゲーションが有効であるという知見を得た。

## A Navigational Interface for Mobile Computing using 3D Spatial Audio

MANABU KII,<sup>†</sup> SATOSHI MATSUOKA<sup>†</sup> and KAZUTERU HAYASHI<sup>†</sup>

We propose the 3D Audio Compass, a navigational interface for mobile computing using 3D spatial audio. 3D Audio Compass can guide the user to the destination intuitively, allowing the user to concentrate his attention on his real-world task. A prototype system is tested using VRML, and experimental results suggest that the guidance by 3D spatial audio is effective.

#### 1. はじめに

近年のコンピュータの小型化、高性能化に伴い、その利用範囲は机の上のみならず日常生活にまで広がってきている。また、ノート型コンピュータやPDA(Personal Digital Assistant)を常に携帯し、日常環境において利用するモバイルコンピューティングという概念も浸透してきている。そのモバイルコンピューティングにおいては、移動しながら利用することを考えたインターフェイスが望まれる。現状では、デスクトップコンピュータと同様の、ディスプレイに情報を表示する形態のインターフェイスが用いられることが多い。

デスクトップコンピュータにおけるグラフィカルユーザインターフェイスの隆盛にみられるように、人間が視覚から得る情報量は多い。しかし、視覚による情報提示をモバイルコンピューティングのような、移動しながらコンピュータを使用する環境で用いると、新たな問題が生じる。まず、表示デバイスにより身体が奪われるという問題がある。次に、ユーザの視線を表示デバイスが奪うことによる実世界タスクの阻害という問題もある。また、表示デバイスが小さいために提示できる情報量が少ないといった問題や、これらが社会的にまだ認知されていないという問題も存在する。

このような問題を解決する手段として、本論文ではモバイルコンピューティングでの情報提示インターフェイスに3次元音場を用いることを提案する。具体的には

3次元音場に基づいたナビゲーションインターフェイス 3D Audio Compass を提案し、その有効性の評価を行う。

#### 2. モバイルコンピューティングインターフェイスにおける3次元音場の有効性

##### 2.1 モバイルコンピューティングインターフェイスに求められる要件

モバイルコンピューティング環境においては、インタフェースが次の要件を満たすことが求められる。

- (1) ユーザの行動の自由を奪わないこと
- (2) ユーザの実世界タスクへの集中を阻害しないこと
- (3) 外で用いることが社会的に認知されていること

現在用いられているようなディスプレイを用いたインターフェイスでは、ディスプレイを手で持ったり、頭に据え付ける必要があるため、ユーザが自由に行動できるとは言えない。また、情報を提示する時にユーザの視線を奪ってしまうために、ユーザの実世界タスクへの集中を大きく妨げてしまう。更に、現実的な問題点として、このような小型デバイスが社会的に認知されていないという点も挙げられる。

##### 2.2 3次元音場の利用

そこで、本研究では3次元音場をモバイルコンピューティングにおけるインタフェースとして用いることを考える。音、3次元音場を用いる利点、欠点としては次が挙げられる。

音を用いる利点 音を用いる利点としてまず、ヘッド

† 東京工業大学 Tokyo Institute of Technology

フォンなどの出力デバイスの手軽さが挙げられる。そのため、ユーザは比較的自由に行動することができる。次に、音声による情報提示はユーザの視線を奪わないので、実世界タスクへの集中が容易である点も挙げられる。また、移動しながらヘッドフォンを用いて音楽を楽しむといった姿は街中でも良く見られ、社会的に充分認知されているといえる。

音を用いる欠点 音を用いる欠点としては、情報量の少なさと、ユーザの入力を考えた場合に別の独立したデバイスを用意しなければならないことが挙げられる。

3次元音場を用いる利点 3次元音場を用いることにより音情報に指向性を与えて、情報量の少なさをある程度補足することができる。また、後ろから音がやってくる、といった人間の感覚に直接訴えるような情報提示を行える。

3次元音場を用いる欠点 3次元音場の生成には重い処理が必要となり、現状の携帯型計算機では負担が大きい。

これらにより、3次元音場はモバイルコンピューティングインターフェイスとして、少量の情報提示が主要なタスクである場合、音の指向性が活用できる場合などには、特に有効であると考えられる。具体的な例としては、ナビゲーションタスクが挙げられる。

### 2.3 3次元音場によるナビゲーション

移動するユーザをナビゲーションする既存のシステムとしては、カーナビゲーションがまず挙げられる。また、PDAやHMDを用いたナビゲーションシステムも研究されている<sup>1)4)</sup>。しかし、これらのディスプレイを用いたシステムは前節で挙げたモバイルコンピューティングにおいて求められる二つの要件(ユーザの自由を奪わない、実世界タスクへの集中を阻害しない)を十分に満たしているとは言えない。具体的には次の問題点がある。

- ディスプレイが手や頭などを塞ぐため、視界や手の自由度が失われ、ユーザが自由に行動できない。
- ナビゲーションに視線を要するので、ユーザが外界に注意を向けられない。そのため、歩きながらナビゲーションを受けるのが難しく、ナビゲーションを受ける度に何度も立ち止まらなければならない。
- 人混みの中や、何もない空間などランドマークの確認ができない場合には、地図などの視覚情報によるナビゲーションは有効ではない。

これらは3次元音場を用いる事により以下のように解決が図られる。

- 出力デバイスであるヘッドフォンが手軽であるため、ユーザは比較的自由に活動することができる。
- 音による情報提示は視線を奪わないため、ユーザは外界へ十分注意を向けられる。そのため、移動しながらナビゲーションを受けることが可能である。
- 目的地の方向を直感的に示すことができるため、ランドマークに頼らないナビゲーションが可能である。

る。

## 3. 3D Audio Compass の提案

3D Audio Compass は、3次元音場による音の指向性を利用して、ユーザのナビゲーションを行うシステムである。

### 3.1 3D Audio Compass のインターフェイス

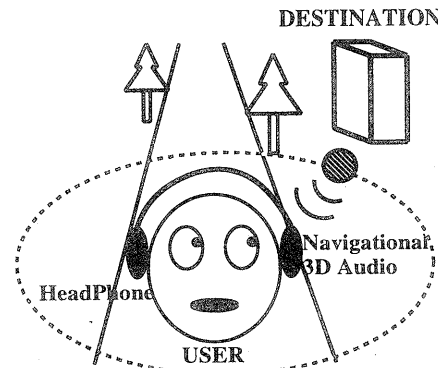


図1 3D Audio Compass

3D Audio Compass のインターフェイスは図1のようになっている。ユーザはシステムが定位した音をヘッドフォンで聞き、その方向から進むべき方向を直感的に知ることができる。また、音の強弱などによって目的地までの距離も知ることができる。

### 3.2 3D Audio Compass システムの構成

前節のインターフェイスを実現する3D Audio Compass のシステム構成は、図2のようになる。

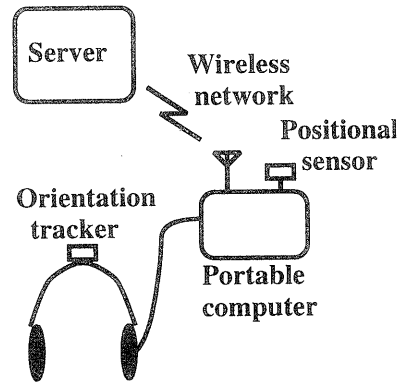


図2 3D Audio Compass システム概要

方向センサー：磁気センサーなどによりユーザの向きを高精度に検知する。

位置センサー：ユーザの位置を高精度に検知する。

特に方針 B のナビゲーションを利用する場合には、数メートルの誤差で位置を認識できる DGPS(Differential Global Positioning System)と同様、またはそれ以上の精度を持った位置認識技術が必要となる。

携帯型コンピュータ：方向、位置センサーから得た情報と、サーバからダウンロードした地理情報を用いて 3次元音場の生成を行い、ヘッドフォンによってそれを出力する。また、必要があればユーザの現在位置をサーバに転送する。

サーバ：地理情報の管理、携帯型コンピュータへの配信を行う。また、ユーザを案内するルートの予測、計算なども行う。

移動体通信：サーバとの通信に使用する。

3D Audio Compass によるナビゲーションの際に、ユーザを誘導する方向の決定には、次のような 2つの方針がある。

方針 A：直接、目的物に音を定位させ、ユーザには目的物の方向を与えて目的物まで案内する。

方針 B：従来のナビゲーションシステムにみられるように、システムがナビゲーションルートを設定して、そのルート上に音を定位させることによりユーザを目的物まで案内する。

方針 A をとる場合は、携帯型コンピュータは各センサーの情報とサーバから取り寄せた目的地の情報を用いて 3次元音場を構成、ナビゲーションを行う。その為、サーバとの通信は最初に目的地の位置情報をダウンロードする時だけである。

方針 B の場合は、ユーザの位置に応じて提示するルートが変わるので、常にユーザの位置をサーバに知らせなければならない。サーバは、送られてきたユーザの位置情報を用いて提示するルートの予測を行い、ユーザが携帯するコンピュータに対して予測したルート情報を送信する。そのため、携帯型コンピュータとサーバは常に通信している必要がある。

### 3.3 3D Audio Compass の具体的使用例

3D Audio Compass によるナビゲーションは次のような状況において、より有効であると考えられる。

- コンサート会場での席案内  
コンサート会場のような薄暗く、広い場所で小さなプレートに書いてある自分の席番号を探すのは非常に困難である。3D Audio Compass を使用することにより、ユーザは暗闇の中でも楽に自分の席にたどりつくことができる。
- 遊園地でのアトラクションへの案内  
遊園地などの人が多い場所だと、ランドマークが人混みで確認できずに、地図が意味をなさない場合がある。3D Audio Compass は進むべき方向を直接指示してくれるので、簡単に目的地までたどりつける。
- 美術館、博物館の案内

常設美術館などでは様々な作家の作品と一緒に展示してあることが多い。特定の作家だけに興味のあるユーザの場合、3D Audio Compass を使用すれば、他の客の邪魔をすることなく、自分の好きなコースを音声による案内、解説つきで巡回することができる。また、美術館側で特定のコースを用意することも考えらる。

- 目の見えない人の案内  
屋内、屋外における目の見えない人の案内への利用も考えられる。

## 4. 評価

3D Audio Compass の有効性を評価するため、実験を行った。今回の評価実験では仮想空間上で 3D Audio Compass のインターフェイスを実現したプロトタイプを用いることにした。3D Audio Compass の実装には、高精度の位置センサーや 3次元音場を正確に定位させるためのサウンドカードが必要であり、携帯型コンピュータのためのそうした機器はまだ少なく、実装が困難であるためである。

### 4.1 プロトタイプシステムの機能

ユーザはデスクトップコンピュータに接続されたディスプレイに表示される図 3 のような仮想空間内をマウスを用いて自由に移動することができる。その際、3次元音場を利用したナビゲーションをヘッドフォンを通して受けることができる。提示される音は誘導方向に定位された断続的なピープ音であり、断続の間隔と音量によって目的地までの距離がわかる。目的地までの距離が近づくほど断続間隔が短く、音量が大きくなる。

音を定位する方向の決定方針には方針 A を用いており、ピープ音が聞こえて来る方向に目的地が存在している。従ってルート情報は与えられないので、迂回行動はユーザが画面を見ながら自身で判断することになる。

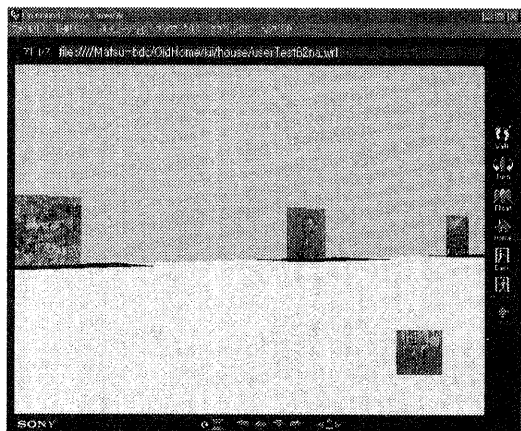


図 3 プロトタイプシステム上の仮想美術館

#### 4.2 プロトタイプシステムの実装環境

プロトタイプシステムの構成は次のとおりである。  
 仮想空間の生成：VRML2.0  
 3次元音場の生成：VRML2.0のサウンドノード  
 VRMLブラウザ：コミュニティプレイスブラウザ  
 計算機：PC-AT互換機(PentiumII 350Mhz,256MB)  
 サウンドカード：Sound BLASTER Live! VALUE  
 グラフィックカード：ATI3D Rage Pro  
 出力デバイス：ヘッドフォン

#### 4.3 実験

評価実験はプロトタイプシステム上の仮想美術館(図3)で8人の被験者を対象に実施した。

仮想美術館には全部で32枚の絵が展示されている。この中から7枚の絵をシステムのナビゲーションに従って順に巡回するタスク(図4)を被験者に遂行してもらった。比較評価を行うため、システムのナビゲーションには次に挙げる3つの手法を用いた。

手法1： 3次元音場によるナビゲーション

手法2： 次に向かうべき絵を画面に表示するナビゲーション

手法3： 1,2の手法を併用したナビゲーション

なお、ユーザには巡るべき7枚の絵は知らされておらず、学習効果を避けるために、それぞれの条件で巡る7枚の絵の組は違ったものとなっている。実験の評価指標としては、被験者が7つの絵を巡るのに要した時間を用いた。

具体的には、被験者には以下の手順のタスクを手法1,2,3すべてのナビゲーション手法のもとで遂行してもらった。

- (1) 実験開始時に被験者は仮想空間上の美術館の中央に立っている。
- (2) 被験者は各手法に従ったナビゲーションを受け、美術館内を移動して目的となる絵を探す。
- (3) 目的の絵を見つけたら被験者はその絵に近付き、絵をクリックする。
- (4) ナビゲーションの対象となる絵が次のものに切り替わる。
- (5) 7つの絵を廻り終えたら、巡回に必要な時間を記録し、終了する。

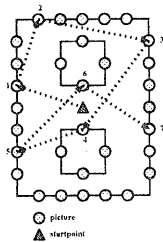
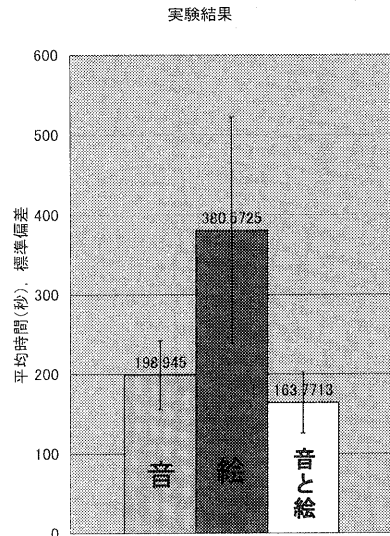


図4 評価に使用した仮想美術館の構造、および被験者が巡るコースの例

#### 4.4 実験結果

評価実験の結果、図5を得た。図5における3つの棒グラフは左からそれぞれ、手法1(3次元音場)、手法2(目的の絵を表示)、手法3(手法1、2の併用)によるナビゲーションを受けた場合の平均巡回時間(秒)を表している。



|           | 手法1(音) | 手法2(絵) | 手法3(音と絵) |
|-----------|--------|--------|----------|
| 平均巡回時間(秒) | 199    | 381    | 164      |
| 標準偏差      | 43.1   | 142    | 38.3     |

図5 各ナビゲーション手法による平均巡回時間(秒)のグラフ

#### 4.5 考察

- 3次元音場によるナビゲーションの有効性  
 手法2と手法3の平均巡回時間を比較すると、手法2では381(標準偏差142)秒、手法3では164(標準偏差38.3)秒かかっており、手法3は手法2の半分以下の時間でユーザを案内することができている。このことから、3次元音場によるナビゲーションの有効性がかなり高いことがわかる。
- 3次元音場だけで十分か?  
 手法1と手法3を比較すると、手法1では199(標準偏差43.1)秒、手法3では164(標準偏差38.3)秒かかっており、わずかながら手法3の有効性が高いことがわかる。このことから、3次元音場のナビゲーションの有効性は高いがそれだけで十分なわけではなく、視覚的な情報を加えればナビゲーションの有効性が更に高まることがわかった。
- ベクトル情報の有効性  
 手法2と手法1を比べると明らかに音の方が有効

であるが、これから視覚、聴覚によるナビゲーションの優劣を議論することはできない。なぜなら、視覚に与えた情報は絵(目的物の情報)、聴覚に与えた情報は方向(ベクトル情報)、と与えた情報の質そのものが異なっているからである。この比較から導き出せるのはベクトル情報の有効性である。進むべき方向をディスプレイに表示するシステムを使えば、視覚と聴覚によるナビゲーションの比較が可能であると考えられるが、今回はその実験は実施していない。

- ベクトル情報と目的物の情報の使い分け  
手法3の実験でユーザを観察した結果、ユーザはナビゲーションを受ける時に、目的物情報とベクトル情報の使い分けをしているという知見を得た。ユーザはまずベクトル情報(音)に従って美術館内を移動し、ある程度目的物に近付いたことがわかると、頼る情報を目的物情報(絵)に切替えて目的物を探している。観察していた限りでは、このようにナビゲーション情報の使い分けをしているユーザが多く、「音に加えて絵の情報を与えた方がナビゲーションの有効性が高まる」という前に行った考察を裏付ける知見となっている。
- 直線距離の提示による迂回行動の阻害  
今回の実験では目的の絵に音源を定位させる方針Aをとった。そのため、壁の裏にある絵と壁の表にある絵とどちらが目的なのかわかりにくく、ユーザが迷うケースが多く見られた。また、壁の裏にある絵に行こうとして迂回行動をとると、目的との直線距離が一時的に離れてしまい、その結果がビープ音の強弱でユーザにフィードバックされてしまう。それがユーザを戸惑わせる場面もいくつか観察された。

## 5. まとめ

本研究での成果を以下に述べる。

- モービルコンピューティングにおけるインターフェイスとして3次元音場を用いることを考え、ナビゲーションシステム3D Audio Compassを提案した。
- 3D Audio CompassのプロトタイプをVRML2.0を用いて実装し、評価実験を行い、以下の知見を得た。
  1. ナビゲーションにおいて、3次元音場によるベクトル情報提示は有効である。
  2. 3次元音場に加えて目的物の情報も与えることにより、ナビゲーションの有効性が高まる。
  3. 目的から遠い時にはベクトル情報、近い時には視覚情報と、ユーザがナビゲーション情報を使い分けしていることがわかった。

## 6. 課題

今後の課題としては、次が挙げられる。

- 更なる評価実験
  1. 小型ディスプレイにベクトル情報を表示するシステムの評価
  2. 予め定められたルートにしたがってユーザを誘導する方法の評価
  3. 目の見えない人を対象にした評価
  4. 3D Audio Compassの実装、実世界における評価
- ナビゲーションに使用する音の工夫  
現在用いているビープ音は情報量が少ない。音声によるガイダンスなどを用いることにより、更に有効なナビゲーションが行えるだろう。また、ビープ音を聞き続けるのはユーザにとって苦痛であり、より自然な音を用いる必要性もある。
- ナビゲーション以外のタスクにおける3次元音場の利用  
本稿では3次元音場の利用をナビゲーションタスクに絞って考えたが、他のモービルコンピューティングアプリケーションへの応用も考えていきたい。

## 7. 関連研究

3次元音場そのものの研究や、3次元音場をバーチャルリアリティに利用する研究は数多く行われている<sup>2)</sup>。しかし、3次元音場をユーザインターフェイスとして利用する研究は少なく、代表的なものはMIT Media Lab Speech Interface Groupで行われているAudio Dynamic SoundScape<sup>3)</sup>、Nomadic Radio<sup>5)</sup>といった研究のみである。我々の知る限り、本研究のように、3次元音場をモービルコンピューティングにおけるナビゲーションインターフェイスとして使用する例は見当たらない。

### 7.1 Dynamic SoundScape

Dynamic SoundScape<sup>3)</sup>は、3次元音場を利用した音声データのブラウジングインターフェイスである。会議の録音やラジオのニュース番組のような長い音声データをユーザの頭を中心とした円周上にマッピングすることにより、ユーザの空間的記憶力を活用したブラウジングが可能になる。音源がユーザの周りを一定方向に一定速度で移動することによって、音声データ中の時間軸と円周上の位置の間に対応関係が形成され、時間軸が円周上にマッピングされる。従って、ユーザは円周上の位置を指し示すことによって音声データをブラウジングすることができる。また、複数個の音源を同時に円周上に配置し、再生することもできる。

### 7.2 Normadic Radio

Normadic Radio<sup>5)</sup>は、ラジオメタファを用いた携帯型音声情報提示システムである。扱われるメッセージ

は、ニュース、ボイスメール、e-mail、天気予報などである。音の出力には、両肩にスピーカーを配置した独自のデバイスを使用している。3次元音場はe-mailのブラウジングに使用されている。時間軸をユーザの頭を中心とした円周上にマッピングし、e-mailの音声データをその到着した時間の位置から再生する。これによりユーザはそのメッセージが届いた時間を感覚的に知ることができる。

#### 謝 辞

本研究を行うにあたり、実験の被験者となって頂いた松岡研の方々、TRIPグループの方々に謝意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) Steven Feiner, Blair MacIntyre, Tobias Hollerer, and Anthony Webster. A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment. In *ISWC97*, October 1998.
- 2) Thomas Funkhouser, Ingrid Carlbom, Gary Elko Gosal Pingali, Mohan Sondhi, and Jim West. A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Environments. In *SIGGRAPH98*, pp. 21-32, October 1998.
- 3) Minoru Kobayashi and Chris Schmandt. Dynamic Soundscape: mapping time to space for audio browsing. In *CHI97*, March 1997.
- 4) 長尾 確, 暦本 純一, 伊藤 純一郎, 早川 由紀, 八木 正紀, 安村 通昇. ウォークナビ: ロケーションウェアなインタラクティブ情報案内システム. In *WISS'95*, October 1995.
- 5) Nitin Sawhney and Chris Schmandt. Nomadic Radio: Scaleable and Contextual Notification for Wearable Audio Messaging. In *CHI99*, March 1999.