



Title	ウェアラブルコンピューティングのための情報提示に関する研究
Author(s)	田中, 宏平
Citation	大阪大学, 2010, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/23487
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

ウェアラブルコンピューティングのための
情報提示に関する研究

2010年1月

田中 宏平

ウェアラブルコンピューティングのための 情報提示に関する研究

提出先 大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月 2010年1月

田 中 宏 平

関連発表論文

1. 学会論文誌発表論文

1. 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型 HMD のための読みとりやすさを考慮した情報提示手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 4, pp. 1848–1858 (Apr. 2007).
2. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: カーナビゲーションシステムにおける目的地予測のための走行履歴と運転状況の利用に関する一考察, 日本データベース学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 269–274 (June 2008).
3. 宮下浩一, 寺田 努, 田中宏平, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムのためのマップマッチング手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 75–86 (Jan. 2009).
4. 片山拓也, 村尾和哉, 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 装着型センサを用いた経路推薦機構をもつナビゲーションシステムの構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 9, pp. 2350–2359 (Sept. 2009).
5. 田中宏平, 寺田 努, 岸野泰恵, 西尾章治郎: カーナビゲーションシステムのための走行履歴と運転状況を用いた車両目的地予測手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 1 (Jan. 2010, to appear).

2. 国際会議等発表論文

1. Terada, T., Miyamae, M., Kishino, Y., Tanaka, K., Nakagawa, T., Yamaguchi, Y., and Nishio, S.: Design of a Car Navigation System that Predicts User Destination, in *Proceedings of International Workshop on Tools and Applications for Mobile Contents (TAMC 2006)*, pp. 54–59 (May 2006).
2. Terada, T., Miyamae, M., Kishino, Y., Tanaka, K., Miyashita, K., Nishio, S., Nakagawa, T., and Yamaguchi, Y.: A Car Navigation System for Daily Driving, in

Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2006) Poster Session, DVD-ROM (Sept. 2006).

3. Tanaka, K., Kishino, Y., Miyamae, M., Terada, T., and Nishio, S.: An Information Layout Method for an Optical See-through HMD Considering the Background, in *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2007)*, pp. 109–110 (Oct. 2007).
4. Tanaka, K., Kishino, Y., Miyamae, M., Terada, T., and Nishio, S.: An Information Layout Method for an Optical See-through Head Mounted Display Focusing on the Viewability, in *Proceedings of International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2008)*, pp. 139–142 (Sept. 2008).
5. Katayama, T., Nakamiya, N., Yamashita, M., Murao, K., Tanaka, K., Terada, T., and Nishio, S.: Development of a Navigation System with a Route Planning Algorithm Using Body-Worn Sensors, in *Proceedings of International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia (MoMM2008)*, pp. 88–93 (Nov. 2008).
6. Tanaka, K., Kishino, Y., Terada, T., and Nishio, S.: A Destination Prediction Method Using Driving Contexts and Trajectory for a Car Navigation Systems, in *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2009)*, pp. 190–195 (Mar. 2009).

3. 研究会等発表論文（査読付）

1. 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型頭部装着ディスプレイのための背景を考慮したオブジェクト配置手法, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2005) 論文集, Vol. 2005, No. 6, pp. 749–752 (July 2005).
2. 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 広角カメラを用いた光学式シースルー型 HMD における情報提示手法, インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2005) 論文集, pp. 9–14 (Dec. 2005).

3. 田中宏平, 寺田 努, 山口喜久, 中川隆志, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムのための運転状況を考慮した目的地予測手法, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2007) 論文集 (Feb./Mar. 2007).
4. 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティングのためのユーザ状況を考慮した知覚影響度に基づく情報提示手法, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2008) 論文集, Vol. 2008, No. 1, pp. 1479–1486 (July 2008).
5. 片山拓也, 中宮正樹, 山下雅史, 村尾和哉, 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 装着型センサを用いた経路推薦機構をもつナビゲーションシステムの開発, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2008) 論文集, Vol. 2008, No. 1, pp. 641–649 (July 2008).
6. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 西尾章治郎: Flash と装着型センサを連携させた体感型ゲームの作成支援フレームワーク, インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2008) 論文集, pp. 111–112 (Nov. 2008).
7. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 西尾章治郎: 装着型センサを用いた体感型 Flash コンテンツ作成支援フレームワーク, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2009) 論文集, Vol. 2009, No. 1, pp. 280–287 (July 2009).

4. その他の研究会等発表論文

1. 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型 HMD のための背景を考慮したオブジェクト配置手法, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 1, pp. 9–16 (Mar. 2005).
2. 宮下浩一, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 田中宏平, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムにおける情報提示手法, 電子情報通信学会 2006 年総合大会 基礎・境界講演論文集, p. 313 (Mar. 2006).
3. 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムにおける情報配置手法, 電子情報通信学会 2006 年総合大会 基礎・境界講演論文集, p. 314 (Mar. 2006).

2006).

4. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型頭部装着ディスプレイのための背景を考慮した情報提示手法とその評価, ウェアラブルコンピューティング研究会 (Oct. 2006).
5. 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティングのための状況依存情報提示機構の実現に向けて, ウェアラブルコンピューティング研究会, Vol. 3, No. 6, pp. 1-5 (Oct. 2007).
6. 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピュータのための状況依存情報提示機構, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2007, p. 45 (Dec. 2007).
7. 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 情報爆発社会におけるユーザ状況を考慮した情報提示装置選択機構, 情報処理学会 第 70 回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 1-2 (Mar. 2008).
8. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: カーナビゲーションシステムのための走行履歴と運転状況を考慮した目的地予測手法, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2008) 論文集 (Mar. 2008).
9. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムにおける目的地予測手法, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2008, p. 34 (Nov. 2008).
10. 矢高真一, 寺田 努, 塚本昌彦, 田中宏平, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティング環境におけるユーザ状況を考慮した音声情報提示システム, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2008, p. 32 (Nov. 2008).
11. 片山拓也, 村尾和哉, 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: イベント空間におけるユーザ情報を活用した経路推薦機構をもつナビゲーションシステムの開発, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2008, p. 36 (Nov. 2008).
12. 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 西尾章治郎: Flash コンテンツクリエイタのための体感型コンテンツ作成支援フレームワーク, 情報処理学会研究報告 (エンターテイメントコンピューティング研究会 2008-EC-11), pp. 63-68 (Dec. 2008).

13. 矢高真一, 田中宏平, 寺田 努, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティング環境におけるユーザ状況を考慮した音声情報提示手法, 情報処理学会研究報告 (ユビキタスコンピューティングシステム研究会 2009-UBI-22), Vol. 2009-UBI-22, No. 11 (May 2009).
14. 矢高真一, 田中宏平, 寺田 努, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピュータのためのユーザ状況を考慮した音声情報提示手法, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2009, p. 32 (Nov. 2009).

5. デモ・展示

1. 田中宏平: 目的地予測カーナビゲーションシステム, 「IT 連携フォーラム OACIS」第 13 回シンポジウム D 2 学生を中心としたポスター展示 (Dec. 2007).

以上

内容梗概

近年、コンピュータの小型化・軽量化によりコンピュータを服のように着て生活するウェアラブルコンピューティングが注目を集めている。ウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザは計算処理を行うコンピュータをはじめ、人間や周辺環境の状態を調べる装着型センサやカメラ、様々な入出力デバイスを服のように着ているため、作業中でもコンピュータを利用できる。また、コンピュータが常にユーザの状況をセンシングすることで、時々に応じた情報をシステム側から能動的に提供できる。具体的には、街中でユーザの目的地までの経路を示すナビゲーションシステムや、料理や介護などの作業を支援するシステムなど数多くの生活に密着したシステムが提案されている。

一方で、ウェアラブルコンピューティング環境では、従来はコンピュータを扱えなかった、自動車や自転車の運転中といったユーザの移動中、日中の屋外など周辺が明るい環境、工場や繁華街といった騒音の大きい環境など、様々な利用環境でコンピュータを用いるため、提供される情報量が多く、必要な情報を取得できない問題や、環境の影響により情報に気付けない問題が頻繁に発生する。例えば、自動車を運転して移動する際には多くの情報を提示してもユーザは全てを見る余裕がなく、ウェアラブルコンピューティング環境で多用されるシースルー型 HMD (Head Mounted Display) に表示された情報は日光の強い場所では読みとれない。本論文ではこれらの問題に対し、2つのステップで問題を解決する。まず、移動中などにおいて提示情報に注意を向けられず、必要な情報が得られないという問題に対して、提示する情報を適切に選択し、提示する情報量を制限することを考える。周辺環境の影響で提示された情報を認知できないという問題に対しては、環境音などの周辺環境、ユーザの作業状態を考慮して適切な手段を用いて情報提示することで問題を解決する。

前者の、提示する情報量の制限においては、ユーザが必要とする情報を予測した上で、自動的に適切な情報を選択し、不要な情報の提示を制限する。本論文では提示情報を制限すべき状況の例として、特に移動中に着目し、移動中のユーザを対象とした情報選択を考える。移動時に必要となる情報は主にユーザの目的地に関するものであると考えられるため、移動中のユーザの移動履歴や環境をもとにユーザの目的地を予測する目的地予測手法を提案する。後者の、適切な手段を用いた情報提示においては、ウェアラブルコンピューティング環境で、周辺環境の影響がもっとも少ない提示手段を自動的に選択して情報を提示す

る。本論文では、まずウェアラブルコンピューティング環境で多用されているシースルー型 HMD の利用を想定し、その際に周辺環境としてもっとも問題となる HMD の背景の影響を考慮した情報配置手法を提案する。さらに、他の情報提示デバイスを想定し、動的に提示に適したデバイスを選択する状況依存情報提示機構を提案する。

本論文は5章から構成され、その内容は次のとおりである。まず、第1章で序論として研究背景、研究動機、および本研究で想定しているサービスについて述べる。第2章において、移動中のユーザのための提示する情報量の制限を目的とした目的地予測手法について述べる。この手法では、ユーザの移動経路や環境に基づきユーザの目的地を予測する。また、自動車、徒歩と自転車による移動データを用いて提案手法を評価し、その有効性を検証する。

第3章では、周辺環境を考慮した適切な情報提示として、シースルー型 HMD を想定した情報配置手法について述べる。この手法では、シースルー型 HMD の視認性を低下させる要因は HMD の背景であると仮定し、装着型カメラを用いて背景を取得して視認性のよい領域を算出する。また、情報の提示位置を決定する際には、視認性だけでなく、アプリケーション制作者の意図などの制約条件を考慮して配置を行う。さらに、提案手法を評価し、その有効性を検証する。

第4章では、ウェアラブルコンピューティング環境において様々な情報提示デバイスを利用している状況を想定し、適切な手段を用いた情報提示を目的とした情報提示デバイス選択機構について述べる。この機構では、ユーザの周辺環境や作業状態など情報提示に影響すると考えられる要因を定義する枠組みを提供することで、それらの要因に基づく認知に対する影響度を算出し、最適な情報提示デバイス選択を行う。また、プロトタイプシステムを用いて提案機構を評価し、その有効性を検証する。

第5章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

目次

1 序章	1
1.1 研究の背景	1
1.2 本研究で想定するサービス	2
1.3 研究内容	4
1.4 本論文の構成	5
2 情報選択のためのユーザ目的地予測手法	7
2.1 まえがき	7
2.2 関連研究	8
2.2.1 目的地推定手法	8
2.2.2 移動手段推定手法	9
2.2.3 位置情報を活用した情報選択	9
2.3 想定環境	10
2.3.1 目的地予測手法の位置づけ	11
2.3.2 想定サービス	11
2.4 提案手法	12
2.4.1 全出発地手法	13
2.4.2 利用頻度の少ない経路の一時利用	15
2.4.3 基幹経路利用時	18
2.4.4 2手法の予測の差異を用いた予測	20
2.4.5 移動環境を考慮した手法	22
2.4.6 状況を考慮した目的地予測手法	23
2.5 評価	26

2.5.1	自動車移動における評価	26
2.5.2	徒歩と自転車移動における評価	29
2.6	考察	31
2.6.1	出発直後の予測	31
2.6.2	学習量の与える影響	32
2.6.3	出発地, 目的地の記録	33
2.6.4	情報提示を含めた評価	33
2.7	むすび	34
3	光学式シースルー型 HMD のための情報配置手法	35
3.1	まえがき	35
3.2	想定環境	36
3.2.1	ウェアラブルコンピューティング環境	37
3.2.2	視界を遮らない HMD	38
3.2.3	想定サービス	43
3.3	オブジェクト配置手法	44
3.3.1	オブジェクト表示に適した領域の決定	45
3.3.2	制約条件を考慮した表示位置の決定手法	48
3.4	パラメータの決定	55
3.5	実装	61
3.5.1	オブジェクトの視認性の良い位置の算出法の実装	61
3.5.2	制約条件を考慮した表示位置の決定手法の実装	64
3.5.3	計算コスト	64
3.6	評価実験	65
3.6.1	実験結果	66
3.7	考察	68
3.7.1	他のシースルー型 HMD への対応	68
3.7.2	制約条件の種類	69
3.7.3	関連研究	71
3.8	むすび	72

目 次	xi
4 状況依存情報提示機構	75
4.1 まえがき	75
4.2 想定環境	76
4.3 関連研究	78
4.4 提案機構	79
4.5 実装	89
4.5.1 情報提示デバイスの定義	89
4.5.2 情報変換フィルタの定義	90
4.5.3 状況取得デバイスの定義	91
4.6 考察	91
4.6.1 提示デバイス決定に要する処理コスト	91
4.6.2 提示デバイス選択の有効性評価	92
4.6.3 アプリケーションの作成の手間	94
4.6.4 影響度の一貫性	95
4.6.5 状況の取得について	95
4.7 むすび	96
5 結論	97
謝辞	99

第1章

序章

1.1 研究の背景

マイクロエレクトロニクス技術の発展による電子デバイスの小型化・軽量化に伴い、人々が携帯電話や音楽プレイヤー、携帯型ゲーム機などの高機能な携帯型コンピュータを持ち歩くことが一般的になっている。近年では、それらの携帯型コンピュータの機能がより高度化し、ユーザは携帯電話を用いてインターネット上にある情報を検索したり、放送されるテレビ番組を閲覧したり、位置観測システムから取得した現在位置情報を用いて現在位置周辺の任意の情報を取得したりできるようになった。このような技術の進歩から、ユーザがコンピュータを服のように常に着て生活し、常時情報を閲覧可能なウェアラブルコンピューティング環境が実現されつつある。ウェアラブルコンピューティング環境は従来のコンピューティング環境と比較し、次の3つの特徴をもつ [77].

- ハンズフリー

コンピュータを装着するため、手を使用せずに情報を閲覧できる。

- 生活密着

常にコンピュータを装着した状態で日常生活を行う。

- 常時電源オン

コンピュータは常に電源が入っており、使いたいときにすぐにコンピュータを使用できる。

ウェアラブルコンピュータを利用している様子を、図 1.1 に示す。この図では、ユーザは計算処理を行う小型コンピュータをはじめ、自分の状態や周辺環境の状態を取得するために3軸加速度センサ、方位センサ、GPS (Global Positioning System) レシーバなどの装着センサ、コンピュータからの情報を閲覧するためにヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display)、腕時計型ディスプレイ、骨伝導イヤホン、振動子といった多種類の情報提示デバイスを身に着けている。

このようなウェアラブルコンピュータを用いることで、特に作業中や移動中などの従来ではコンピュータを扱わなかった状況でもコンピュータを扱えるようになるが、このような状況では従来のコンピューティング環境とは、情報の認知において違いがあると考えられる。具体的には、集中する必要のある作業中にはユーザが認知できる情報量が少なくなったり、周囲が騒がしい環境で音声で情報提示を行っても情報が聞き取れないなどの違いである。したがって、ウェアラブルコンピューティング環境の情報提示においては、従来のコンピューティング環境とは異なった情報提示機構が必要である。

1.2 本研究で想定するサービス

本論文では、ユーザがコンピュータを服のように常に着て生活し、常時サービスを受けられるウェアラブルコンピューティング環境を想定している。ウェアラブルコンピューティング環境では、その生活密着・常時電源オンといった特徴を生かし、次のようなアプリケーションが実用化、研究されている。

- 工場や医療などの作業現場で作業に必要な情報を閲覧する作業支援システム [9, 27, 28, 31, 35, 49]
- 個人の健康状態を常時センシングし、健康異常・おすすめ行動を通知する健康管理システム [37, 40]
- 街中でユーザに有益そうな情報を配信する街角情報配信システムやナビゲーションシステム [7, 11, 12, 13, 14, 15, 25]
- 人の行動や視界を常時取得し、生活に活用するライフログや記憶補助システム [16, 17]

これらのアプリケーションでは、ユーザは以下の2種類のいずれかの方法で情報を取得する。



図 1.1: ウェアラブルコンピュータの装着例

- 能動的な情報取得

ユーザ自らが、必要時に情報へアクセスして取得する方法である。この方法は、ユーザの意思により情報を取得するため、不必要な情報を取得する可能性は少ないが、ユーザの入力が必要であったり、ユーザの気付けない情報を知る機会は少ないという特徴がある。

- 受動的な情報取得

環境からの働きかけにより、ユーザが特別に操作することなく情報を取得する方法である。この方法は、ユーザの意思によらず情報を取得するため、不必要な情報を取得する可能性があるが、ユーザに入力の手間がなく、ユーザの発想とは異なる視点からの情報が得られることがあるという特徴がある。

このように、これら2種類の方法には情報を得るために必要な操作量とユーザに有益な情報の取得精度に一長一短があるが、ウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザは常時情報を閲覧できるデバイスをもっている、入力デバイスが貧弱であり入力が困難なことが多いなどの理由から、ユーザが受動的に情報を取得する方法を用いることが多い。そのため本研究では、このようなユーザが受動的に情報を取得するアプリケーションを想定する。

1.3 研究内容

ユーザが受動的に情報を取得する環境では、提示された情報の認知において様々な問題が発生する。発生する問題の例を下記に示す。

- 自動車の運転中など目の離せない作業で、あまり多くの情報を認知できない。
- ディスプレイに表示された道案内が、周辺が明るすぎて読み取れない。
- 周囲の騒音が大きくなり、音声情報が聞こえない。

このようにウェアラブルコンピューティング環境では、様々な状況で情報の認知が困難となると考えられる。そこで本論文では、ウェアラブルコンピューティング環境におけるアプリケーションにおいて、ユーザに必要な情報を確実に認識させることを目的とし、提示すべき情報をユーザの状況を用いて選択する技術、ユーザの状況に応じた手段で情報を提示する技術に関して研究を行う。

本論文では、アプリケーションからの情報提示要求が発生してから、図 1.2 に示すような2つのフェーズで処理を行い、ユーザへ情報提示することを考えている。

- 情報選択フェーズ

提示する情報をユーザの作業状態、行動予定などを用いて選択し、提示量を制限する。

- 情報提示フェーズ

提示する情報をどの情報提示デバイスでどのように提示するかをユーザの作業状態、ユーザの周辺環境を用いて決定する。

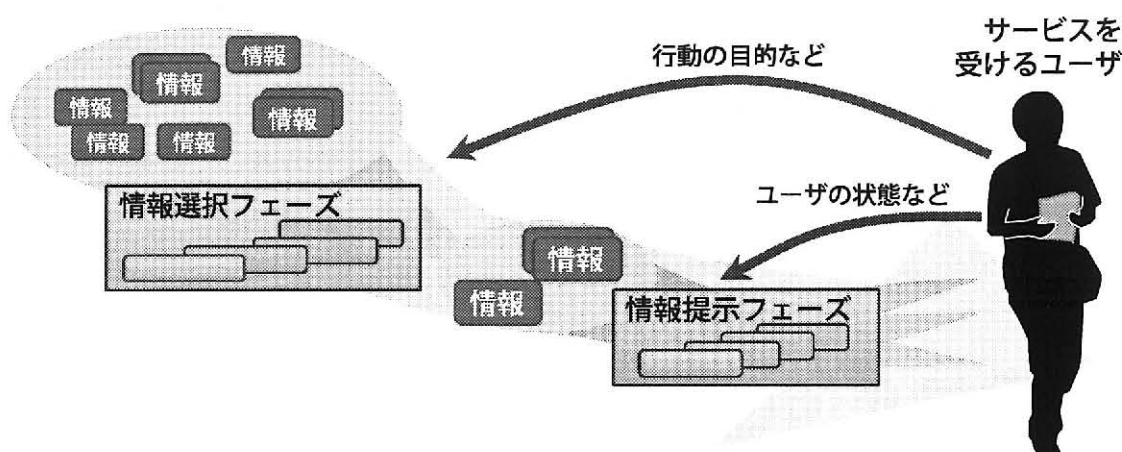


図 1.2: 情報提示までのイメージ

本論文では、情報選択フェーズにおける技術の一つとして移動中のユーザのための情報選択技術、情報提示フェーズにおける技術の一つとして光学式シースルー型 HMD を対象とした情報提示技術、およびそのような各情報提示デバイスを対象とした情報提示技術を統合して状況依存情報提示を実現する情報提示機構について述べる。

1.4 本論文の構成

本論文は 5 章から構成され、その内容は次のとおりである。まず、第 2 章では、情報選択フェーズにおいて、移動中のユーザを対象とした提示情報選択のための目的地予測手法について説明する。また、自動車を用いた移動、および徒歩と自転車を用いた移動の 2 種類の移動データを用いて提案手法を評価し、その有効性を検証する。

第 3 章では、ウェアラブルコンピューティング環境において多用されているシースルー型 HMD を利用している環境を想定し、提示情報をより見やすく配置する手法を提案する。提案手法では、シースルー型 HMD の視認性を低下させる要因は HMD の背景であると仮定し、装着型カメラを用いて取得した背景から視認性のよい領域を算出し、情報を配置する。また、実機を用いて提案手法を評価し、その有効性を検証する。

第 4 章では、ウェアラブルコンピューティング環境において様々な情報提示デバイスを利用している状況を想定し、ユーザに対して情報提示を行う際に、現在の状況に応じてもっとも適切なデバイスを選択する機構を提案する。さらに、提示機構のプロトタイプシステ

ムを用いて評価し、その有効性を検証する。

最後に第5章では、本論文の成果を要約したのち、今後の研究課題について述べ、本論文のまとめとする。

なお、第2章は、文献 [29, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 70, 71, 72] で公表した結果に基づき論述する。第3章は、文献 [51, 52, 53, 54, 55, 56] で公表した結果に基づき論述し、第4章は、文献 [67, 68, 69] で公表した結果に基づき論述する。

第2章

情報選択のためのユーザ目的地予測手法

2.1 まえがき

第1章で述べたように、ウェアラブルコンピューティング環境ではユーザが受動的に情報を取得するようなアプリケーションが多く考えられている。このようなアプリケーションを複数同時に活用することを考えると、ユーザはそれぞれのアプリケーションから次々と情報を取得するため、情報が多数提示されて困惑したり、重要な情報を見落とすなどの問題が発生する。特に作業中や移動中は、提示された情報をユーザが注意深く読むことは難しく、一度に多くの情報を認知することは困難である。そのため、集中の必要な作業中や移動中には、適切な情報を選択して提示することが重要となる。

本研究では、特に移動中のユーザを対象とした情報選択について考える。移動時間はウェアラブルコンピューティング環境でコンピュータを有効に扱えるようになった時間であるが、従来研究では特定の作業に特化した情報選択が多く [9, 27, 28, 31, 35, 49]、移動中を想定し提示情報量の削減のための情報選択の研究は行われていない。また、25～35歳の有職者の平均通勤時間が片道38分 [2] という調査結果もあり、これらの移動時間を有効活用することはウェアラブルコンピューティングの大きな目的である。

移動という行動にはユーザの意図が含まれており、ある目的をもってユーザは移動先（目的地）へ向かっていることから、移動時の情報提示においてユーザ移動先を知ることが提示情報量の制限に有効であると考え、本研究では、移動中のユーザに対する情報選択のためのユーザの目的地予測手法を提案する。提案手法では、ユーザの日常的な移動を想定し、ユーザの入力なしで利用できるユーザの移動経路や移動時の環境データを用いて目的地を

予測する。ユーザの目的地を正確に知ること、目的地で行う行動の推測にも活用できる。移動中のユーザに対する情報提示においては、移動中のユーザは常に情報を閲覧できるわけではないため、あるタイミングで正しい目的地が予測できることよりも、ユーザがいつ閲覧しても情報が得られるように可能な限り長い期間、正しい目的地を予測できることが重要となる。

以下、2.2節で関連研究について述べ、2.3節で想定環境について説明する。2.4節で移動経路とユーザ状況を用いた目的地予測手法を提案し、2.5節で評価を行い、2.6節で考察し、最後に2.7節で本研究をまとめる。

2.2 関連研究

2.2.1 目的地推定手法

これまでに、自動車での移動において移動経路からユーザの目的地を予測する研究がいくつか行われている。文献 [21] で提案されている、カーナビゲーションシステムのための移動経路から目的地を予測する手法では、過去に走行した経路と走行中の経路を地図を格子状に区切ったマスに変換し、そのマスの一致度から目的地の予測を行っている。この手法では、現在地のマスは通過してから時間が経過しているマスよりも重要であると考え、現在地に近いほど一致度の重みを大きくして予測している。また、走行頻度が高い経路では一致度を加算し、頻度の高い経路を重要視するようにしている。さらに頻度が高すぎる目的地に対しては、訪問回数の多い目的地に予測が偏ってしまい予測結果が悪化してしまうことから、訪問回数の加算回数に閾値を設けている。評価結果から、いつも決まった道を用いる人に対しては、訪問頻度の高い目的地を確実に予測できているが、信号のタイミングで右左折する交差点を変えるとといったように経路を少しずつ変更しながら運転のするユーザに対して、目的地予測の精度が下がっている。この研究ではさらに、目的地予測に関する評価に加えてプロフィールを用意して実際に広告を表示し、その広告がどの程度被験者の嗜好と合っていたかも評価している。

文献 [84] では、移動軌跡を利用した目的地予測に対して、その予測の不確定さを移動先エントロピとして定義している。移動先エントロピを用いることで、これまでに提案されている移動履歴を用いた目的地予測手法において、移動開始からどの程度の時間で予測が安定するかや、信頼のおける予測を行うためにはどの程度の走行数が必要かといった点を

検討できる．この文献 [84] で用いられている予測手法 [85] は、1つの交差点を1ノードとし、ノードの推移から移動先を予測している．移動先エントロピは、運転開始直後は高く、走行を続けることで次第に低くなり、一定時間が経過するとほぼ一定になるが、その値はユーザによって異なることが示されている．また走行数が増えるとエントロピが高くなるが、一定数を超えると走行数が増えてもエントロピがあまり変わらなくなり収束することも示されている．エントロピと目的地予測精度の間には大きな相関があり、この研究の被験者 10 人の結果では、運転開始から約 10 分でエントロピが収束するため、目的地予測の推定精度も収束すると結論づけられている．

これらの手法では、ある目的地に向かうために常に同じ経路を利用している環境では高い精度で目的地が予測できるが、多様な経路を用いて目的地に向かう場合に予測精度が低下するという問題がある．

2.2.2 移動手段推定手法

文献 [23, 41] では、ユーザがどのような交通手段を用いようとしているかを予測する手法について述べられている．ユーザは GPS レシーバ、地図データを所持しており、GPS データから求まる位置と速度、および地図上のバス停等、移動手段を切り替える可能性のある位置（駐車場、駅など）から、ベイジアンネットワークを用いて、ユーザが移動手段切り替える可能性を算出している．また同時に予測された移動手段の可能性から、ベイジアンネットワークを用いて一定時間後のユーザの位置を予測できる．この手法ではユーザの移動手段や一定時間後の位置の予測を目的としており、本手法を用いることで情報選択に役立つと考えられるが、位置予測に関して、数百 m 先までしか予測できておらず、先の行動を見据えた情報選択に利用することは困難である．

2.2.3 位置情報を活用した情報選択

位置情報を活用して情報選択を行うサービスは、単純なものは携帯電話やスマートフォンなどを用いて既に数多く実用化されている．

例えば現在位置周辺の店舗を探すサービスである FOOMOO for iPhone¹ や GoogleMAP² は、携帯電話に搭載されている GPS や基地局から推測される位置情報をクエリに添付すること

¹<http://www.hotpepper.jp/doc/service/iphone/>.

²<http://maps.google.com/>.

で、店舗データベースに登録されている多数の店舗情報から、現在位置に近い店舗の店情報、口コミ情報、クーポンなどを選択できる。セカイカメラ³やlayer⁴では、現在位置情報と方位情報から視界に入っていると考えられる領域内の店舗情報やユーザによって作成された位置依存情報などを検索できる。

位置情報を用いた情報選択の研究も数多く行われている。文献 [50] では、現在位置の情報だけを用いるのではなく、過去の位置履歴を用いてユーザのよく訪問する店を検出し、他の類似嗜好をもつユーザの情報からユーザの好みに合う店を提示する。この研究では、推薦する情報の選択には既存の協調フィルタリング [42] を用いており、移動経路情報から訪問した店を特定する手法を新規提案している。文献 [47] では、ユーザの移動履歴からユーザごとの行動パターンを抽出し、他のユーザの行動パターンから類似したパターンを求めることで、行動を推薦する手法を実現している。

このように、ユーザの位置情報を活用した情報選択は数多く提案、実用化されているが、位置情報から予測可能な別の情報を用いた情報選択は未だ研究段階であり、本研究で実現しているウェアラブルコンピューティング環境におけるユーザの目的地を用いた情報選択は行われていない。

2.3 想定環境

本研究では、ユーザは自身の位置情報を取得するセンサ、腕時計型ディスプレイやHMD、イヤホン等の音声提示デバイス、およびウェアラブルコンピュータを装着しているものとする。このような環境は、ウェアラブルコンピューティングにおいて一般的な環境である。また本研究では、ユーザが現在どのような移動手段を用いているかは取得できるものとする。前節の関連研究でも述べたとおり、現在は未だユーザの移動手段を確実に取得する手法は確立されていないが、交通機関の利用は改札や切符の購入などから将来的には確実な方法で取得でき、自動車の利用も自動車の電子鍵やカーナビゲーションシステムなどの周辺デバイスとの連携で容易に認識できると考え、本研究では移動手段は確実に取得できるものとして考えた。

さらに本研究では、特に自由度の高い自動車での移動、徒歩および自転車に着目して手法を提案する。自由度の高い移動を想定する理由は、バスや電車などの公共交通機関は、切

³<http://sekaicamera.com/>.

⁴<http://layar.com/>.

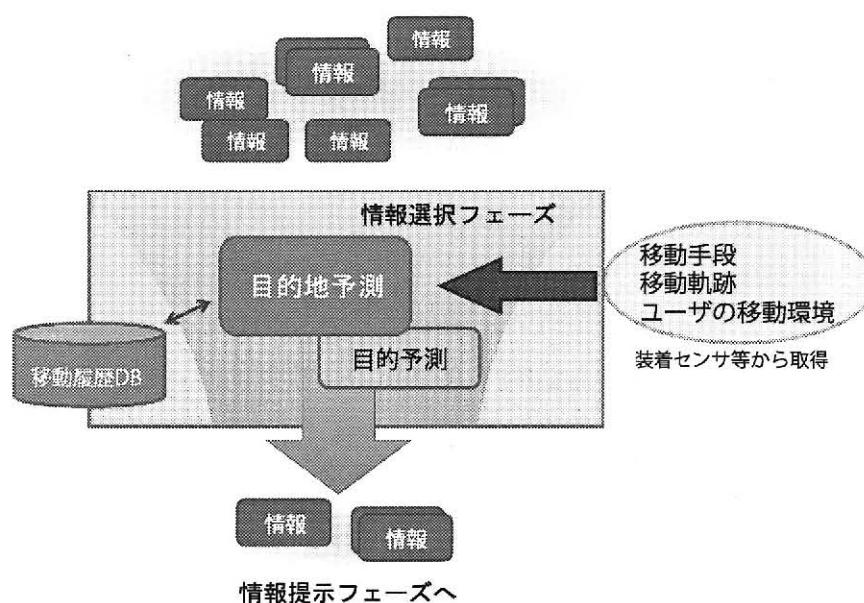


図 2.1: 目的地予測による情報選択の構成

符購入時などに目的地が取得できる上、移動経路や停車位置が静的で予測が比較的容易であると考えたためである。自由度の高い移動手段での目的地予測が可能となれば、これらの移動手段の目的地予測も同様に行えると考えられる。

2.3.1 目的地予測手法の位置づけ

本研究で用いる目的地予測手法の位置づけを図 2.1 に示す。本研究、移動中のユーザに対して、その移動手段、移動軌跡、移動環境を用いて目的地を予測し、多数存在する情報からユーザに必要と考えられる情報に絞り込む。ユーザの移動軌跡や移動環境は装着センサから取得し、これらのデータを移動履歴データベース（DB）に蓄積しておく。現在の状況と履歴を比較することで、目的地を予測する。

2.3.2 想定サービス

本研究では、ユーザが特別に入力を行わなくとも、ユーザに対する推薦情報を提示できるサービスを想定している。入力を必要としない理由は、ウェアラブルコンピューティング環境ではユーザは貧弱な入力デバイスしか持っておらず文字入力には困難である点、ユー

ユーザが受動的に情報を取得する環境では、確実に有益な情報が得られるか分からず、目的地をあらかじめ入力するには手間が大きすぎる点から、ウェアラブルコンピューティング環境における情報選択にはユーザの明示的な入力を必要としないことに意義があると考えたためである。ユーザが移動中に推薦情報を取得する場合、ユーザの目的地を知り提示する情報を選択することが特に重要となる。ユーザが初めて訪問するような目的地に対しては、ユーザはあらかじめ目的地の下調べを行う、目的地までの経路を調べるなどの目的地を特定したユーザの能動的な情報取得が行われることが多く、目的地を容易に特定できることが多い。一方で、ユーザが一度でも訪問したことのある目的地へは、そのような前触れなく移動を開始するため、ユーザの入力に基づかない目的地の特定が必要であると考えられる。そのため本研究ではユーザが訪問したことのある目的地をユーザの入力なしに特定することを目的とする。

提案手法を用いて多数の情報から情報を選択することで、次のようなサービスを実現できる。

- 食堂へ昼食を食べに行くことを予測し、お勧めメニューを提示する。
- 駅に向かっていることを予測し、電車の時刻表を提示する。
- 車での帰宅時に、経路上の事故情報を提示する。

提案手法では、情報推薦サービスが生成した多数の情報から、目的地予測の上位 k 位に入る目的地に関連した情報をユーザに提示する。複数の情報を提示する理由は、正しい目的・目的地が必ずしも正確に予測されとは限らないためである。提示の一例を図 2.2 に示す。ウェアラブルコンピューティング環境の腕時計ディスプレイや HMD などの視覚提示デバイスには解像度の高いものは少なく、情報の表示量に限りがあるため、本研究では目的地予測の上位 k 位（図 2.2 では $k=4$ ）の情報のみを表示する。音声提示など複数目的地に関する情報を提示できない場合には、 $k=1$ の結果を用いる。

2.4 提案手法

本研究では、正しい目的地が常に予測でき、情報が選択されることが重要であると考え、ユーザの向かう目的地ができるだけ長い時間、目的地予測の上位 k 位以内に入る目的地予測手法の実現を目的とする。

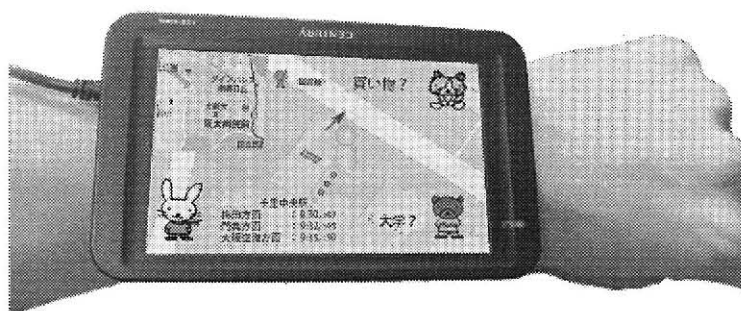


図 2.2: 情報推薦サービスの表示例

本研究では、まず全ての出発地からの移動を統合した移動履歴と現在の移動経路との一致度から目的地を予測する**全出発地手法**を、基本となる手法として提案する。次に、全出発地手法だけでは、利用頻度の少ない経路を一時的に利用した際に、予測の大きな変化が発生してしまうという問題に対して、**利用頻度考慮手法**を提案し、極端に利用回数の多い経路で発生する問題に対して、**出発地別予測手法**を提案する。さらに、移動経路から判断できないような状況に対応するため、**移動環境考慮手法**を提案する。最後に、これらの手法の利点を生かすため、適応的に利用する**状況別予測手法**を提案する。以降で、詳細に説明する。

2.4.1 全出発地手法

全出発地手法では、現在の移動経路と全出発地からの移動経路履歴を比較し、その一致度から目的地を推測する。本手法は、利用中の経路と目的地とは深い関係があると考えられるため、利用中の経路を用いて目的地に向かった割合から目的地を予測する。また、利用中の経路だけで予測すると、確率変化が離散的になり、情報提示も突然情報が出たり消えたりしてしまう、といった問題から、過去に利用してきた経路の確率も一定割合で保持する。具体的には、まず図 2.3 に示すように、これまでの移動経路を分岐ごとに経路リンクに分割し、目的地到着時に、移動したそれぞれの経路リンクに対して目的地の訪問回数を1加算する。なお、経路リンクは方向を考慮したものとなっており、上り下りでは別の経路リンクとしている。このようにして記録した訪問回数を基に以下の式を用いて目的地を予測する。

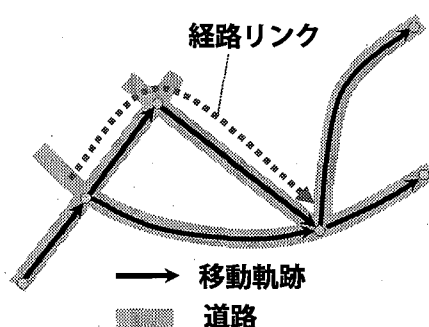


図 2.3: 道路と経路リンク

$$P_{ij} = (1 - \alpha) \frac{N_{ij}}{N_i} + \alpha P_{(i-1)j} \quad (2.1)$$

P_{ij} は、出発地から i 番目の経路リンクに差し掛かったときの目的地 j に向かう確率であり、 N_i は今までに経路リンク i を利用した回数、 N_{ij} は経路リンク i を利用して目的地 j に行った回数である。また、 α は通過してきた経路をどの程度重視するかを表す係数であり、0 から 1 の値をとる。全出発地手法では、 $\alpha = 0.5$ を用いた。本予測手法では、移動に伴って現在利用中の移動中の経路リンクが変更されるたびに、全ての目的地への確率を再計算する。なお、 P_{0j} は全移動回数に対する目的地 j に行った総回数の割合を示す。

この手法を用いた予測の一例を図 2.4 に示す。図は、あるユーザが出発地から目的地 A に自動車で移動したときの主要な目的地の予測確率遷移である。グラフの右側、すなわち目的地周辺では、目的地 A の確率が高く、予測手法は理想通り動作し、正しい目的地の情報を選択できると言える。一方、目的地までの距離 9,000m 付近では他の目的地と比較して目的地 A の確率が低く、正しい目的地の情報を提示できない。このように全出発地手法では、常に正しい目的地を目的地予測の上位に予測することが困難である。そこで、目的地予測の順位変動が発生している状況について、実際の自動車走行ログを分析した。その結果、抜け道走行時や、幹線道路などの頻繁に利用する経路移動時に確率が大きく変動し、本来の目的地の予測結果が乱れることが多いことが分かった。この問題は、関連研究で述べた自動車での移動を想定した目的地推定手法にも共通する問題である。そこで、そのような状況に対して有効と考えられる手法を検討する。

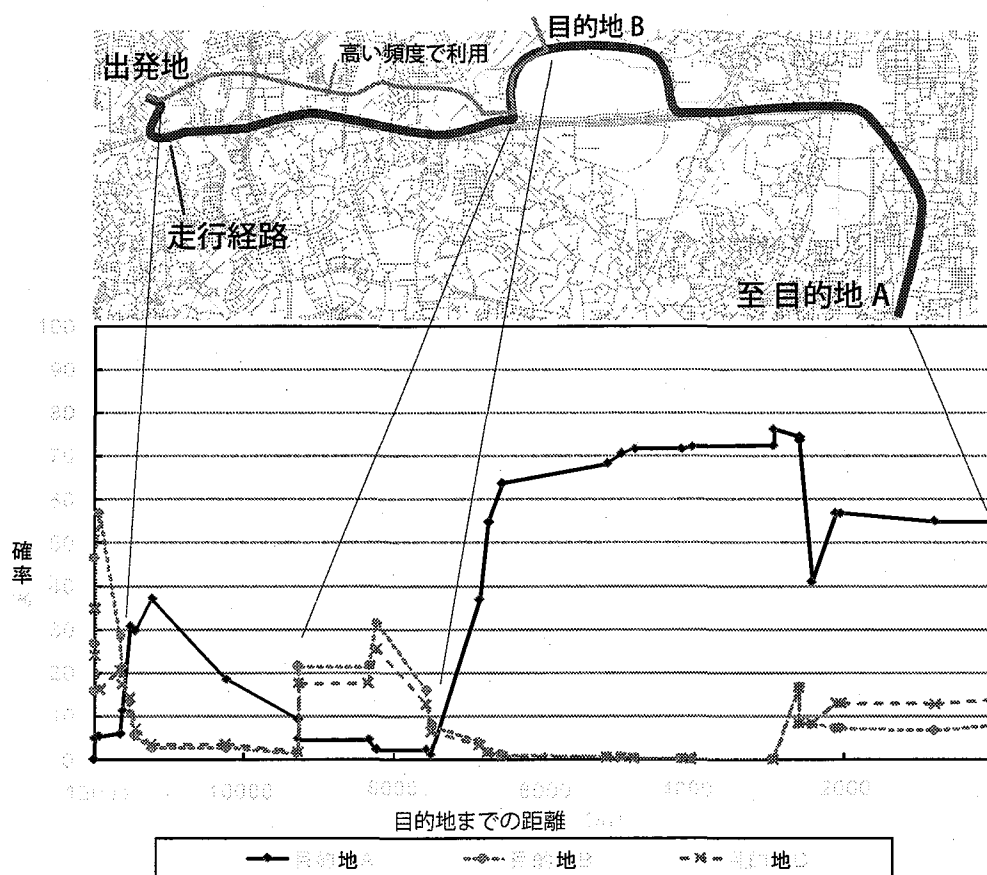


図 2.4: 全出発地手法を用いた目的地予測結果の一例 ($\alpha = 0.5$)

2.4.2 利用頻度の少ない経路の一時利用

利用頻度の少ない経路利用時の問題

実際の自動車の走行履歴を確認したところ、全出発地手法では抜け道の利用など普段利用する経路を一時的に離れて移動した際、その抜け道を用いて他の目的地へ向かったことがある場合に、確率が大きく変動していることが分かった。これは、全出発地手法がその経路リンクを用いて目的地に向かう回数の割合で目的地に向かう確率を算出しており、その通過回数が少なく信頼性が低い状態であっても同等に確率計算が行われるため発生する問題であると考えられる。例えば、図 2.5 に示す道路の場合、通常、目的地 A に向かう際には、経路リンク a, b, d と通過するのに対して、経路リンク b の代わりに利用頻度の少ない経路リンク c を通過した場合、以前に通過した経路リンク c の移動記録に大きく依存し、

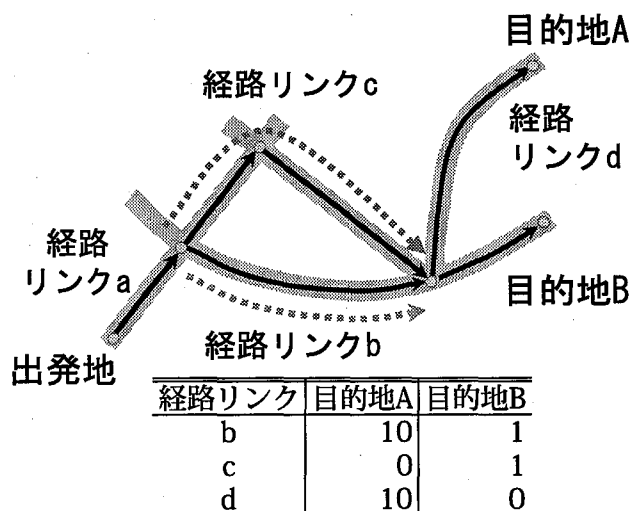


図 2.5: 利用頻度の少ない経路の移動の一例

正しい目的地の確率が大きく低下する。経路リンク d に復帰することで再び正しい予測になることから、この確率変化は一時的なものであり、信頼性が低いといえる。この一時的な確率変化によって、情報選択時に選択する情報が、間違った目的地に関する情報となり、突然全く別の目的地の情報がユーザに提示されるなどの問題が発生する。このような状況は、以下のような状況で発生する。

- 自動車運転時：目の前の信号が赤になったので、信号を回避するため別の道を利用した。
- 自動車運転時：道路が渋滞しており、回避するために別の道を利用した。
- 歩行時：信号が赤になったので、先に直交する横断歩道を渡った。
- 歩行時：いつもショートカットに用いている公園が雨でぬかるんでいたので回避した。

利用頻度の少ない経路利用時の対処

利用頻度の少ない経路利用時は、移動回数が少なく信頼性が低いと考えられる経路を利用回数の多い道路と同等に扱っていることに問題があり、利用頻度の少ない経路のデータ量が多くなれば、通常利用する経路の結果に近づくと考えられる。

そこで、全出発地手法で用いた α を変化させることで、経路の通過回数に応じた予測の重みづけを行う。 α は次の式を用いて求めた。

$$\alpha = \frac{N_{i-1}}{N_{i-1} + N_i} \quad (2.2)$$

N_i は経路リンク i の総利用回数である。この式を用いることで、総利用回数が同じ利用回数の経路リンクをたどる場合には、 $N_i = N_{i-1}$ となるため $\alpha = 0.5$ となり、それまでに通過してきた経路の重みと等しい重みを現在の経路リンクでの確率にかけ合わせる。初めての経路を通過する場合は、 $N_i = 0, N_{i-1} \neq 0$ 、つまり $\alpha = 1$ となり、現在通過中の経路の値を用いず、それまでに通過してきた経路の値をそのまま利用して予測する。なお、 $N_i = 0, N_{i-1} = 0$ となる場合も、 $\alpha = 1$ として計算する。これは、初めて利用した経路から、引き続き初めて利用する経路を用いる場合に、それまでに計算できていた確率と同じ値を使うことを意味する。この式(2.2)で導出する α を用いた全出発地手法を、**利用頻度考慮手法**と呼ぶ。

利用頻度考慮手法の評価

提案した利用頻度考慮手法について、実際に正しい目的地が上位に予測できる距離について、自動車での移動を用いて評価した。評価に参加した被験者の詳細を表2.1に示す。また評価軸として、総走行距離において正しい目的地が上位1位 (Top1)、上位4位 (Top4)に入る距離の割合を用いた。評価にTop4を用いた理由は、HMDなどの小さな画面の情報提示デバイスに情報を提示する際、高々4カ所の目的地に関する簡単な情報しか提示できないためである。なお、評価は全移動データを順に学習させながら目的地を予測するという実環境での利用と同様の条件で行った。

結果を図2.6に示す。結果から、Top1において約2%、距離にして約14kmの間、従来の全出発地手法より長い距離で正しい目的地を予測できた。t検定を行ったところ、この差には有意差が認められた。これは、従来の全出発地手法で利用頻度の少ない経路通過時に正しい目的地が一時的にTop1でなくなっていたものが、 α を変更することでTop1のまま予測できているためである。また、Top4についてはどちらの手法を用いた場合でも目的地の順位に差はなく、結果は同じであった。

さらに被験者1のデータを用いて、正しい目的地の順位変化についても評価した。表2.2に示す結果から、利用頻度考慮手法は、正しい目的地の順位の低下を防いでおり、利用頻度の少ない経路の通過により一時的に順位が下がる問題を解決できていることが分かる。

表 2.1: 被験者

	被験者 1	被験者 2
職業	学生	主婦
移動回数	63 回	104 回
期間	4ヶ月	4ヶ月
目的地数	11カ所	23カ所
平均移動距離	6400m	3180m

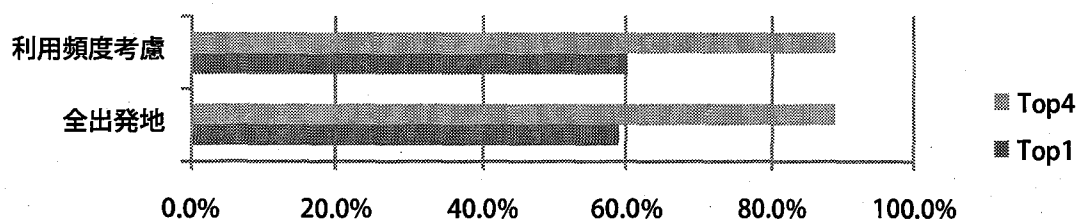


図 2.6: 利用頻度考慮手法の総移動距離に対する正しい目的地が Top1, Top4 に入る距離の割合

表 2.2: 正しい目的地の予測順位の変化回数

変化	全出発地手法	利用頻度考慮予測手法
上昇	65 回	66 回
低下	46 回	42 回

2.4.3 基幹経路利用時

基幹経路利用時の問題点

本研究では、複数の出発地から利用し、様々な目的地に向かうために利用するユーザにとっての中心経路を基幹経路とよぶ。この基幹経路利用時においても、実際の自動車の走行履歴から、求めたい目的地の確率が大きく変化することがあることが分かった。例えば、

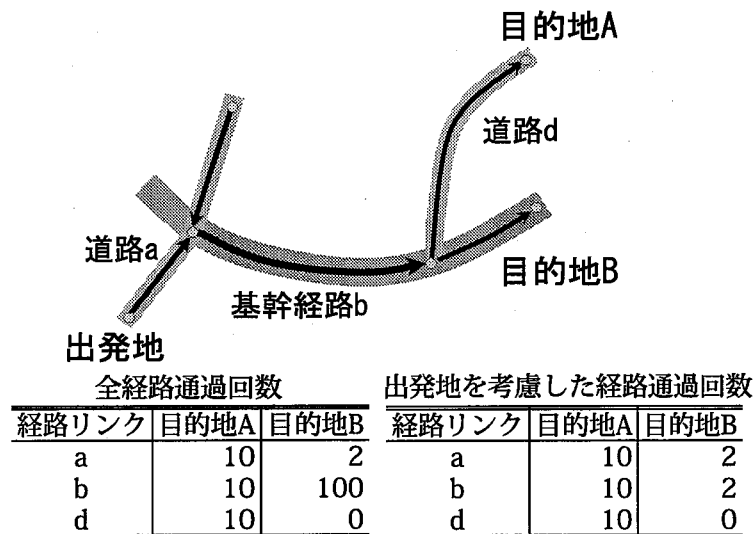


図 2.7: 基幹経路の走行

図 2.7 において、ユーザが経路リンク a, b, d と通過し、目的地 A に向かう場合、経路 a を利用時には目的地 A が正しく予測できるが、経路リンク b に差し掛かった際、経路リンク b は目的地 B へ向かう際に頻繁に利用している経路であるため、目的地 A に向かう確率は大きく変化する。

この確率変化は、基幹経路では別の出発地からのデータがノイズとなり正しい予測を困難としているために発生する。図 2.7 の例でも、出発地別で目的地を予測すれば、理想とする予測が行える。ただし、全ての場合で別の出発地からのデータがノイズとなるわけではなく、別の出発地からのデータがよい影響をもたらす可能性もある。

出発地を考慮した手法

利用頻度手法と、出発地別に学習した予測手法の違いを検証するため、予備実験を行った。本予備実験でも前節の実験と同様の、自動車の走行履歴を用いた。本研究では、出発地別に学習した予測手法を**出発地別予測手法**と呼ぶ。なお、出発地別予測手法で用いる α は、利用頻度考慮手法と同様に算出する。

実験では、表 2.1 の被験者 1 のデータを用いて、2 つの手法の確率変化に違いがどの程度あるのかを、正しい目的地に対する予測確率変化回数の割合を比較することで調べた。学習は全走行データを順に学習させながら目的地を予測するという条件で行った。

表 2.3: 正しい目的地に対する予測確率変化の割合

確率変化	利用頻度考慮手法	出発地別予測手法
増加	65.0% (316/486)	80.7% (167/207)
減少	35.0% (170/486)	19.3% (40/207)

ただし、括弧内は（目的地の確率変化回数/全確率変化回数）

結果を表 2.3 に示す。結果から、利用頻度考慮手法と比較して、出発地別予測手法の方が正しい目的地に対する予測確率が下がる割合が少なく、正しい目的地の確率変化が右肩上がりとなることが分かった。これは出発地別に学習を行うことで、その出発地を起点とした移動において、一時的な別経路を用いない限り、次に移動する経路を利用して目的地に行った回数が、それまでに通過していた経路を利用して目的地に行った回数から減ることではないためであると考えられる。抜け道等の一時的な別経路利用時には、その目的地に対する利用回数が減るが、同時に総利用回数も減るため、大きな確率変化は発生しにくい。そのため、利用頻度考慮手法と比較して正しい目的地に対しての確率が右肩上がりとなったと考えられる。

一方で出発地別で学習した場合は、分母が少ないことから明らかなとおり、予測に用いる移動履歴が集まりにくいという欠点がある。これはたとえユーザの向かう目的地が何度も訪問している場所であっても、その出発地から訪問したことがなければ、全く予測できないという問題や、学習回数の少なさから確率変化が大きくなりやすいといった別の問題を生む。

2.4.4 2手法の予測の差異を用いた予測

出発地別予測手法の評価実験から、出発地別予測手法と利用頻度考慮手法の2手法にはメリットとデメリットがあることが分かった。そこで、これら2手法を有効に利用するため、移動経路をいくつかの状況に分類し、適切な手法を選択的に用いることを考える。状況分類にはいくつかの方法が考えられるが、手法の特徴が直接表れる確率変化を用いることが直観的であると考え、2手法の確率変化の違いを用いる。具体的には、経路リンクの遷移が発生したときに、2手法それぞれの予測結果がどのように変化するかで場合分けを行う。予測結果の遷移から分類した状況とその意味を表 2.4 に、その発生頻度および、その

表 2.4: 2 手法の予測結果の遷移が示す目的地に対しての意味

状況	利用頻度考慮	出発地別	状況の示す意味
i	上昇	上昇	その目的地に行く際によく利用する経路に入った.
ii	上昇	下降	その目的地に行く際には、今回の出発地からはあまり利用しないが、別の出発地から利用する経路に入った.
iii	下降	上昇	その目的地に行く際にその経路をよく利用するが、別の目的地にもよく利用している経路に入った.
iv	下降	下降	その目的地に行く際にはあまり利用しない経路に入った.

表 2.5: 2 手法を組合せた確率変化の発生割合

状況	利用頻度考慮	出発地別	発生頻度	正しい目的地の割合
i	上昇	上昇	12.6%(239 回)	61.9%(148 回)
ii	上昇	下降	2.0%(38 回)	28.9%(11 回)
iii	下降	上昇	1.7%(33 回)	57.6%(19 回)
iv	下降	下降	83.6%(1586 回)	1.2%(19 回)

状況が本来の目的地に対して発生する割合について前節までの実験で用いていた実際の自動車走行データを用いて調査した結果を表 2.5 に示す.

結果から、2 手法の結果が異なる状況は、全走行データに対して約 4%とそれほど多くないことが分かった. また、これらの状況になった目的地が正しい目的地である割合は、2 手法で予測確率が上昇した場合でも 61.9%と確実とはいえない一方、2 手法とも減少している場合は 1.2%であることから正しい目的地に対して 2 手法の予測が下がることはほとんどないことが分かった. 以上から、各状況において表 2.6 に示すような予測手法を適用すればよいといえる. 状況 i ではその目的地は高い確率で正しいと言えるものの、正しい目的地でない可能性も同程度あるため、その目的地を高い確率で維持できる手法がよいと考えられる. 逆に状況 iv では、その目的地はほぼ確実に正しくないと言えるため、その目的地の

表 2.6: 各状況に求められる予測手法

状況	利用頻度考慮	出発地別	状況に求められる予測手法
i	上昇	上昇	その目的地の確率を下げない手法
ii	上昇	下降	不明瞭
iii	下降	上昇	不明瞭
iv	下降	下降	その目的地の確率を下げられる手法

確率を大きく下げられる手法がよいと考えられる。状況 ii および iii では、どのような手法が適するのかが現段階では不明瞭である。これらの状況において、具体的にどのような手法を用いるかは、2.4.6 節で述べる実験によって導出する。

2.4.5 移動環境を考慮した手法

これまでに提案した手法は移動経路から求めた経路リンクをもとに予測を行ったが、経路からの予測が困難な場合もあるため、時間帯、曜日、天気などの周辺環境およびエリア遷移を用いる**移動環境考慮手法**を提案する。エリアとは一辺約3,000mのマスキ状の領域のことであり、各エリアへの移入方向を4方向で記録したものをエリア遷移と呼ぶ。

この予測手法では、人の行動履歴に基づく行動推定に多用されているベイジアンネットワークを用いる。移動環境考慮手法では、移動を行っている時間帯、曜日、天気、荷物量といった移動環境は、目的地を決める互いに独立した要因であり、どのエリアを通過したかは目的地によって決まる結果である、という因果関係に基づき、もっとも単純な形として図 2.8 に示すベイジアンネットワークを構築した。ベイジアンネットワークでは、過去の移動時の移動環境から、表 2.7 のように移動環境ごとの目的地訪問回数を記録した移動環境別目的地訪問回数表を学習し、この表を用いて各状況における条件付確率を算出し、目的地を予測する。各条件付確率の初期確率分布は一様分布で与えた。各移動環境の粒度を、表 2.8 に示す。

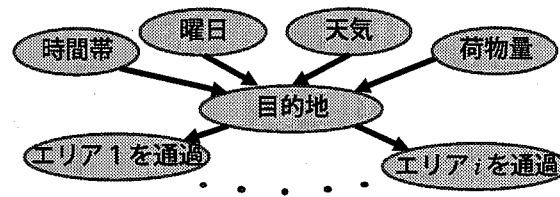


図 2.8: 提案したベイジアンネットワーク

表 2.7: 移動環境目的地訪問回数表の一例

移動環境 (時間帯, 曜日, 天気, 荷物量)	目的地候補地			
	A	B	...	Z
(朝, 休日, 晴, 少ない)	1	2	...	1
(朝, 休日, 晴, 多い)	1	4	...	1
:			...	
(夜, 平日, 雨, 多い)	1	3	...	5

表 2.8: 移動環境の粒度

移動環境	粒度
時間帯	朝, 昼, 夜
曜日	平日, 休日
天気	晴れ, 雨
荷物重量	少ない, 多い

2.4.6 状況を考慮した目的地予測手法

これまでに行った実験から, 2 手法の予測結果の遷移から状況を判断し, 適応的に予測手法を選択する状況別予測手法を提案する. 具体的には, 常に利用頻度考慮予測手法と出発地別予測を並列に行い, 予測結果から表 2.9 に示す場合分けに基づき, 目的地予測手法を変化させる. 以下, 表 2.9 の導出手順について詳細に説明する.

表 2.9: 提案する状況別予測手法

状況	利用頻度考慮	出発地別	Top4 予測で用いる手法	Top1 予測で用いる手法
i	上昇	上昇	出発地別予測手法	出発地別予測手法
ii	上昇	下降	移動環境考慮手法	利用頻度考慮手法
iii	下降	上昇	利用頻度考慮手法	出発地別予測手法
iv	下降	下降	利用頻度考慮手法	利用頻度考慮手法

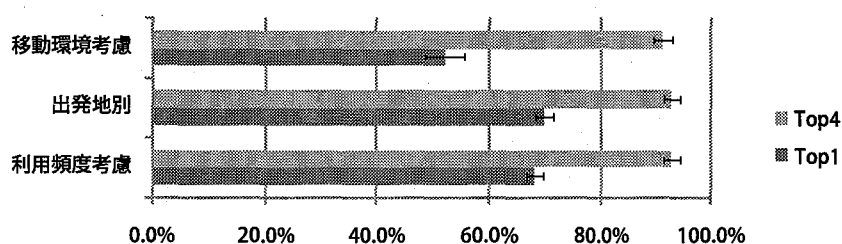


図 2.9: 状況 i において各手法を用いたときの総移動距離に対する正しい目的地が Top1, Top4 に入る距離の割合

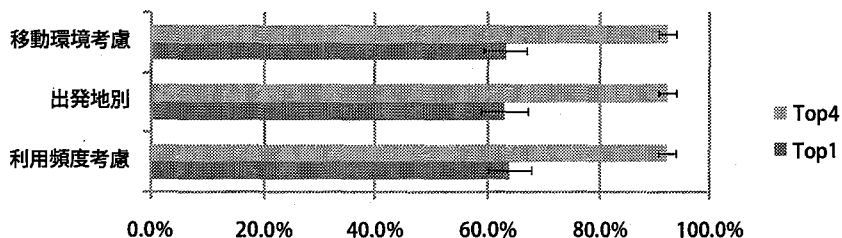


図 2.10: 状況 ii において各手法を用いたときの総移動距離に対する正しい目的地が Top1, Top4 に入る距離の割合

状況別予測手法の導出

被験者 1 の自動車走行履歴を用い、表 2.4 に示すそれぞれの状況に、利用頻度考慮手法、出発地別予測手法、移動環境考慮手法を適用し、もっとも予測結果のよい組合せを求める。

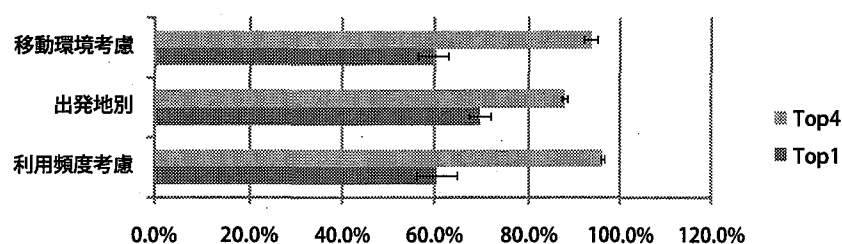


図 2.11: 状況 iii において各手法を用いたときの総移動距離に対する正しい目的地が Top1, Top4 に入る距離の割合

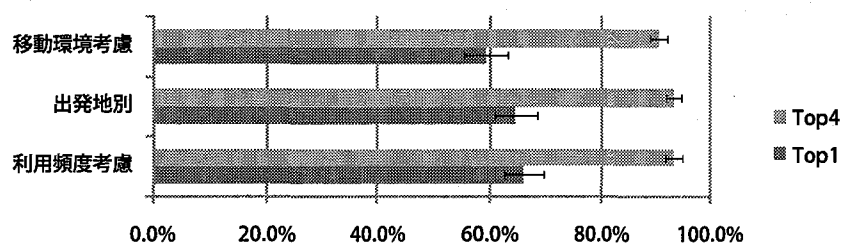


図 2.12: 状況 iv において各手法を用いたときの総移動距離に対する正しい目的地が Top1, Top4 に入る距離の割合

評価指標としては、総走行距離において正しい目的地が上位 1 位 (Top1) および上位 4 位 (Top4) に入る距離の割合を用いる。

結果を図 2.9 から図 2.12 に示す。図 2.9 は、状況 i において、総走行距離に対して正しい目的地が Top1 あるいは Top4 に含まれていた距離の割合を、各手法別に計測した結果を示している。同様に図 2.10, 図 2.11, 図 2.12 は、それぞれ状況 ii, iii, iv に関する結果である。結果から、状況 i, 状況 iv に対しては、移動環境考慮手法以外の手法が適しており、状況 ii には、どの手法も大差は見られなかった。状況 iii には、Top1 を予測する際には出発地別予測、Top4 には利用頻度考慮手法が適していることが分かった。また有意な差は確認できなかったが、状況 i には出発地別予測、状況 iv には利用頻度考慮手法が適しており、状況 ii で Top4 の予測には移動環境考慮手法、Top1 の予測には利用頻度考慮手法がよい結果であった。これらの結果から、表 2.9 に示す場合分けで、適応的に予測手法を変化させる。

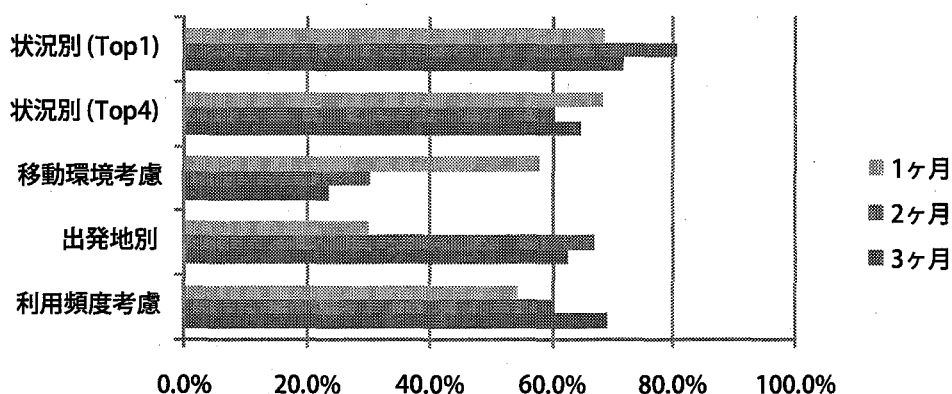


図 2.13: 総走行距離に対して正しい目的地が Top1 に入った割合

2.5 評価

提案手法を実装し、自動車における移動履歴、および徒歩と自転車における移動履歴の2種類の移動履歴に対して評価を行った。

2.5.1 自動車移動における評価

自動車の移動履歴における評価では、予備実験で用いた走行データのうち、状況別予測手法の導出に利用しなかった被験者2の走行データを用いた。学習量による効果を調べるため、4ヶ月の走行データのうち、学習と評価に用いたデータの割合を、1ヶ月と3ヶ月、2ヶ月と2ヶ月、3ヶ月と1ヶ月と変化させて評価を行った。なお、評価に用いたデータのうち、学習時に訪問していない目的地へ向かう走行は除外している。評価指標は、総走行距離に対して正しい目的地が予測の上位1位 (Top1)、および上位4位 (Top4) に入っていた距離の割合とした。

結果を図2.13、図2.14に示す。結果から、状況別手法はほとんどの学習量において、Top1における予測で約5%程度、Top4で約10%精度改善していることが分かる。一方、この手法では学習が進むにつれて、予測が正しい距離が短くなる傾向がある。これは、学習量が増えることで目的地候補数も増加したためであると考えられる。なお、1ヶ月の学習地点で目的地候補数は9か所、2ヶ月の地点で14か所、3ヶ月の地点で17か所であった。一方で、出発地別予測手法や利用頻度考慮手法は学習量が増加するにつれ、予測が正しい距離が長

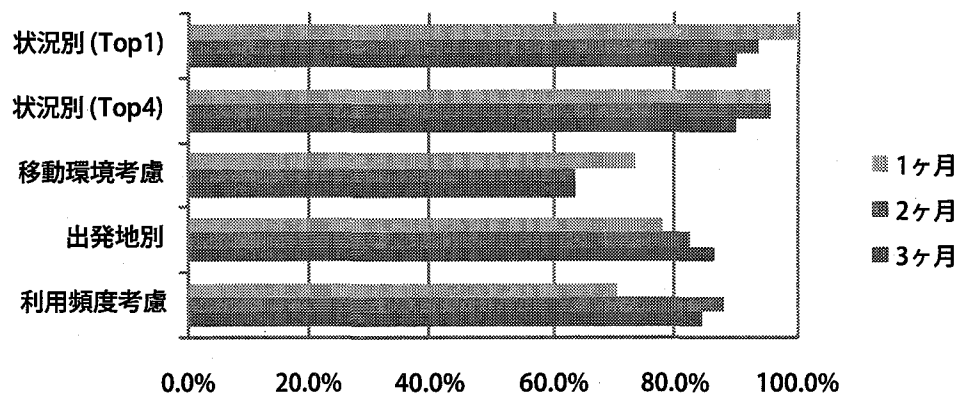


図 2.14: 総走行距離に対して正しい目的地が Top4 に入った割合

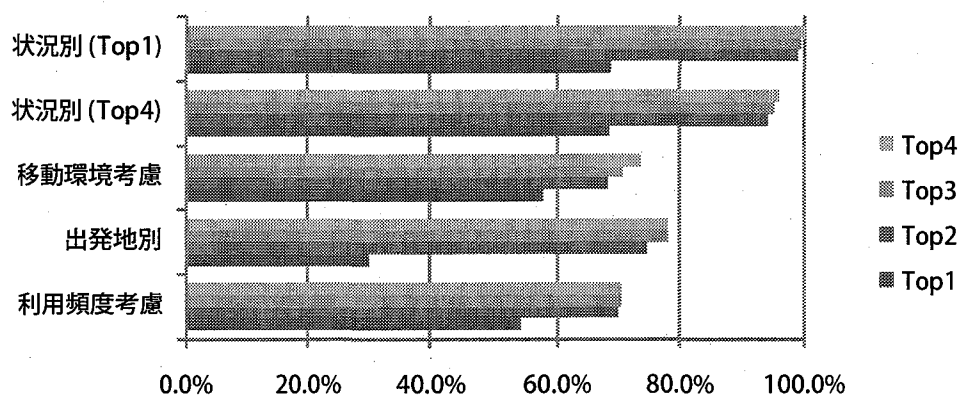


図 2.15: 総走行距離に対して正しい目的地が Top-k に入った割合 (1ヶ月学習)

くなることが分かる。これは、学習が進むにつれ、少しずつ予測が改善されているためだと考えられる。移動環境別予測は、ほとんどの場合で予測が行えておらず、より多くの走行データを集める必要があると考えられる。

また、Top-k 予測に関して k を 1~4 に、学習量を 1ヶ月~3ヶ月に変化させた際の結果を図 2.15~図 2.17 に示す。図から、どの学習量においても状況別予測手法を用いれば、走行経路の約 90% の距離において正しい目的地が Top2 以内に入ることが分かる。出発地別予測手法も Top2 付近で頭打ちしており、状況別予測手法より低い割合に留まっている。これ

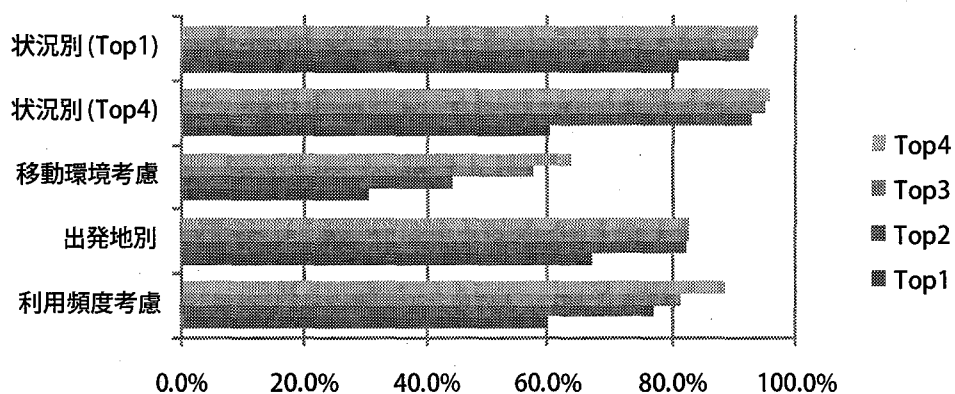


図 2.16: 総走行距離に対して正しい目的地が Top-k に入った割合 (2ヶ月学習)

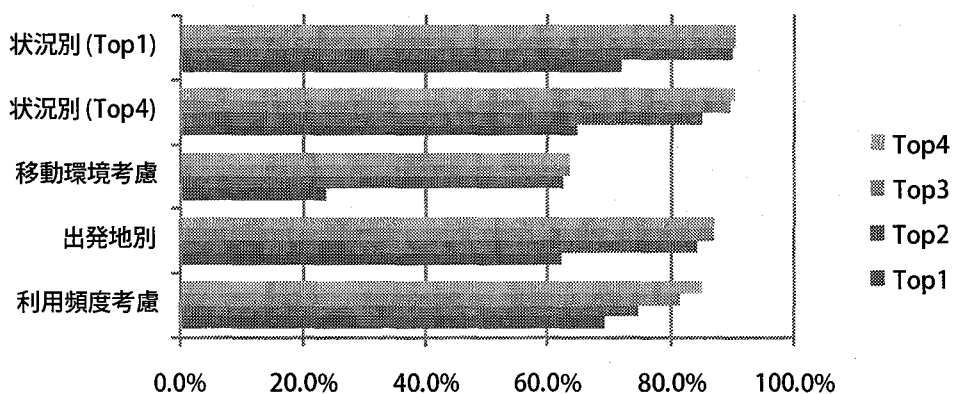


図 2.17: 総走行距離に対して正しい目的地が Top-k に入った割合 (3ヶ月学習)

は、ある目的地に向かう際、その出発地から出発してその目的地に行ったことがない場合に、全く予測できないことに起因していると考えられ、さらに状況を細分化し、適切に予測手法を切り替えることで正しい目的地を予測できる状況別予測手法が有効に機能する可能性があることが分かる。

表 2.10: 徒歩・自転車評価に用いた移動履歴

	外出先（学内）での移動	自宅周辺での移動
移動手段	徒歩	徒歩・自転車
移動回数	80 回	36 回
期間	3ヶ月	4ヶ月
目的地数	6ヵ所	8ヵ所
平均移動距離	150m	420m

2.5.2 徒歩と自転車移動における評価

次に、歩行と自転車の混在する移動履歴に対して提案手法が有効に機能するかを評価した。ただし歩行と自転車の移動履歴は、自動車の履歴とは異なり、自宅付近での移動や、電車・車で移動した外出先での移動など局所的な移動が多く、全ての履歴を混ぜて予測すると大幅に精度が低下すると考えられる。そこで本評価では、ある特定の外出先（学内）、および自宅近辺という単位で履歴を記録している想定のもと、実験を行った。被験者は1人で、移動履歴の詳細を表 2.10 に示す。なお、本実験では建物間の移動を想定しており、実験環境では移動は全て屋外であった。また、データ収集後に GPS の大きな誤差を手作業により修正したが、提案手法を利用する際には、既存のマップマッチング技術 [30] を用いることで、自動的に移動経路を道路に沿うように修正する必要がある。

初めに、学内の移動に関して評価を行った。評価項目は、これまでの実験と同様、全移動経路に対して正しい目的地を予測できている距離の割合である。被験者は自動車で通学しており、学内の移動は全て徒歩であった。評価では、移動データのうち初めの1ヶ月分を学習に用い残り2ヶ月の移動データで評価、初めの2ヶ月分を学習に用い1ヶ月の移動データで評価するという2通りで行った。結果を、図 2.18, 2.19 に示す。結果から、いずれの予測手法においても、高い割合で目的地が予測できており、これら全ての手法が徒歩の移動にも有効であることが分かる。また全ての手法が、1ヶ月の学習データを用いた場合より、2ヶ月の学習データを用いた方が、高い精度で予測できていることが分かる。この理由は徒歩での移動データは、経路が短いため経路が分割されにくく、予測が外れている場合のリスクが小さいためだと考えられる。なお実験では、利用頻度考慮手法は全出発地手法と全く同じ結果であったが、これは実験に用いた移動データに利用頻度の大きく異なる経路を

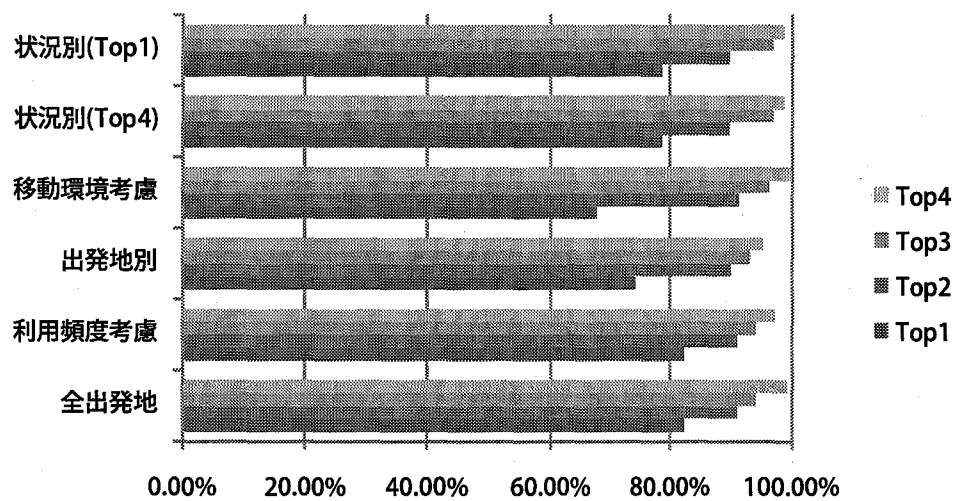


図 2.18: 総移動距離に対して正しい目的地が Top-k に入った割合 (1ヶ月学習・学内)

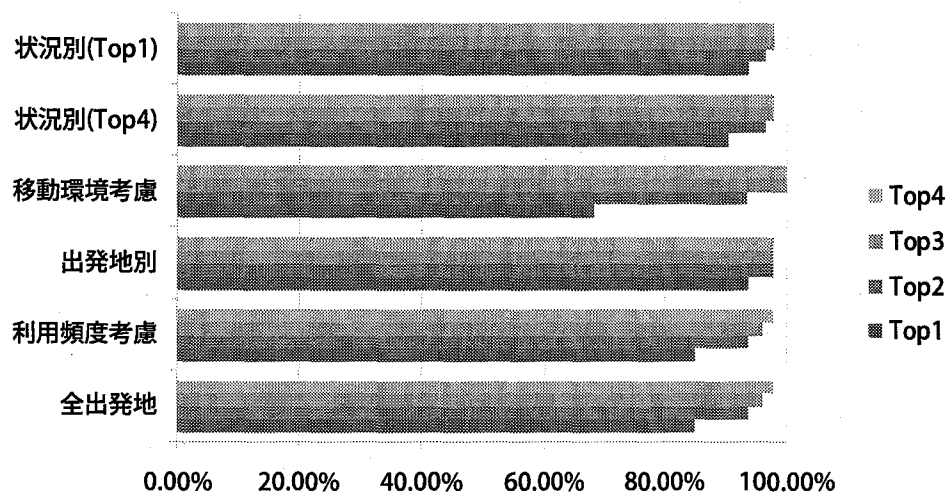


図 2.19: 総移動距離に対して正しい目的地が Top-k に入った割合 (2ヶ月学習・学内)

利用する機会がなかったためである。

次に、自宅周辺での移動に関して評価を行った。被験者は、大半の移動は自転車を用いており、学内での移動と比較すると比較的長い距離を移動している。評価では、移動データのうち初めの約2ヶ月分を学習に用い、残り2ヶ月分を評価に用いた。結果を、図 2.20 に

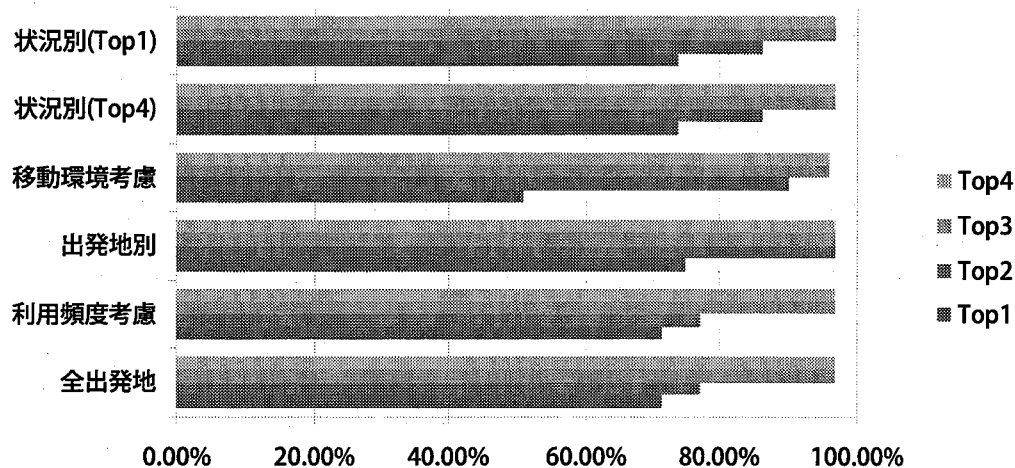


図 2.20: 総移動距離に対して正しい目的地が Top-k に入った割合 (自宅周辺)

示す。図から、学内での移動と同様、いずれの手法を用いた場合でも、特に Top3 以上の予測で高い割合で予測できており、徒歩と自転車の混ざった移動履歴でも目的地予測手法が有効であることが分かる。また、状況別予測手法が他の手法と比較して高い精度で目的地を予測できていることから、長い距離を移動し、経路が分割される方が状況別予測が有効に機能すると考えられる。なお、自宅周辺の移動においても学内での移動と同様、利用頻度考慮手法と全出発地手法の差は現れなかった。実験に用いた移動データには、公園などの広いエリアを自由に通過する経路はなく、道路の移動のみであったため、このような結果が得られたと考えられる。

2.6 考察

2.6.1 出発直後の予測

全出発地手法、利用頻度考慮手法、および出発地別予測手法のいずれの手法も、経路リンクを通過することで目的地予測を更新するため、出発直後は予測が外れることが多いと考えられる。逆に、移動環境を考慮した手法は、移動開始時の時間帯や荷物量など、移動において静的な要素を利用するため、出発直後でも予測できると考えられる。この予想を自動車を用いた移動履歴で検証した。

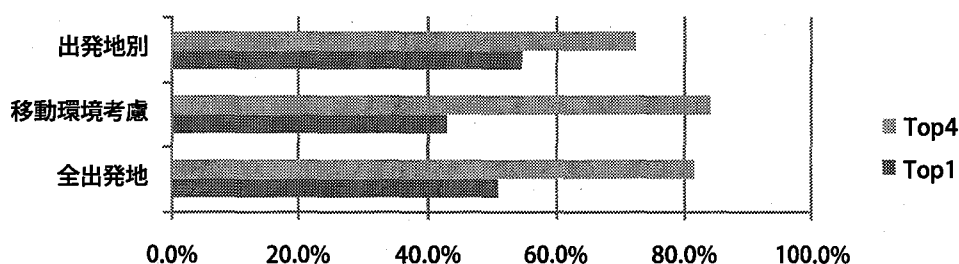


図 2.21: 出発直後に目的地が Top1, Top4 に入った割合

結果を図 2.21 に示す. 予想と異なり, 各手法間に大きな差はなく, Top1 においては出発直後でも出発地別手法がもっとも高い確率で予測できることが分かる. これは, 検証に用いたユーザ・学習量では, よく行く目的地が出発直後から上位に必ず予測され, 比較的出発地に依存した移動になっているためだと考えられる. 逆に移動環境を考慮した手法では, 普段と異なる環境が与えられた場合に現状のベイジアンネットワークでは予測できなかったことを示している. 学習が進み目的地候補地が増えた場合に改めて検証が必要であるが, 学習量の少ない初期利用段階では, 全出発地手法がもっとも有効に機能することが分かる.

2.6.2 学習量の与える影響

本研究で用いた実験データは約 4ヶ月でありそれほど長期間でない. その影響で, ベイジアンネットワークの学習が不足していたり, 出発地別予測手法において, ある出発地点から訪問したことのない目的地がいくつか評価時に含まれるなどの問題が発生した.

本研究での想定では, 移動手段ごとに目的地予測を行うため, 自動車で訪問したことのある目的地に電車で向かった際などに予測ができないといった問題や, 自動車の利用が非常に少ないユーザが自動車を利用した場合には, あまり学習が行えない状況で目的地を正確に予測する必要がある. さらに, 人の生活は変化するものであり, 1年も利用すれば目的地の傾向が変化することも考えられる. そのため, できるだけ少ない学習で目的地を予測できることが重要となる. 嗜好の類似する他人の移動履歴を学習に加えていくことや, 学習時にノイズとなりそうなデータを学習させないなどの工夫が必要となる.

2.6.3 出発地、目的地の記録

提案手法では移動の開始や到着の認識、および目的地名の入力が必要であるが、プロトタイプシステムでは手作業で到着や出発、目的地名を記録している。日常利用を考えた場合、出発、到着の自動認識や出発地や目的地を自動的に記録する仕組みが必要となる。移動開始は移動軌跡の変化から判断することで認識可能となると考えており、到着は移動手段を変更する、建物に入る、自動車であればエンジンを切るなどの環境変化から推測できると考えている。目的地の名称は、到着地位置の近くの建物など意味のある目的地名に変換する必要がある。

2.6.4 情報提示を含めた評価

本研究では、移動経路において可能な限り長い期間、正しい目的地を予測できることを目的とした手法を提案しているが、実際のサービスを考えた場合、移動のどの段階で情報を提示できればよいか、つまりいつ正しい目的地を予測できることが重要であるかを検討する必要がある。この課題に対しては、提示する情報の種類によって提示に適するタイミングが異なると考えており、一般的にいつ正しい目的地を予測できるとよいかを示すことは困難である。たとえば、目的地までの移動経路上の渋滞を回避するような情報を提示する場合には、渋滞を回避できる地点には目的地を予測できている必要があり、目的地の空き駐車場の情報は目的地到着直前に目的地を予測できていればよい。歩行の場合でも、店のタイムセールなどの情報は出発直後には知れる方がよい、駅の時刻表は到着直前でよいなど、情報によって異なると考えられる。そのため本研究では、まず常時正しい目的地予測が行えることを目的とした手法を提案している。

また提案手法は、移動経路や移動環境をもとに目的地を予測している。そのため、移動経路や移動環境に差のない目的地を区別して予測することは困難である。たとえば、商店街内の店を区別して予測することは、移動環境に差がない限り極めて困難である。現在は、これらの距離や意味の近い同類の目的地は一つの目的地として扱うことで精度が高くなっているが、より細かな単位での目的地設定を前提とした場合は、提示する情報の種類によって、目的地予測の粒度を変更可能にするなどの対策が必要となる。たとえば、渋滞状況などの情報提示には移動方向の予測で十分であり、家電製品の価格情報などは電気ショップに向かっていることを予測できれば十分である。

2.7 むすび

本章では、移動中のユーザを対象とした情報選択のための目的地予測手法を提案した。評価から、自動車の移動において、提案した手法を単体で用いるより、状況によって適切な手法を選択的に利用することで、ユーザの向かっている目的地を上位に予測できることが明らかとなった。また徒歩と自転車移動においても、自動車の移動と同様に目的地を上位に予測できる。提案手法を用いることで、目的地予測の上位4位までの情報をユーザに提示した場合、移動経路の9割以上の期間、上位1位の情報を提示する場合には約7割の期間、ユーザの向かう目的地の情報を提示できる。

今後の課題としては、学習量と予測手法の関係を明らかにし、予測手法に応用することが考えられる。また、長期の利用を考えた場合、ユーザの生活の変化から、目的地候補が変化することも考えられるため、目的地候補の削除やしばらく訪問を行っていない目的地に対して負の学習を行うような手法も必要である。さらに、目的地に関連する情報の提示の有効性の検証や実機を用いた評価を行う必要がある。

第3章

光学式シースルー型HMDのための情報配置手法

3.1 まえがき

本論文では、第1章で述べた図1.2に示すような2つのフェーズで処理を行い情報を提示することを想定している。情報選択フェーズにおいて第2章で述べたような方式を用い、ユーザにとって必要な情報を選択した後、情報提示フェーズではユーザに確実に伝わるように情報を提示する必要がある。本章では、情報提示フェーズにおいて、ウェアラブルコンピューティング環境でもっとも多用されている情報提示デバイスであるヘッドマウントディスプレイ (HMD: Head Mounted Display) を対象として、ユーザが情報を容易に認知できる情報提示手法を実現する。提案手法は、アプリケーションとHMDの中間で動作するミドルウェアで、アプリケーションが何か情報をユーザに伝えたい場合に、情報表示要求を受け取り、ユーザが情報を認知しやすいように表示する。

本章で用いるHMDは3.2.2節で詳しく説明するが、共通した特徴としては眼鏡型のディスプレイであり、装着したユーザの目の前に映像が投影されることがあげられる。HMDを用いるとユーザはハンズフリーで情報を参照でき、一般の携帯端末利用時のように情報を見るために手を動かす必要がない。このように、HMDは作業をしているユーザが常に情報を確認でき、作業を妨げずに情報を参照できるため、ウェアラブルコンピューティング環境における情報提示デバイスとして多く利用されている [1, 3, 34, 75]。中でもシースルー型HMDは、HMDを装着することで隠れる現実空間を透過して見ることができ、ユーザの

視界を確保した上で情報を表示できる。日常生活においてユーザが必要とする情報を必要とする時に現実世界に重ね合わせて表示できれば、より生活に密着した情報配信サービスが可能となる。例えば、ユーザがバスに乗りたいと思った時に最寄りのバス停までの案内を表示したり、バス停に近づくと自動的にそのバス停の時刻表を表示するといったアプリケーションが実現できる。

しかし、シースルー型 HMD を利用して日常生活を送る場合、HMD の背景となる部分の状態によって表示情報が読み取りにくくなるという問題が頻繁に発生する。例えば図 3.1 に示すように、表示したい情報が背景の色や明暗が激しく変化するような部分に表示されている場合、表示されるものが読み取りにくい。そこで本研究では、HMD の背景によって情報が読み取りにくい問題を解決するために、背景の状態を考慮した情報の表示方法を提案する。また、単純に情報の読み取りやすさを考慮して表示する位置を決めた場合、複数の提示情報を同時に表示する際にその意味的な関係が乱れるという問題や、ある情報は画面の上部に表示させたいといったアプリケーション制作者の意図を反映できない。したがって、表示する情報の配置位置を決定する際には、表示する情報に関する制約条件を考慮して配置を行う。

本研究では、表示される文字や画像などの情報がユーザにとって読み取りやすく、かつ不自然でない位置に配置するための手法の実現を目的とする。まず、HMD の背景部分となる実世界の画像を取得していくつかの領域に分割し、領域ごとに情報の表示にどの程度適しているかを背景の画像から求め、次に表示する情報の制約条件を考慮して最適な位置に配置する。

以降では、HMD に表示する文字や画像などの情報の 1 つ 1 つをオブジェクトと呼ぶ。オブジェクトの例を図 3.2 に示す。

以下、3.2 節で想定環境について詳しく説明し、3.3 節で HMD の背景の読み取りやすさを考慮したオブジェクト配置手法を説明する。3.4 節で、読み取りやすさを算出する式のパラメータの決定方法について述べる。さらに、3.5 節で実装について述べ、3.6 節で評価実験について説明する。3.7 節で考察を行い、最後に 3.8 節でまとめと今後の課題を述べる。

3.2 想定環境

本節では、提案手法において想定環境するウェアラブルコンピューティング環境および HMD について詳しく述べる。

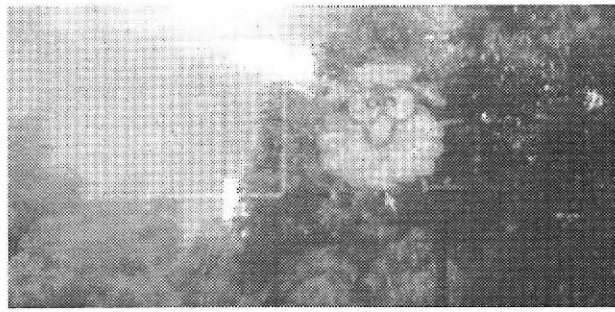


図 3.1: 光学式シースルー型 HMD に表示された情報が読み取りにくい例



図 3.2: オブジェクトの例

3.2.1 ウェアラブルコンピューティング環境

ウェアラブルコンピューティングシステムでは、一般的にユーザの行動を妨げることなく情報を提示する必要があるため、HMD 上に情報を表示する、音声で情報を読み上げる [36,45],あるいはバイブレータを利用して触覚で情報を伝える [76] という方法が一般に用いられている。音声やバイブレータを用いてユーザに情報を提供することも有効であるが、一度に提供できる情報量には限りがあったり、視覚でしか伝えられない画像やアニメーションのような情報も数多く存在する。HMD は、飛行機の整備工場などで図面やディスプレイを設置できないような狭い場所での情報閲覧、棚卸作業などで手にディスプレイを持ちながらの作業が困難な場所での情報閲覧に実運用されるなど、ウェアラブルコンピューティング環境の情報提示デバイスとして特に注目を集めている。さらに、HMD を用いることでユー

ずはいつでも提示された情報を閲覧できることから、他の視覚提示デバイスでは困難であるユーザの受動的な情報取得が可能となり、ユーザの受動的な情報取得が多用されるウェアラブルコンピューティング環境では特に有効である。したがって、本研究では、ユーザは HMD を用いた視覚情報提示によって情報を入手していることを想定する。またウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザは作業中および移動中でも情報を得たりコンピュータを操作することが想定されるため、ユーザの視界を確保した上で情報を表示できる HMD を想定する。

3.2.2 視界を遮らない HMD

本研究では、ウェアラブルコンピューティング環境を想定するため、ユーザの視界を大きく遮らない HMD を用いる。視界を遮らない HMD には、次の4種類がある。

- 光学式シースルー型 HMD

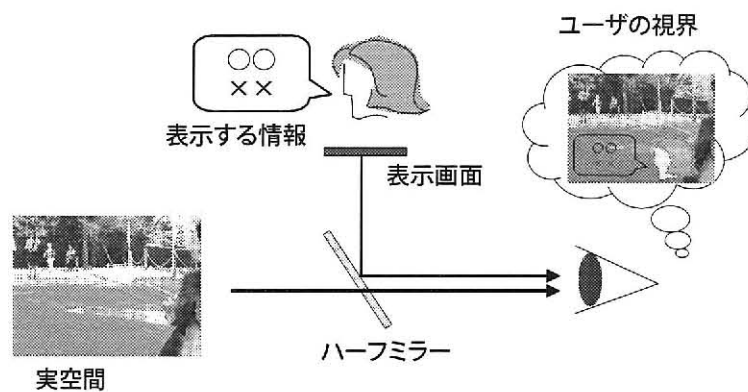
光学式シースルー型 HMD は、コンピュータから提示された情報をハーフミラーなどを用いて反射させ、透過してくる現実空間に重ねて表示できる HMD である。光学式シースルーの模式図を図 3.3 (a) に示す。ユーザは現実空間をコンピュータを通さずに見るため、電源の有無に関わらず視界を視認でき、安全性が高い。ハーフミラーを用いることから、表示する文字や画像が透過するため、背景によっては表示情報が見えにくくなる場合がある。

- ビデオ式シースルー型 HMD

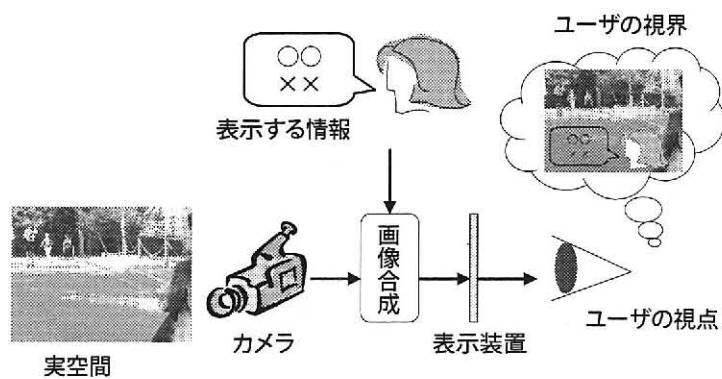
ビデオ式シースルーは、カメラによって撮影された現実空間の映像とコンピュータから提示された情報を合成して背景の透けないスクリーンに表示する HMD である。ビデオ式シースルーの模式図を図 3.3 (b) に示す。提示する情報はカメラ画像に合成して表示するため、背景を加工したり、背景の影響を完全に遮断することが可能である。電源が切れたり、制御する計算機の故障で視界が失われる欠点がある。

- 網膜投影型 HMD

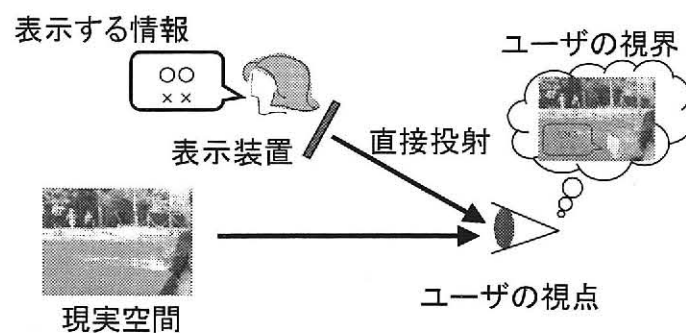
網膜投影型 HMD は、情報を表示するスクリーンを備えず、直接網膜に映像を結像させる HMD である。網膜投影式 HMD の模式図を図 3.3 (c) に示す。直接、目に結像す



(a) 光学式シースルー型 HMD の仕組み



(b) ビデオ式シースルー型 HMD の仕組み



(c) 網膜投影型 HMD の仕組み

図 3.3: HMD の仕組み

るため利用者の視力によらず鮮明な映像を投影できるが、眼球運動の影響で像を結像させることが困難である。

- 小型の非透過型 HMD

小型の非透過型 HMD もウェアラブルコンピューティング環境で用いられることがある。ただし、小型であるため表示領域が極端に狭い問題や、視界の一部がディスプレイ領域となり視界を遮ってしまうため、広い視界を必要とする移動しながらの作業などには向かない。

これらの HMD のうち、ウェアラブルコンピューティングにおいてビデオ式シースルー型 HMD は、視界が失われる可能性があるという問題があるため、現在日常的に用いられることを想定したシステムにはほとんど使用されていない。

以降で、現在発売、研究されているウェアラブルコンピューティング向け HMD を列挙する。

なお、ここで挙げる HMD はすべて単眼のものである。その理由は、単眼の HMD は立体視はできないが軽量で、ウェアラブルコンピューティングに適しているためである。

主な光学式シースルー型 HMD

主な光学式シースルー HMD の仕様を表 3.1 に示す。

島津製作所 “DataGlass2/A” 島津製作所によって販売されていた光学式シースルー型の HMD である (図 3.4 (a))。この HMD はウェアラブルコンピューティング環境で使用する目的で設計されており、大画面、高解像度で多くの情報が一度に表示できる。

島津製作所 “DataGlass3/A” 島津製作所によって販売されている光学式シースルー型 HMD である (図 3.4 (b))。DataGlass2/A の後継機に当たる。基本仕様は同じであるが、ヘルメットへの装着が可能となったり、ヘッドバンドで頭部に密着できるため、作業時でも安定して映像を閲覧できるようになっている。

Lumus Vison “PD-18” 単眼の光学式シースルー型 HMD である (図 3.4 (c))。LOE (Light-guide Optical Element) と呼ばれる独自の技術を用いてレンズ内を反射させて映像を目の前まで伝える。表示部が薄く、装着時の見た目の違和感が小さい。

表 3.1: 市販されている光学式シースルー型 HMD の仕様

項目	DataGlass2/A	DataGlass3/A	PD-18
表示部重さ	80(g)	80(g)	70(g)
大きさ (mm)	50 × 80 × 40	62 × 88 × 46	10 × 10 × 2.3
画角 (対角)	約 24°	約 24°	32°
解像度	800 × 600	800 × 600	800 × 600
シースルー	15%	3%	70%

コニカミノルタ “ホログラフィックシースルーブラウザ” ホログラムを利用した単眼の光学式シースルー型 HMD である。ホログラムを使っているため、表示部が 3.5mm と非常に薄く、外見的に装着時の違和感がほとんどない。現在はまだ研究段階である。

主な網膜投影型 HMD

Microvison “NOMAD” 網膜投影型 HMD であり、赤い光を網膜に照射して画像をユーザに提示する。大きな画面で解像度も高くははっきりと見えるが、表示できる色は赤一色のみである。

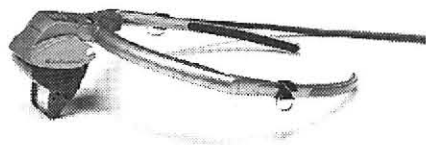
ブラザー工業 “RID” ブラザー工業によって開発されている網膜投影型の HMD である (図 3.4 (d))。目に入れた光を高速に動かすことによる残像効果を利用して、カラーの映像投影を可能にしている。現在、商品化はされていない。

主な非透過型 HMD

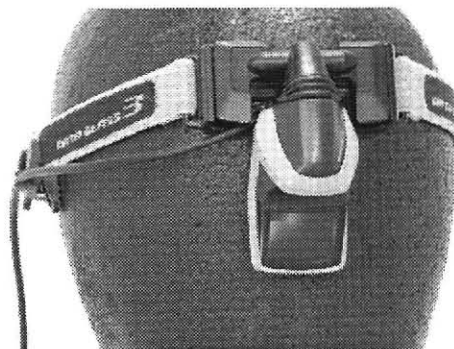
主な小型の非透過型 HMD の仕様を表 3.2 に示す。

MycroOptical “SV-6” 図 3.4 右上に示す眼鏡に取り付けるタイプの非透過型 HMD である。この HMD はシースルーではないが表示部が小型であるため、視界を確保できる。

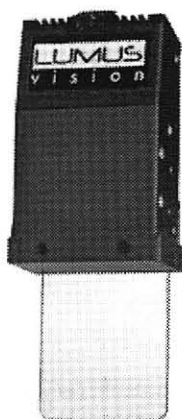
スカラ株式会社 “Tele-glass T3-F” スカラ株式会社によって販売されている非透過型 HMD である (図 3.4 (e))。スクリーン部分が目の前にせり出すギミックを備えており、不必要な時に収納できるという特徴がある。



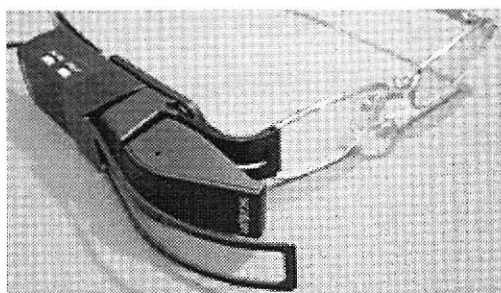
(a) 島津製作所 DataGlass2/A



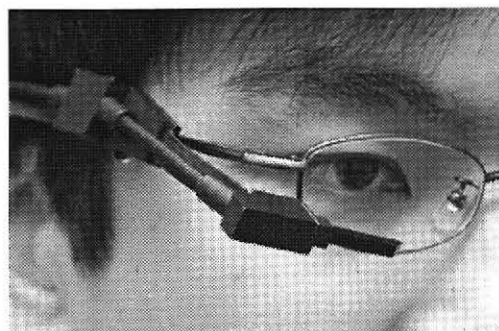
(b) 島津製作所 DataGlass3/A

(c) Lumus Vision
PD-18

(d) ブラザー工業 RID



(e) スカラ株式会社 Tele-glass T3-F



(f) オリンパス モバイル Eye-Trek

図 3.4: 主な単眼 HMD

eyetop “eyetop centra” 非透過型の HMD で、他の単眼 HMD と同様に、画像を表示する部分は小型であり、視界が確保できる。

表 3.2: 市販されている非透過型 HMD の仕様

項目	SV-6	Tele-glass T3-F	eyetop
表示部重さ	35(g)	35(g)	60(g)
大きさ (mm)	不明	不明	不明
画角 (対角)	約 20°	約 20°	約 16°
解像度	640 × 480	960 × 240	320 × 240

オリンパス “モバイル Eye-Trek” わずか 3.2mm 幅の小型光学バー上にある画面に情報が表示される (図 3.4 (f)). バーは非常に小型であり, 視界に入っているにもかかわらず装着者に気にならない幅に調整してある. 提示できる解像度が低く, 提示可能な情報量には課題が残る.

このように, 現在様々な種類の HMD が開発され, 実用化されつつある.

なお本研究では, これらの HMD のうち, 大画面, 高解像度で多くの情報が一度に表示でき, ウェアラブルコンピューティング環境で既に実用されているという実績から, 島津製作所の DataGlass2/A を用いて実装・評価を行った.

3.2.3 想定サービス

本研究では, 図 3.5 に示すようにユーザは視界取得カメラ付きの光学式シースルー型 HMD を身に付けており, スケジューラや地域の情報配信サービス, ニュース速報など, 現在の携帯電話の情報推薦サービスと同様, 表示すべき情報がユーザの視界と必ずしも関連のある必要のないサービスを利用しているものとする. ウェアラブルコンピューティング環境では, 必ずしも現実空間のものに関連付ける必要がない, ユーザが瞬時に情報を読み取れることが重要となるサービスが数多く考えられるためである. この想定は, 数多く行われている現実空間に様々な電子的な情報を付与することにより現実空間を豊かにする拡張現実感 (AR:Augmented Realty) の研究とは, HMD 上の情報の表示位置に対する制約において大きな違いがある. AR では, 現実空間と情報を正確に重ね合わせる必要があるため, 情報の表示位置を自由に変更できないが, 本研究の想定するサービスでは, 表示位置に厳しい制約がなく自由な配置が行える.

視界取得カメラ付きの光学式シースルー型 HMD は, 現在はまだ一般に普及していない

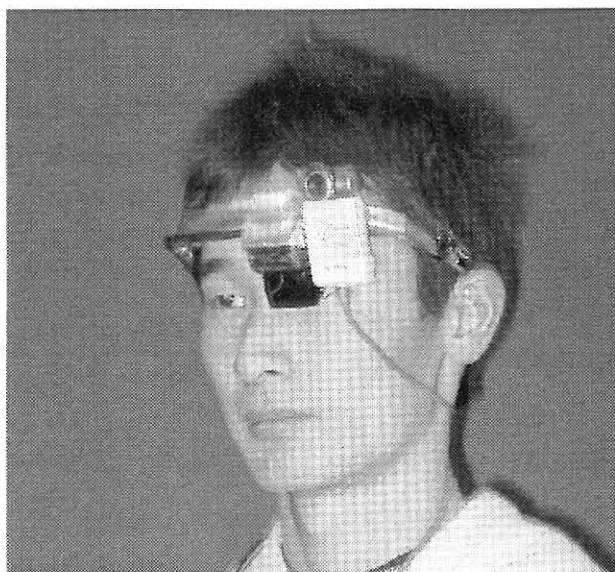


図 3.5: 視界取得カメラ付き HMD

が，ウェアラブルコンピューティング環境ではユーザの視界や関連する情報を記録し続けるシステム [16] や実空間に配置されたマーカから情報を取得するためにカメラを使用する [19] といった視界取得を前提としたアプリケーションが数多く研究されるなど，視界取得に対する期待が高いため，将来的には視界取得カメラ付き光学式シースルー型 HMD が広く普及すると考えられる．

3.3 オブジェクト配置手法

本節では，光学式シースルー型 HMD 上に情報を配置する際に背景を考慮して配置を決定するための手法について述べる．提案手法は，アプリケーションと HMD の間で動作するミドルウェアであり，アプリケーションからの情報表示要求を受けた際に，HMD のどの位置にその情報を表示するかを決定する手法である．

提案手法では，カメラを用いてユーザの視界を画像データとして取得し，HMD の背景となる領域の画像から表示に適した領域を求め，次にオブジェクトのもつ固有の制約を考慮した上で配置を行う．HMD の背景とは，図 3.6 に示すように，ユーザが HMD の透過領域を通して見る，視界の部分領域である．以下，提案手法について詳細に述べる．

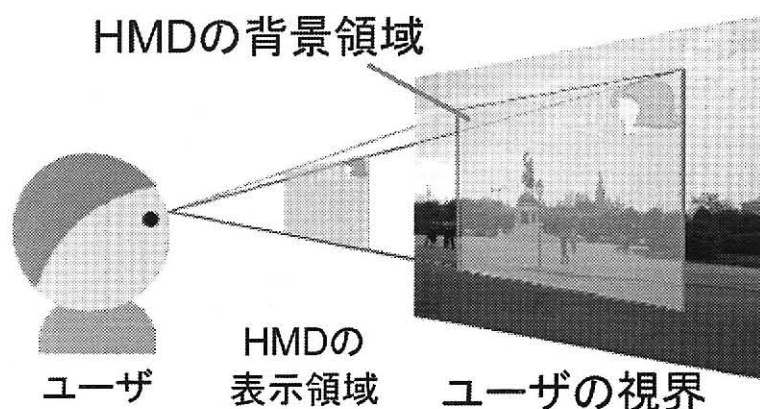


図 3.6: 光学式シースルー型 HMD の背景

3.3.1 オブジェクト表示に適した領域の決定

提案手法では以下の流れでオブジェクトの視認性に及ぼす影響度を算出する。

1. 背景画像の取得：カメラから背景画像を取得し複数のスロットに分割
2. 画像特性の計算：背景画像の階調値の平均，分散から画像特性を算出
3. 影響度の計算：オブジェクトの視認性への影響度を画像特性から算出

本研究では，光学式シースルー型 HMD に対して実験を行い，背景がオブジェクトの視認性に与える影響度を求める式を決定した．以下，それぞれのステップについて詳細に述べる．

背景画像の取得

アプリケーションから情報表示要求を受けた際に，HMD に付属したカメラから背景画像を取得する．ウェアラブルコンピューティング環境でユーザの装着しているカメラを HMD にしっかりと固定した上で，カメラの取得画像と HMD の背景部分が一致するようにアフィン変換を行う．アフィン変換とは，図形を変形する変換方法の 1 つで，回転，平行移動および縦横の倍率の違う伸縮を行う変換である．取得した画像は，縦横 4 分割の計 16 個のスロットに分割し，以下に示す方法でそれぞれのスロットの画像特性を求める．縦横 4 分割

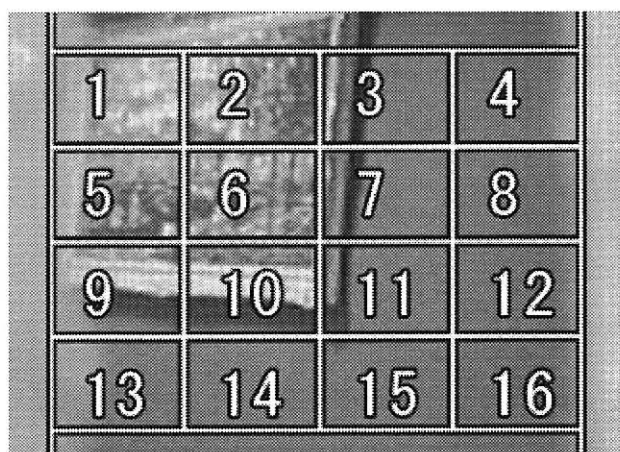


図 3.7: スロット分割の例

したのは、実験で用いた HMD（解像度 SVGA）に表示して十分に読みとれる文字の大きさ約 20pt で、ニュース速報などのトピック、全角で約 20 文字程度を表示する際に必要な領域を計算した結果からであり、提案手法はスロット数によらずに適用可能である。スロットの分割の様子を図 3.7 に示す。

画像特性の計算

HMD をよく利用しているユーザ 3 名から、HMD に視認性に関するヒアリングを行ったところ、光が強くまぶしいところや、背景が複雑になっている位置が視認性が低いという意見が得られた。そこで、RGB, YCbCr, HSV の 3 つの色空間の階調値の平均と分散を画像特性とし、視認性の低さを画像特性の階調値の組合せで表現することにした。なお用いた階調値の計算は、全て 0~1 に正規化した後、平均と分散を求めた。ただし、YCbCr は RGB と線形な関係であるため、分散値のみを利用する。ここで使用する 3 つの色空間について説明する。

- RGB

赤 (Red), 緑 (Green), 青 (Blue) の光の 3 原色ですべての色を表現するという色空間である。コンピュータのディスプレイは RGB を用いて表示しているため、コンピュータでもっともよく利用される色空間である。

- YCbCr

輝度 (Y) と色差 (Cb,Cr) で, TV 放送や JPEG 画像などで用いられている色空間である. この色空間は人間の眼の特性をよく真似ており, 輝度 (Y) は人の目が一番明るさを感じる緑を主分とする. 色差 (Cb,Cr) はそれぞれ, 青の輝度との差, 赤の輝度との差から求まる値である. また輝度 (Y) は, グレースケールの変換にも使用される.

- HSV

色相 (Hue), 彩度 (Saturation), 明度 (Value) の3つの変数で表現する色空間である. 色相 (H) は赤, 黄, 緑, 青, 紫などの色合いをリング状で表現したもので, 赤を基準に 0~360 度で表現する. 彩度 (S) は鮮やかさを示し, 明度 (V) は色の明るさを示す.

視認性に及ぼす影響度の計算

前節で挙げた画像特性について, 視認性に影響を及ぼす比率は異なると仮定し, 次のような式で視認性に及ぼす影響度を求める. 平均が小さい程, 光が弱く, 分散が小さい程, 背景が複雑でなく視認性が高いことから, この影響度が小さいもの程, オブジェクトの表示に適しているスロットとなる.

$$E_i = \sum_{\text{画像特性 } X} a^X A_i^X + \sum_{\text{画像特性 } Y} v^Y V_i^Y \quad (i = 1, 2 \dots 16) \quad (3.1)$$

$$(X = R, G, \dots)$$

$$(Y = R, G, \dots)$$

E_i はスロット i において背景が視認性に与える影響度であり, a^X および v^Y は各画像特性における重み付けの係数である. A^X は X の画像特性の平均, V^Y は Y の画像特性の分散である.

式 (3.1) で用いる係数を第 3.4 節で述べるユーザによる評価実験によって求めた. まず, ユーザによるオブジェクトの視認性の評価実験を行い, その結果を元に式で使用する項を考え, 最後に係数を決定して下記の評価式が得られた.

$$E_i = 0.6A_i^R + 0.9A_i^G + 4A_i^B + 40V_i^Y + 200V_i^S \quad (i = 1, 2 \dots 16) \quad (3.2)$$

3.3.2 制約条件を考慮した表示位置の決定手法

前節までの手法で各スロットの視認性に及ぼす影響度が算出できる。この値をもとに表示位置を決定すると、オブジェクト間の関係やコンテンツ作成者の意図が反映できないため、これらを考慮した配置を行う。ここで考える制約条件は、コンテンツ作成者が記述するものとし、制約条件のないオブジェクトに関しては背景のみを考慮して配置する位置を決定する。

適切な表示に必要な制約条件

オブジェクトを表示する際には、コンテンツ作成者の意図やオブジェクト同士の関連性などを考慮して配置を決める必要がある。オブジェクトを表示する際に考慮すべき制約としては以下のものが考えられる。

- オブジェクト間の関係

複数のオブジェクトを表示する際には、意味的にどのような関係にあるのかを考慮して位置を決める必要がある。

- 表示位置

位置に意味のあるオブジェクトは特定の位置に表示する必要がある。これによりコンテンツ制作者が描くデザインに沿った表示が可能となる。

- 重要度

複数のオブジェクトを同時に表示する際に、どのオブジェクトを優先して配置を行うかを決める必要がある。

- 表示した後のオブジェクトの移動

オブジェクトを表示した後にどれだけ動かしても良いかや、どれだけの時間同じ位置に表示するかを決める必要がある。例えば、テキストデータなどは大きく移動すると読み取りにくくなるので、表示した後、数秒間は位置を変えない、隣のスロットにしか移動しないなどの制約が必要となる。

- オブジェクトの色や形状

オブジェクトの色や形状を考えて、適切な表示する位置や形を選択する必要がある。

- オブジェクトの色や形状の変化の自由度

オブジェクトの色や形状を変更して表示する場合に、その変更をどの程度まで許すかを決める必要がある。

- オブジェクトの種類

表示するオブジェクトの種類を考えて、適切な位置に表示することを考える。例えば、文字などは優先して視認性の高いスロットに配置することが考えられる。

- ユーザの状態

ユーザの状態を考えて配置を行う必要がある。例えば、歩いているユーザには、画面の端のオブジェクトは認識されにくいため中央に表示したり、作業中のユーザには作業の妨げにならないよう、同時に表示するオブジェクトの数を制限する。

このように様々な制約条件が考えられる。本研究では、この中でもオブジェクト間の関係、表示位置および重要度が特に重要となる制約条件であると考え、これらの制約条件についてのみ実装を行った。

制約条件の記述

前節であげた制約条件を図 3.8 にまとめる。制約条件は図 3.8 に示すように管理されるものとする。各オブジェクトは一意の ID をもち、制約条件には URL などのデータの位置を示す記述や、テキストデータも記述する。

なお、制約条件の記述には XML(Extensible Markup Language) を用いる。XML を用いることでコンテンツ作成者が容易に制約条件を記述できるようになる。1 つのオブジェクトに対して 1 つの制約条件を記述した XML ファイルを用意する。定義した XML スキーマの一部 (object 要素の定義部分) を図 3.9 に示す。XML ファイルには 1 つの object 要素があり、その子要素に 1 つのオブジェクトの内容を示す content 要素、他のオブジェクトとの関係を記述する 0 個以上の relation 要素、表示位置の制約を記述する 0 個以上の location 要素の 3 種類の要素をもつ。

以下、各要素について主要な定義を説明する。

<object>タグ テキストや画像といった 1 つのオブジェクトを表す。このタグで囲まれた範囲を 1 つのオブジェクトとする。

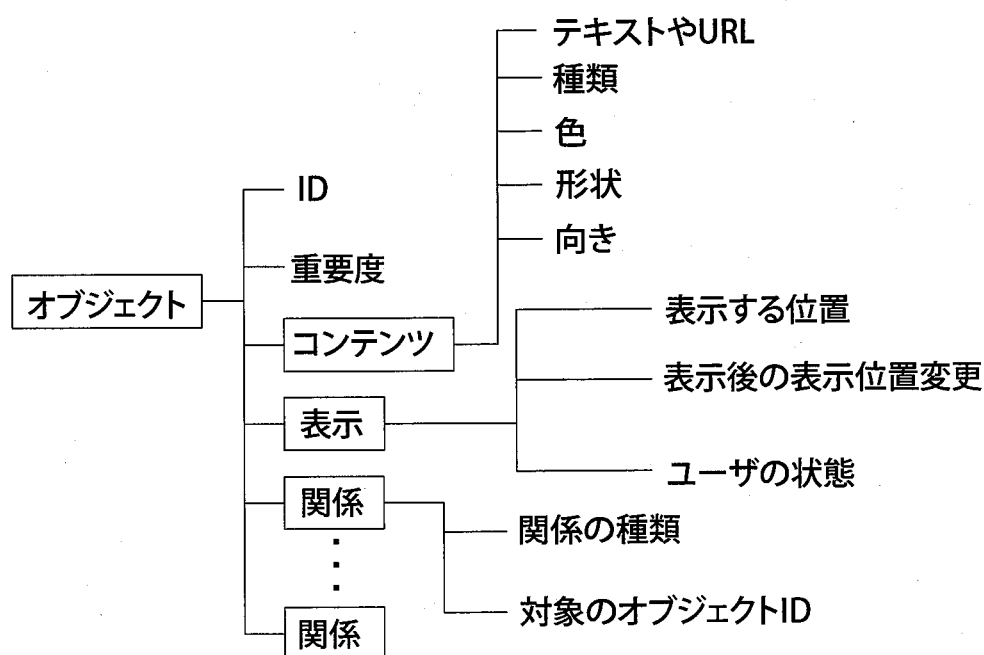


図 3.8: 制約条件の定義

● 形式

$$\langle \text{object} \rangle \sim \langle / \text{object} \rangle$$

● 属性

ID= id : オブジェクトを一意に識別するための識別子. 半角アルファベットおよび数字で記述する.

importance=*importance* : 重要度を記述する．重要度は，1～5 の数字を用いて 5 段階で記述する．数字が大きくなるほど重要となる．

- 包含できる要素

<content>, <layout>, <relation>

<content>タグ オブジェクトのコンテンツに関する記述を行う。

- 形式

<content>*Text*</content>: テキストを含むコンテンツの場合 *Text* にテキストを記述

```
<xsd:element name="object">
  <xsd:complexType>
    <xsd:sequence>
      <xsd:element ref="content" />
      <xsd:element ref="relation" maxOccurs="unbounded" />
      <xsd:element ref="layout" maxOccurs="unbounded" />
    </xsd:sequence>
    <xsd:attribute name="ID" type="xsd:string" use="required" />
    <xsd:attribute name="importance" use="option" default="3" />
    <xsd:simpleType>
      <xsd:restriction base="xsd:positiveInteger">
        <xsd:minInclusive value="1" />
        <xsd:maxInclusive value="5" />
      </xsd:restriction>
    </xsd:simpleType>
  </xsd:complexType>
</xsd:element>
```

図 3.9: 定義した XML スキーマの一部

- 属性

`src=src` : コンテンツのソース. データの URL を示す.

- 包含できる要素

`` または *Text* を包含できる.

<relation>タグ オブジェクト間の関係を記述するための要素. 1 つの `<object>` タグ内に複数個入れることができる.

- 形式

`<relation type="..." />`

- 属性

`type=type` : オブジェクト間の関係の種類. 表 3.3 に使用できる値を示す.

`objID=objID` : 対象とするオブジェクトの ID を記述する.

表 3.3: relation の type の値

値	説明
follow	対象オブジェクトの下か右に配置
equivalent	対象オブジェクトと同じ高さに配置
next	対象オブジェクトに隣接する位置に配置
left	対象オブジェクトより左に配置
right	対象オブジェクトより右に配置
higher	対象オブジェクトより上に配置
lower	対象オブジェクトより下に配置

<layout>タグ 配置に関する制約条件を記述する要素.

- 形式

<layout>～</layout>

- 属性

type=type : オブジェクトを表示する位置. 表 3.4 に使用できる値を示す.

実際に制約条件を記述した例を図 3.10 に示す. 図に示す制約条件は, ID が objectB, 重要度が 3 である吹き出しのオブジェクトは右端のいずれかのスロットに表示され, さらに ID が objectA というオブジェクトに追従するという制約条件である.

制約条件から位置を求める手法

次に制約条件を考慮した位置の決定方法を述べる. この決定方法により, 制約条件を満たすもっとも適切な配置を算出できる. 本手法は簡単のため, 定義された制約条件を満たす配置を求めるもっとも単純な方法を用いており, 計算コストは考慮していない. 計算コストに関しては, 最適化アルゴリズムなどを用いることで低減できるが, 局所解に陥る可能性もあり, トレードオフの関係である.

新しいオブジェクトの表示要求を受けると, そのオブジェクトに対する制約条件を記述した XML ファイルを読み込む. 次に表示要求のあるオブジェクトの数を数え, 許可され

表 3.4: location の type の値

値	説明
free	自由に配置
top	上端のスロットのいずれかに配置
bottom	下端のスロットのいずれかに配置
left	左端のスロットのいずれかに配置
right	右端のスロットのいずれかに配置
center	中央付近のスロットのいずれかに配置
corner	四隅のスロットのいずれかに配置
side	左右両端のスロットのいずれかに配置
edge	上下左右の端のスロットのいずれかに配置

```

<?xml version="1.0"?>
<object ID="B" importance="3">
  <content type="balloon">
    メールを受信しました.
  </content>
  <relation type="follow" objID="A" />
  <location type="right" />
</object>

```

図 3.10: XML の記述例

ているオブジェクトの同時表示可能個数以上であれば、重要度の高いオブジェクトのみを選択する。許可されているオブジェクトの同時表示可能個数以下であれば、すべてのオブジェクトを選択する。

次に 3.3.1 節で提案した手法で求めた視認性に与える影響度から配置全体の視認性に与える影響度 A を式 (3.3) を用いて、制約条件に応じたすべての配置の組合せについて計算する。

$$A = \sum_{id} I_{id} \times E_i \times P \quad (3.3)$$

視認性への影響度

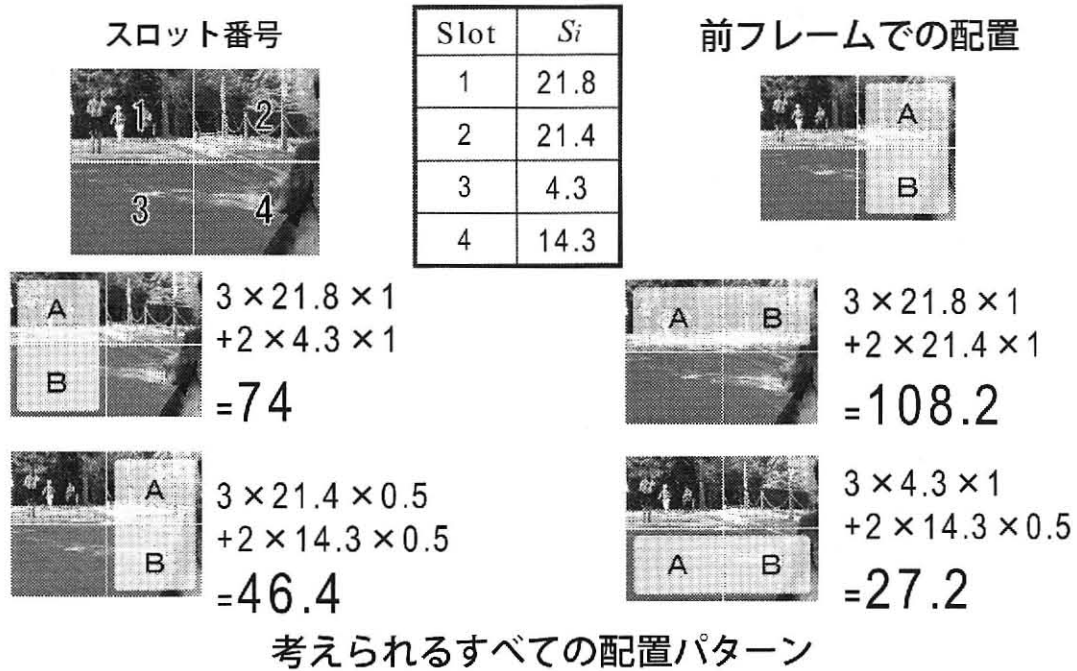


図 3.11: 考えられるすべての配置パターン

I は表示するオブジェクトの重要度を示し、値が大きいほど視認性の高いスロットに配置される。 E_i は 3.4 節で求めた式から算出されるスロット i における視認性への影響度である。さらに表示位置の変更が頻繁に起こるとオブジェクトが読み取りにくくなるため、移動コスト P をかける。この移動コスト P は、前に表示されている位置と同じ位置に配置するときに小さくする。この式から計算される配置全体の視認性への影響度が最も小さくなる配置パターンに決定し、パターンに従ってオブジェクトを表示する。

本手法を用いて配置を行う例を図 3.11 に示す。ここでは、オブジェクト A は重要度が 3、オブジェクト B は重要度 2、B は A に追従するという制約条件があるとする。また、前のフレームでは図中に示すように配置されているものとし、各スロットの視認性への影響度はすでに求めているものとする。制約条件から、考えられるすべての配置パターンについて全体の視認性に与える影響度 E を算出し、値の最も小さくなる右下の配置に決定する。

表 3.5: PCGA-VC2 の仕様

項目	仕様
CCD	1/6 型 35 万画素プログレッシブスキャン CCD
最低被写体照度	20 ルクス
ホワイトバランス	オート
シャッタースピード	オート
焦点距離	f=2.8mm
F ナンバー	F2.8
画像サイズ	320 × 240

3.4 パラメータの決定

本節では、3.3.1 節で述べた式 (3.2) の決定、およびオブジェクトが読み取れなくなる影響度の閾値 T_d の導出について述べる。実験に用いたカメラの仕様を表 3.5 に示す。

視認性に及ぼす影響度のパラメータの算出

HMD の背景となる画像のどの画像特性がオブジェクトの視認性に影響を及ぼすかを調べるため、以下の手順で実験を行った。

1. ユーザによるオブジェクトの視認性の評価 シースルー型 HMD を装着したユーザによる予備実験を行い、シースルー型 HMD 上にオブジェクトを表示するときに、どのような背景のときに表示する文字や画像などのオブジェクトが読み取りやすいかを調べた。

シースルー型 HMD 上の分割された 16 個のスロットそれぞれに実際に時間的に色が変わるサンプルのオブジェクトを表示し、各スロットのオブジェクトを「読み取りやすい」「読み取りにくい」「どちらでもない」の 3 種類に分類し、その結果を記録した。実験の様子を図 3.12、ユーザの視界の例を図 3.13 に示す。記録をつけている間は視界がずれないようにし、記録をつけ終わったところで背景画像をユーザの分類結果と共に保存した。作業は研究内容をよく理解し HMD の装着に慣れている研究チームのメンバー 3 人で行い、屋内、屋外、昼、夜など様々な環境で計 47 シーンについて実験を行い、計 47 枚の背景画像および

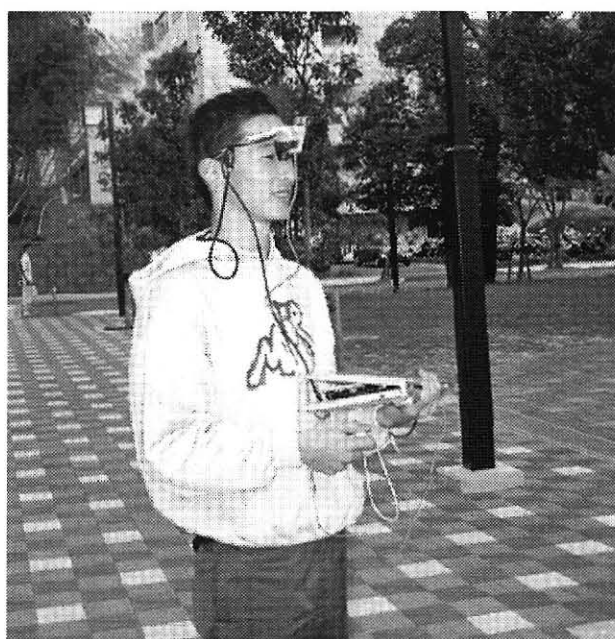


図 3.12: 予備実験の様子

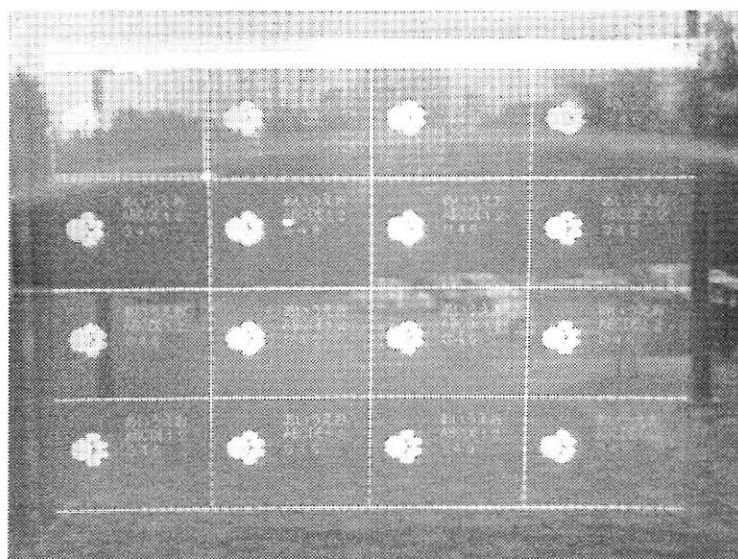


図 3.13: HMD を通して見たユーザの視界

評価データを得た。

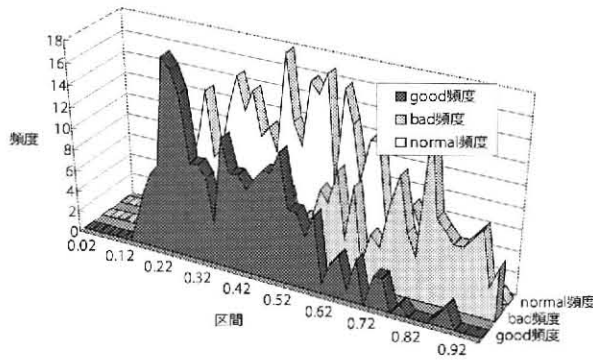
表 3.6: 平均の Kruskal-Wallis 検定

要素	p 値	○ vs △	○ vs ×	△ vs ×
赤 (R)	$p < 0.0001$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$
緑 (G)	$p < 0.0001$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$
青 (B)	$p < 0.0001$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$
色相 (H)	$p < 0.0001$	$p < 0.01$	なし	なし
彩度 (S)	$p < 0.0001$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$
明度 (V)	$p < 0.0001$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$

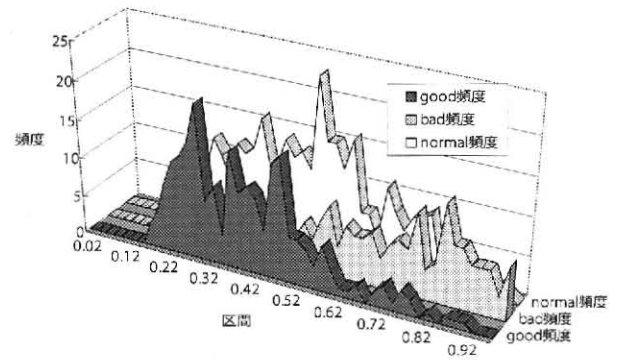
2. 各画像特性が視認性に与える影響の詳細 3.3.1 節で挙げた 3 つの色空間の階調値の平均と分散について、ユーザによるオブジェクトの視認性の評価の結果ごとに分類し、ヒストグラムで表した。中でも顕著に違いが見られるものを図 3.14 に、逆にあまり差が見られないものを図 3.15 に示す。この結果から、光学式シースルーを用いた場合、R, G, B の平均, HSV の S, V の平均には「読み取りやすい」位置と「読み取りにくい」位置の分布に差があると考えられる。

また、各群の中央値に有意な差があるかどうかを Kruskal-Wallis 検定を用いて検定した。この検定法は母集団の分布に依存しないノンパラメトリックな検定方法である。さらに 3 群間で有意差の認められたものはシェッフェの方法を用いてすべての 2 群間での有意差を求める多重検定を行った。検定の結果を表 3.6 および表 3.7 に示す。ここで検定の有意水準 α を 1% とし、ユーザによるオブジェクトの視認性の評価結果の違いに有意差があるかどうかの検定を行った。その結果から有意差が認められた要素をオブジェクトの視認性に影響を及ぼす画像特性であるとした。その結果、R, G, B の平均, HSV の S, V の平均および R, G, B の分散, Y, Cb, Cr の分散, S, V の分散に有意差が認められた。

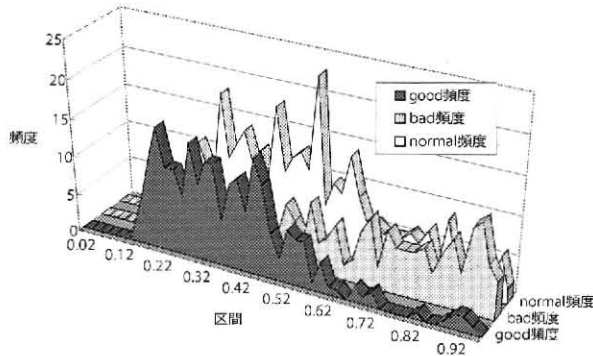
3. 画像特性の比率となる係数の決定 次に各スロットのオブジェクトの視認性に及ぼす影響度を求める式を決定する。視認性への影響度とは、背景の画像特性がオブジェクトの視認性にどの程度の影響を及ぼすかを数値化した値である。前節の結果から影響があると予想される画像特性を、式 (3.1) で考えた式に当てはめ、式の重みづけ係数 a^X, v^Y を決定する。



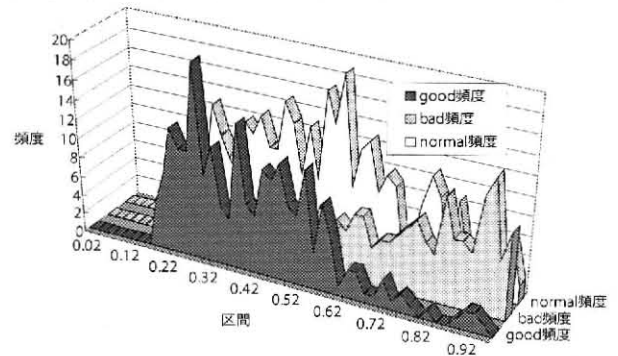
R (赤) の平均のヒストグラム



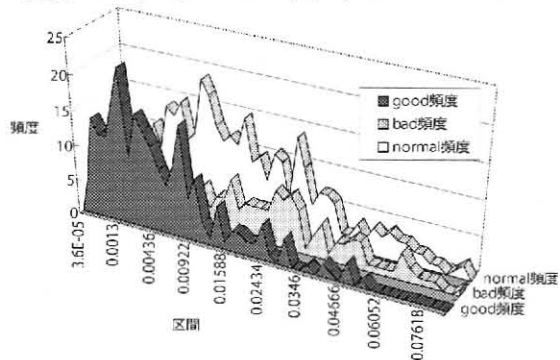
G (緑) の平均のヒストグラム



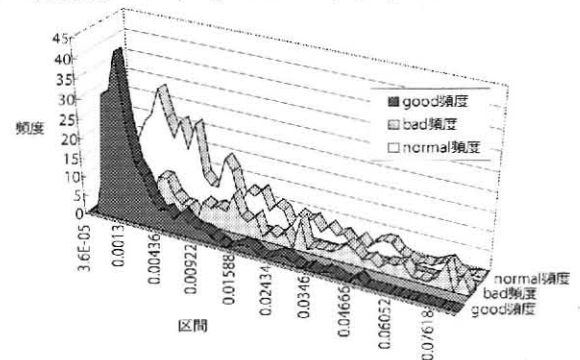
B (青) の平均のヒストグラム



V (明度) の平均のヒストグラム



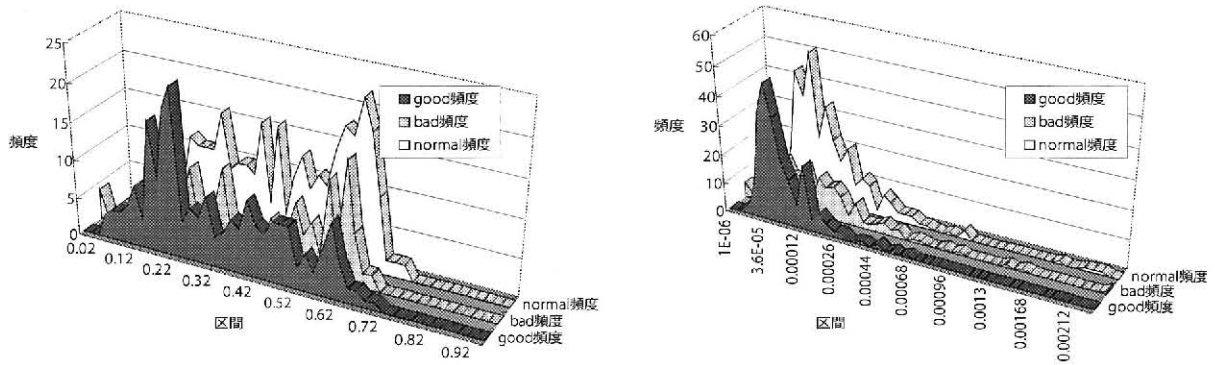
Y (輝度) の分散のヒストグラム



S (彩度) の分散のヒストグラム

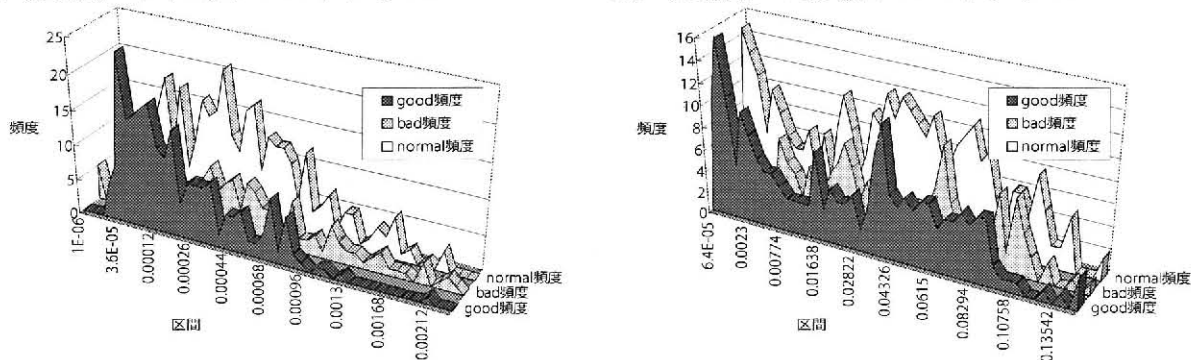
図 3.14: 差が顕著に見られるヒストグラム

まず、前節のヒストグラムからいずれの画像特性も値が小さいほどオブジェクトの視認性が高いと考えられる。そこで、視認性に及ぼす影響度を求める式の各画像特性 X の平均の係数 a^X を 0 および 2^j ($j = 1, 2, \dots, 4$) に、分散の係数 v^X を 0 および $2^j \times 10$ ($j = 1, 2, \dots, 4$) に変化させ係数のすべての組合せについて総当りで影響度を算出した。その結果よりユーザによるオブジェクトの視認性の評価の実験結果に最も適合する係数の組合せを求めた。さ



H (色相) の平均のヒストグラム

Cb (色差) の分散のヒストグラム



Cr (色差) の分散のヒストグラム

H (色相) の分散のヒストグラム

図 3.15: 差が見られないヒストグラム

らに、使用した係数は離散値であるため、求まった係数付近で細かな変化をさせ、最適な係数の組合せを選択した。

また、ユーザによるオブジェクトの視認性評価の結果とコンピュータの出力する視認性に及ぼす影響度の適合度は次のように求めた。ユーザによるオブジェクトの視認性の評価実験では、視認性を3段階に分類している。一方、視認性に及ぼす影響を求める式は連続の値が出力する。そこで、ユーザの評価実験で「読み取りやすい」と判断されたスロットの視認性への影響度の平均と「読み取りにくい」と判断されたスロットの視認性への影響度の平均の差を評価点とし、ユーザの評価実験で得られたすべての画像について計算した。例えば、1枚の画像に図 3.16 のような評価がつけられている場合、計算式は以下の式のようになる。

$$D = \frac{E_3 + E_4 + E_7 + E_8}{4} - \frac{E_9 + E_{12} + E_{13}}{3}$$

表 3.7: 分散の Kruskal-Wallis 検定

要素	p 値	○ vs △	○ vs ×	△ vs ×
赤 (R)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし
緑 (G)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし
青 (B)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし
輝度 (Y)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし
色差 (Cb)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし
色差 (Cr)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし
色相 (H)	$p = 0.0376$	なし	なし	なし
彩度 (S)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$
明度 (V)	$p < 0.01$	$p < 0.01$	$p < 0.01$	なし

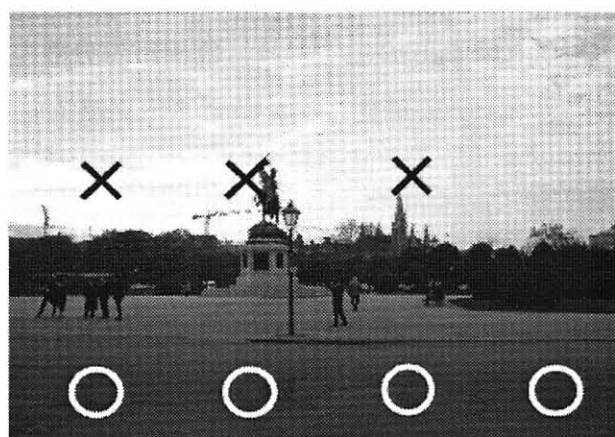


図 3.16: ユーザ評価の例

D は評価点を示し、式の分母は前の項から順に、視認性が悪いと判断されたスロットの数、良いと判断されたスロットの数である。 E_i はスロット i における視認性への影響度である。評価点が高い程、読み取りやすいものとそうでないものが良く分離していると考え、適合度が高いとした。

再現率 決定した係数の組合せの有効性を検証するため、再現率を求めた。再現率は、得られた視認性への影響度の値を大津の閾値判別法 [39] を用いて「読み取りやすい」「読み取りにくい」の2つに分類し、ユーザによる評価実験で分類された「読み取りやすい」スロット「読み取りにくい」スロットがどれだけの割合で正確に分類されているかで求めた。結果は85.68%であった。

視認性が悪くなる閾値 T_d の算出

ユーザによる評価実験で得た画像データの各スロットに対して、視認性への影響度を式(3.2)を用いて算出した。閾値 T_d をユーザが読みとりにくいと評価したスロットとそうでないスロットを分類できるような値に設定すれば、閾値 T_d を用いて HMD 上に表示したオブジェクトが読みとりにくいかを判断できる。そこで、読みとりにくいと分類されるスロットの95%が、閾値 T_d より大きな影響度をもつように T_d を設定する。

ユーザによる評価の結果より、 $T_d = 4.09$ が求まった。

3.5 実装

光学式シースルー型 HMD のための背景を考慮したオブジェクト配置手法のプロトタイプを実装した。実装は、Panasonic Let's Note CF-T1, モバイル Pentium III 866MHz, メモリ 504MB で上で行い、Microsoft Visual Studio .NET Visual C#.NET を用いてプログラミングを行った。プロトタイプを用いた結果、オブジェクトが読み取りやすい位置に配置されていることを確認した。

3.5.1 オブジェクトの視認性の良い位置の算出法の実装

まず、3.3.1 節で示した背景を考慮したスロット毎のオブジェクトの視認性への影響度を求める手法を実装した。実装で用いた色空間の変換式、平均・分散を求める式を次に示す。なお、以降では RGB 色空間の Red の階調値を R , Green の階調値を G , Blue の階調値を B として表す。

色空間の変換式

- RGB

実装に用いたカメラからの取得画像が 24 ビットカラーであり,

$$0 \leq R \leq 255, 0 \leq G \leq 255, 0 \leq B \leq 255$$

となるため,

$$R' = \frac{R}{256}, G' = \frac{G}{256}, B' = \frac{B}{256}$$

で正規化する.

- YCbCr

$$Y = 0.2989 \times R + 0.5866 \times G + 0.1145 \times B \quad (3.4)$$

$$Cb = -0.1687 \times R - 0.3312 \times G + 0.5000 \times B \quad (3.5)$$

$$Cr = 0.5000 \times R - 0.4183 \times G - 0.0816 \times B \quad (3.6)$$

但し,

$$0 \leq Y \leq 255, -128 \leq Cb \leq 127, -128 \leq Cr \leq 127$$

となるため,

$$Y' = \frac{Y}{256}, Cb' = \frac{Cb + 128}{256}, Cr' = \frac{Cr + 128}{256}$$

で正規化する.

- HSV

$$V = \max(R, G, B) \quad (3.7)$$

$$d = V - \min(R, G, B)$$

$$S = \frac{d \times 255}{V} \quad (3.8)$$

彩度 S が 0 なら

$$H = 0 \quad (3.9)$$

V と R が等しい場合,

$$H = \frac{G \times 60}{d} - \frac{B \times 60}{d} \quad (3.10)$$

V と G が等しい場合,

$$H = 120 + \frac{B \times 60}{d} - \frac{R \times 60}{d} \quad (3.11)$$

V と B が等しい場合,

$$H = 240 + \frac{R \times 60}{d} - \frac{G \times 60}{d} \quad (3.12)$$

但し,

$$0 \leq H \leq 360, 0 \leq S \leq 255, 0 \leq V \leq 255$$

となるため,

$$H' = \frac{H}{360}, S' = \frac{S}{256}, V' = \frac{V}{256}$$

で正規化する.

色相 H の平均・分散の求め方

- 平均色相は角度で表記されるため、359度の次は0度となり、一般の平均の式を用いることはできないため、ベクトル空間で平均を求めなければならない。そこで平均を求める際に使用した式を示す。ここで H_k は、 k 番目のサンプルの色相 H の正規化する前の0から360の値であり、 N はサンプル数である。

$$A_H = \tan^{-1} \frac{\sum_{k=0}^N \cos H}{\sum_{k=0}^N \sin H} \quad (3.13)$$

この後正規化を行う。

- 分散分散は定義式から $\frac{(\text{サンプル}-\text{平均})^2}{N}$ であるため、 $H_k - A_H$ が0から180になるように変換した上で,

$$V_H = \frac{1}{N} (H_k - A_H)^2 \quad (3.14)$$

を行い分散を求める。



図 3.17: 背景のみ考慮して配置した例

3.5.2 制約条件を考慮した表示位置の決定手法の実装

本プロトタイプシステムでは、オブジェクト間の関係、表示する位置、コンテンツの種類の3つの制約条件を実装した。オブジェクトの同時表示可能個数は視界を確保するため全スロットの1/4である4個とした。また、オブジェクトの移動コスト P は、オブジェクトが移動しないときに1/2とした。

実際にプロトタイプシステムを用いて配置を行った例を示す。表示するオブジェクトは、メール着信時のメールアイコンとその内容の要約の2つのオブジェクトである。HMDの背景のみを考慮して配置を行った場合、図3.17に示す配置となり、メールの内容の要約はメールアイコンに追従するという制約を加えて配置を行うと、図3.18に示す配置となる。

3.5.3 計算コスト

本手法を用いたときにどれだけのフレームレートで背景データを取得できるのかを測定した。実験には、3.5節で実装した計算機を用いた。プロトタイプを用いた結果、オブジェクトが読み取りやすい位置に配置されていることを確認した。結果を表3.8に示す。オブジェクトの移動が頻繁に起こると、ユーザはオブジェクトを見失う可能性があるため、実用時には、4fps以下で動かすことを考える。そのため、オブジェクトの数が4つ以下であ



図 3.18: 背景と制約条件を考慮して配置した例

表 3.8: オブジェクトの数によるフレームレート

オブジェクトの数	0	1	2	3	4	5
配置パターンの数	-	${}_{16}P_1$	${}_{16}P_2$	${}_{16}P_3$	${}_{16}P_4$	${}_{16}P_5$
フレームレート (fps)	18.823	18.534	17.943	14.64	5.345	0.664

れば十分な速度で稼動することがわかった。なお、多くのオブジェクトを扱えるようにするには、良いと考えられる配置パターンのみ計算するような配置手法を考える必要がある。

3.6 評価実験

システムの有用性を示すための評価実験を行った。実験に用いたアプリケーションは、数分に1回ニュース速報を表示するというもので、被験者が表示された情報を読み終えると腰に装着したボタンをクリックすることで、情報の提示から被験者が情報を読み終えるまでの反応時間を測定した。

実験はHMDを初めて装着する被験者9人で行い、一人当たり平均1時間半の実験を行っ

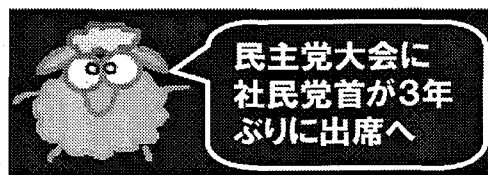


図 3.19: 表示メッセージの例

た。ニュースは実験前にアサヒコムの RSS ニュースのヘッドラインからテキストを 23pt の HGP 創英角ゴシック UB フォントで表示する吹出し付きのオブジェクトを作成し、キャラクターと一緒に提示した。表示したニュースの一例を図 3.19 に示す。

被験者には通常通り生活するように指示し、アプリケーションに意識が集中しないように十分長い間隔（平均 10 分に 1 回のポアソン分布）をあけてニュースを提示した。提示の際には提案手法およびランダムで位置を決定し表示後位置が移動しない比較手法をランダムで決定し、1 分間表示した。この比較により、HMD のどの位置に表示されるか被験者は分からないという条件のもとで、表示されたオブジェクトに気付くかどうかを評価できるため、視認性に及ぼす影響度の算出式の有効性を検証できる。

また被験者には、実験方法に関する説明をただけで、提案手法と比較手法に関する説明は行わなかった。

3.6.1 実験結果

上記で述べたとおり、実験は日常生活で行うため十分なオブジェクト表示間隔をとる必要があり、結果として得られたデータは 1 人あたり数個と十分な信頼性をもつだけのデータを得ることはできていない。詳細な実験および状況に応じた提案手法の有効性の変化についてはあらゆる状況変化を考慮する必要があるため今後の課題とするが、表 3.9 および表 3.10 に示す被験者の反応速度をもとに提案手法の有効性について考察する。反応速度は、ニュースが表示されている 1 分間に被験者の入力があったものに対して計算した。

表 3.9 に示す反応速度は被験者によってばらつきがあるものの、提案手法が平均 9 秒、比較手法が平均 11 秒であり、提案手法の方が平均反応時間が短い結果となった。実験結果にばらつきが大きいのは、試行回数がそれほど多くなく、ニュースが表示された状況がその時々によって大きく異なるためであるといえる。たとえば、被験者 A に提示された 2 回は

表 3.9: 反応速度

被験者	提案手法 (秒)	ランダム位置 (秒)
A	46.767	23.364
B	16.192	24.151
C	11.735	12.641
D	6.567	5.574
E	2.610	31.390
F	11.371	28.954
G	5.023	4.728
H	11.708	12.092
I	5.326	4.051

表 3.10: 提示回数と反応回数

被験者	提案手法 (反応回数/提示回数)	ランダム位置 (反応回数/提示回数)
A	1 / 2	1 / 3
B	3 / 3	3 / 4
C	4 / 8	2 / 9
D	3 / 4	4 / 4
E	3 / 3	1 / 4
F	6 / 7	2 / 4
G	8 / 8	5 / 6
H	7 / 8	8 / 8
I	7 / 7	8 / 8

ともに屋外の明るい場所で HMD のどこに表示しても読み取れない状況であった。さらに被験者 G, H, I は、被験者は実験中、屋外へ出ずずっと室内で実験を行っていた。提案手法と比較手法で大きな差が見られないのは、特に光学式シースルー型 HMD の視認性が悪

くなったタイミングがなく、常に読み取りやすい環境であったためだと考えられる。

表 3.10 は、ニュースの表示されている 1 分間に被験者の入力があった回数を示す。全体的に大きな差はないが、被験者 C, E は、提案手法の方が高い確率で反応できており、提案手法が有効に機能していると考えられる。

評価実験では、視認性に及ぼす影響度 E が、HMD の領域全体が見えにくいと判断される閾値 T_d を超えた場合にも提示を行っていたが、その場合のユーザの反応回数は、提案手法で 5/10 回、比較手法で 3/10 回とどちらの提示方法でも非常に少ない。このような状況では光学式シースルー型 HMD に情報を提示するべきではなく、音声や振動などのアクチュエータを用いて情報の存在をユーザに知らせることが有効であると考えられる。数行のテキストのような短い情報であれば、音声でそのまま提示することも可能であり、視覚的に伝えるべき情報に関しては情報の着信を視覚以外の提示手法で通知することで情報の存在をユーザに伝えられるようになると考えられる。この問題に対しては、4 章で詳細に説明する。

3.7 考察

3.7.1 他のシースルー型 HMD への対応

本研究で用いた光学式シースルー型 HMD と現実空間を撮影するカメラは 1 種類のみを使用した。他の種類の光学式シースルー型 HMD やカメラを利用した場合に提案手法が有効であるかは確認が必要であるが、光学式シースルー型 HMD では背景が明るかったり明るさが大きく変化する部分でオブジェクトが読み取りにくくなるというシースルー型 HMD の特性は他の HMD を用いた場合でも同様であると考えられる。視認性への影響度を求める計算式の値の厳密性を求めるならば、HMD やカメラの色に対する特性の違いに応じて、パラメータの係数を調節する必要があると考えられる。このような場合には、ユーザが表示に対してシステムに容易にフィードバックを入力できるインタフェースを構築することで修正は可能であると考えられる。

3.7.2 制約条件の種類

本研究において、制約条件の定義はすべてを網羅しているとは言い切れず、列挙した制約条件の記述でコンテンツ作成者の意図が十分に表現できるかの評価を行う必要がある。しかし提案手法では、光学式シースルー型 HMD 上にオブジェクトを表示する上で、視認性の悪い位置にオブジェクトを表示するとユーザは表示されていることにすら気付けないという問題から、現在は、表示するオブジェクトをユーザの視認性を考慮して表示することに主眼を置いて手法を提案しており、制約条件に対してはオブジェクト間の関係や表示位置などの一部の制約条件のみ実装している。ユーザに情報を認知させることを重視したコンテンツに対しては、ユーザがオブジェクトを視認できる領域に対して制約条件を考慮する必要があるという流れは不変のものだと考えられるため、コンテンツ作成者の意図を今後拡張した場合には制約条件を満たすすべての配置パターンを導出する方法を修正するだけで拡張可能であると考えている。

本研究では、制約条件記述の初めのステップとして、コンテンツ作成者がコンテンツをデザインする上で重視すると考えたオブジェクト間の関係や表示位置について実装を行った。他にも 3.3.2 節で述べた、制約条件などが考えられる。各制約条件の記述を実装するために考慮する必要のある点について以下で考察する。

表示するオブジェクトの色の影響

提案手法では、表示するオブジェクトの色は考慮していない。これは光学式シースルー型 HMD では、非透過の HMD と異なり、表示しているオブジェクトが背景を完全に遮蔽できず、表示しているオブジェクトとその周囲の背景の色関係より、表示するオブジェクトに重なる背景の影響、特に光の強さによるものが大きく、オブジェクトの色自体は視認性にほとんど影響しないと考えたためである。

そこで、この考えを実証するために、以下のような実験を行った。非透過ディスプレイの分野で文字の視認性は、文字の背景色と文字の色との明度差が大きいほど良いことから [46]、明度の等しい 7 色の文字と単色のアイコンを用いて読み取りやすさを評価した。実験では、光学式シースルー型 HMD 上の 16 分割したスロットそれぞれに文字とアイコンによるオブジェクトを表示し、文字とアイコンの色を評価毎に HSV 色空間で V（明度）の等しい 7 色を切り替えた。ユーザは各スロットに表示された文字とアイコンの読みとりやすさを 3 段階で評価し、評価結果と評価時のユーザの視界を記録した。各色によって背景の条件が変

わらないようにするため、ユーザは7色1組の実験中は頭を動かさないようにして評価を行った。実験は3人の被験者で行い、7色1組の実験データを計56組得た。

特定の2色について、ある色で読み取りやすいと評価された位置が別の色で読み取りにくいと評価されるように評価が入れ替わる場合を不一致、評価結果が同じ場合に一致とし、全ての色の組合せについての一致率、不一致率を求めた。その結果、不一致率は0.36%、一致率は80.0%となり、光学式シースルー型 HMD では表示するオブジェクトの色を変更することで、視認性に大きな変化を与えないことが明らかとなった。

表示するオブジェクトの色や形状の変化

本手法ではオブジェクトの表示後、色や形状を変化させていない。一般のシースルーでないディスプレイの場合、色や形状を変化させ視認性を高くする手法がとられるが、シースルー型のディスプレイは背景による影響を完全に遮蔽できないという特徴を持つため、色を変化させるだけではやはり読みとれず、大きさを変化させるだけでは一部が読みとれないままである。

しかし暗いところなど背景による影響が少ない状態では、一般のディスプレイと同様に色や形状の変化で視認性が改善する可能性がある。この場合テキストに対しては、視認性に応じてフォントサイズを変更する、文中でもっとも重要なところだけを表示するといった方法が考えられる。画像に対しては、拡大すること有効であると考えられる。

これらを実現するには、制約条件にオブジェクトの最大の拡大率や、文がすべて表示できないときの代替テキストなどを記述する必要がある。

オブジェクトの移動

本手法では、オブジェクトがあまりに頻繁に移動すると背景に対して視認性の高い位置であってもかえって読み取りにくくなるため、オブジェクトを現在表示しているスロットと同じスロットに表示する際に配置全体の影響度を低くすることでオブジェクトの頻繁な移動は抑えている。またオブジェクトが瞬間移動すると、オブジェクト自体の視認性は高くなるが、以前から表示されているオブジェクトか新しいオブジェクトかを区別できずに混乱を招くため、オブジェクトの移動時には、滑らかに移動させている。オブジェクトの移動方法や表示後オブジェクトを動かさない時間についても制約条件に記述できることが望まれる。

3.7.3 関連研究

背景の状態によって表示するオブジェクトが読みとりにくくなるという問題を解決するためには、本研究で示す手法の他にもいくつかの方法が考えられる。

これまでにビデオ式シースルー型 HMD を用いたウェアラブルシステムは多くあり、これらのシステムでは背景が透過しないため、比較的オブジェクトは読み取りやすい。しかし、ビデオシースルー型 HMD を用いると、故障時に大きな表示遅延や画面のフリーズが発生し、ユーザがそれに気づかずに事故につながるといった可能性があり、屋外利用は危険である。またカメラから取得したビデオ画像を HMD 投射するため少なからず遅延が生じ、いわゆる 3D 酔いの状態に陥りやすいという日常使用での問題が発生する。HMD を用いた AR の研究などでは使用の容易さからビデオ式シースルー型 HMD を用いた応用例がよくあるが、多くの場合、故障や 3D 酔いといった問題は考慮しておらず、日常利用には光学式を用いることが必須であるといえる。実際に光学式シースルー型 HMD はすでに工場などで常時装着し使用している実例 [74, 79] が報告されているが、ビデオシースルー型 HMD を業務や日常生活に利用している例はほとんどない。

次に画面に非透過領域を作り、そこに文字や画像を表示することでオブジェクトの読みとりづらさを回避する方法が考えられる。これまでに画素単位で背景を透過するかどうかを決定できる HMD が提案されている [20]。しかし、現在この HMD は大規模な装置が必要であり、ウェアラブルコンピューティング環境では使用できない。また、本研究で用いた島津製作所の DataGlass2/A では、視界を遮蔽する領域は視界の上部にある HMD の筐体と眼鏡のフレーム程度の縁だけと非常に小さいため、非透過領域を増やすと、足元が見づらくなる、視界が狭くなるなどの不安要素が大きくなる。アプリケーションによっては、地図や写真画像、複数の情報の同時提示を考慮する必要があるため、汎用的な HMD の利用を考えた場合、透過領域を利用して情報を提示する必要がある。

これまでに AR の分野で画像の上にアノテーションを重ねる際に背景となる部分の明暗を考慮してアノテーションの位置を決める研究 [22] や映画などの字幕を表示する際に白い字幕の背景をどの程度の透明度で黒く塗りつぶすと十分に読みとりやすくなるかを決定する手法 [46] が提案がされている。これらの手法は背面の透過しないディスプレイを対象としており、本研究の対象とする光学式シースルー型 HMD に特有の表示物が背景を完全に遮蔽できない点を考慮していない。表示物で背景を遮蔽できる場合は、背景の明るさによる影響は少なく、背面が透過するディスプレイでは背景が明るい場合に読みとりにくくなる。

一方で、音声を利用するウェアラブルシステムの研究も数多く行われている。i-Shadow では、テキストデータを合成音声を用いて読み上げ、HMD などの携帯ディスプレイにリンク部分を表示することにより、豊かな情報を音声で伝達している [48]。ニュースや講義を音声で提示する NewsComm では、ユーザの趣向に応じた音声データをネットワーク上から自動で取得し提示する [44]。また、音声データにハイパーリンク機能を加えて閲覧する SoundWeb というシステムもある [36]。このシステムでは、ハイパーリンク部分に他の音を重ねることで関連情報の存在を知覚させ、リンクを辿ることを実現している。

しかし、音声は HMD への提示のように情報がその場に残ることがないため、聞き流してしまったり、地図を使った道案内など継続的な情報提示を要求するアプリケーションに向かない。また、音量が小さければ音声情報は聞き取りづらく、周囲がうるさければ利用が困難となり、逆に音量が大きければ周囲の音を聞くことが困難になる、といったように利用環境が制限されるという特徴もあり、音声提示を用いるだけで、問題を解決できるわけではない。

3.8 むすび

本章では、ウェアラブルコンピューティング環境におけるシースルー型 HMD のためのオブジェクト配置手法を実現した。シースルー型 HMD を使用するユーザにとってオブジェクトの読み取りやすい位置を HMD の背景となる画像の特性を用いて決定し、その結果をもとに制約条件を満たす適切な配置を決定する手法を実現した。ユーザ実験により、光学式シースルー型 HMD のための背景を考慮した視認性に及ぼす影響度算出式を定義した。さらに本研究では、提案手法に基づいたプロトタイプシステムの実装を行い動作を確認した。実装したプロトタイプは、背景によるオブジェクトの視認性を計算し、複数のオブジェクトの位置関係、表示したい位置、重要度を考慮してオブジェクトを配置できる。また、プロトタイプを用いて、提案手法の計算コストの算出を行い考察を行った。提案手法を用いることで、光学式シースルー型 HMD を装着したユーザにこれまでオブジェクトが視認できなかった状況でも、高い確率で情報を伝えられる。また実験により算出した式を用いることで、HMD 上の表示に適した位置を算出するだけでなく、HMD を用いた情報提示に適した状況であるかも判断できる。この活用については、次の第4章で述べる。

今後の課題としては、動いているユーザにはオブジェクトを表示しない、表示位置の変更を行わないなどのユーザの状況に応じた配置、表示するオブジェクトの色や形状の変更

を加えて視認性を高くするときに生じる形状や色の変更の許可，表示した後のオブジェクトの位置変更などの制約条件を考える必要がある．

第4章

状況依存情報提示機構

4.1 まえがき

第3章で述べたように、情報選択フェーズにおいて提示情報が決定した後、情報提示フェーズでユーザに確実に伝えられる提示手法を用いることは重要である。第3章で述べた光学式シースルー型HMDはウェアラブルコンピューティング環境でよく利用される情報提示デバイスであり、読み取りづらさの原因であるHMDの背景領域を考慮することで表示情報の認識率は改善された。しかし、3.6節の実験結果でも明らかとなったとおり、HMDの背景が全体的に表示にふさわしくない場合、つまり式(3.2)の視認性に及ぼす影響度 S が閾値 T を超えた場合には、表示された情報が読み取れないという問題はある。また第1章で述べたとおり、ウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザは複数の情報提示デバイスを装着していることが考えられるため、本研究ではユーザが装着している他の情報デバイスを組み合わせて利用することを考える。

単純に複数の提示デバイスを用いて提示を行うと、多数の情報を受動的に取得するウェアラブルコンピューティング環境では、あらゆる情報が全ての提示デバイスで提示され、ユーザにとって鬱陶しい情報提示になってしまう可能性がある。さらに、第3章で述べた光学式シースルー型HMDにおける視認性の問題と同様、周辺環境やユーザの行動などにより、提示デバイスによっては情報の閲覧が困難になる問題がある。例えば、バイクレースのピットクルー支援システム[27,28]では、音声通話は周辺のエンジン音などのノイズによって聞きとりづらくなる。また腕時計型ディスプレイを用いた観光地案内システムでは、歩行中や屋外の日中など周辺が極めて明るい場合には、ディスプレイに提示された情報が

読みとりづらい。これらの問題を考慮すると、情報の提示に適したデバイスは状況や装着デバイスによって異なり、提示デバイスを状況に合わせて動的に変更する仕組みが必要となる。しかし、従来のサービス開発では、開発時に情報提示デバイスを固定しており、利用時に動的に提示デバイスを変更することは困難である。そこで本研究では、利用する情報提示デバイスの組合せを状況に合わせて動的に変更可能な情報提示機構を提案する。提案機構は、アプリケーションと情報提示デバイスとの間で動作するミドルウェアであり、アプリケーションからの情報提示要求を解釈し、状況に応じた情報提示デバイスで情報を提示する機構である。提案機構では、情報を多様なデバイスでの提示を実現するために情報の形式を変換する情報フィルタを組み合わせて用いる。さらにデバイスの接続状態、ユーザ状況や周辺環境を評価する仕組みを用い、最適な提示デバイスを決定する。

以下、4.2節で想定環境について述べ、4.3節では関連研究を説明し、4.4節で提案システムの構成について詳細に説明する。4.5節で提案機構のプロトタイプの実装、および提案機構を利用する際の手順について説明する。4.6節で提案システムの評価、および考察を行い、最後に4.7節で本研究をまとめる。

4.2 想定環境

想定するウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザは多数の情報提示デバイスとその提示デバイスの認知に影響を与える周辺環境やユーザ状況を取得するためのセンサを装着しているものとする。想定ユーザの一例を図4.1に示す。図4.1では、情報提示デバイスとしてスピーカと光学式シースルー型HMDを装着しており、それらの認知に影響する音、光、ユーザ状況を取得するため、マイクや視界取得カメラ、加速度センサを装着している。このように多種のセンサを用いることで、ウェアラブルコンピュータはユーザの状況や周辺環境を取得できる。ただし、本研究ではセンサからの状況の取得方法は特に言及せず、これまでに提案されている様々な既存のコンテキスト認識アルゴリズム [6, 8, 18, 32] を用いて状況認識するものとする。このようにユーザの状況を取得できる環境は、工場における作業支援システム [49] や観光地案内システム [12, 13, 14, 15] などの多くのウェアラブルアプリケーションにおいて一般的な環境である。

また本研究では、ユーザが受動的に情報を取得するアプリケーションを想定しているため、想定する提示情報は、そのようなアプリケーションで提示されると考えられる、地図や作業のための図形情報、ニュースや作業指示などのテキスト情報などのあらゆる種類の



図 4.1: 想定するユーザの一例

情報を想定する。ただし、本研究では簡単のため、同時に1種類の情報のみを提示するものとする。

具体的に、提案機構が有効に働く状況の例を以下に示す。

- 環境・状況の変化に伴う提示デバイスの選択

ユーザが受動的に情報を取得するアプリケーションでは、環境から情報が提供されるためユーザが意図しないタイミングで情報を提示することが多い。例えば、飛行場近くを歩行している際に、飛行機の騒音の影響で、突然音声情報が入手できなくなったり、急に太陽が照りだしてディスプレイが見づらくなることが頻繁に発生する。そのような場合に、システムが動的に別のデバイスでの提示や提示するタイミングの変更を行うことで、ユーザは確実に情報を取得できる。

- 機器の故障・着脱に対応

ウェアラブルコンピューティング環境では、提示デバイスの故障やユーザが提示デバイスを装着していないなど、利用可能デバイスの変化が頻繁に発生する。例えば、有線で接続されたデバイスがユーザの活動によって断線してしまったり、無線で接続さ

れたデバイスのバッテリーが無くなり、利用できなくなることがある。そのような場合に、システムが動的に利用可能なデバイスを用いて情報を提示することで、耐故障性に優れたシステムを実現できる。

4.3 関連研究

ウェアラブルコンピューティングのための情報提示に関する研究は数多く行われているが、ほとんどは特定のアプリケーションと情報提示デバイスを想定したものである。Active Belt [76] はユーザの腰回りに装着した8個のバイブレータが振動することで、ユーザに方向を伝達する装置である。Haptic Radar [4] は、赤外線センサとバイブレータを用いた危険回避システムである。赤外線センサで物体の接近を検知し、検知した方向のバイブレータを振動させることで、ユーザに危険を通知する。これらの研究では、ある1種類の提示デバイスを用いた情報提示であるため、ユーザの状況の変化時やハードウェアのトラブルなど、その提示デバイスが利用できなくなってしまう際に提示デバイスを切り替えることが困難である。本研究の提案機構は、ある固定の情報提示デバイスを想定しておらず、その時々に応じて柔軟に提示デバイスを変えられる機構であるため、その時々に応じて最も適する装置で情報が提示できる。

また、ウェアラブルコンピューティングのためのプラットフォームに関する研究も盛んに行われている。MITHril [24] では、装着した多数のセンサなどのデバイスや、機械学習による状況認識システムを統合している。ウェアラブルコンピュータのためのルール処理システム [26, 57, 58, 59] では、センサの状態や他のルールからの結果などをイベントとしたイベント駆動型の動作を行うシステムで、プラグインを作成することで様々なデバイスに対応できる。これらのプラットフォームでは、どちらも多種類のデバイスを利用できる機構であり容易なウェアラブルアプリケーション開発が行える。しかし、アプリケーション作成時に特定のデバイスを定義してしまうため、先に述べた情報提示に関する研究と同じく、提示デバイスの動的な変更に対応していない。

さらに、様々な入出力デバイスを想定しているマルチモーダルインタフェースの研究も盛んである。しかし、多くのマルチモーダルインタフェースにおける研究は、提示デバイスに汎用的なものは少なく、視覚提示と振動提示に限ったもの [10] など、特定のデバイスや特定の研究領域をターゲットとしているものがほとんどである。提示デバイスに汎用的な研究としては、WWHTモデルを利用したフレームワーク [43] がある。この研究では、アプ

리케이션に依存しない汎用的なミドルウェアの開発を行っており、提示情報の整理の仕方においては本研究と似ている。しかし、この研究ではアプリケーションごとにモデルを構築するため、アプリケーション作成時に考えられるに全ての状況を考慮した上で、全ての状況に対してif-thenルールを定義する必要がある、アプリケーション制作者の手間が大きい。このような解決手段は大規模なアプリケーションを厳密に作成する際には有効であると考えられる。しかし、ウェアラブルコンピューティング環境で実現される日常生活では、ユーザがその場で気軽に簡単なルールを用いてサービスを記述するようなコンピュータの利用 [73] が考えられ、サービスごとにモデル構築の必要な手法は向かない。また同様の研究として、マルチモーダルアプリケーション作成プロセスの手順を示す研究 [5] もある。この研究は、アプリケーション開発の手間を軽減するものではなく、開発時に注意する点を示しているガイドラインのようなものであり、本研究とは目的が異なる。本研究の提案機構では、これらのフレームワークのようにアプリケーション作成時に状況を考慮するのではなく、利用デバイスごとに状況とデバイスの関係を定義しているため、アプリケーション作成時に状況を考慮する必要がない点で大きく異なる。

4.4 提案機構

提案する情報提示機構は、図 4.2 に示すようなアプリケーションとは独立して動作するミドルウェアである。図中の四角は計算処理を表し、矢印は情報の流れを表す。情報提示機構をアプリケーションから独立させた理由は、ウェアラブルコンピューティング環境で考えられる様々な情報提示の状況とその時に適する情報提示デバイスには関係があり、どのアプリケーションにおいてもその関係は有効である、と考えたためである。例えば、光学式シースルー型 HMD の場合、HMD の背景領域の画像特性によって情報が読み取りづらくなったり、スピーカでの音声提示では、周辺の騒音が大きい場合に聞き取りづらいなど、情報提示デバイスに影響を与える状況はどのアプリケーションにおいても同じであると考えられる。ミドルウェアとして動作することで、状況と提示デバイスの関係性があらかじめ記述できていれば、アプリケーション制作時に多様な状況を想定せずとも柔軟な状況依存情報提示が実現できる。

提案機構は、アプリケーションから見た場合、一つの情報提示デバイスのように振る舞うため、アプリケーションは提案機構に対して情報提示を行う。提案機構は、アプリケーションから受け取った情報やユーザ状況からもっとも適した提示デバイスの組合せを算出

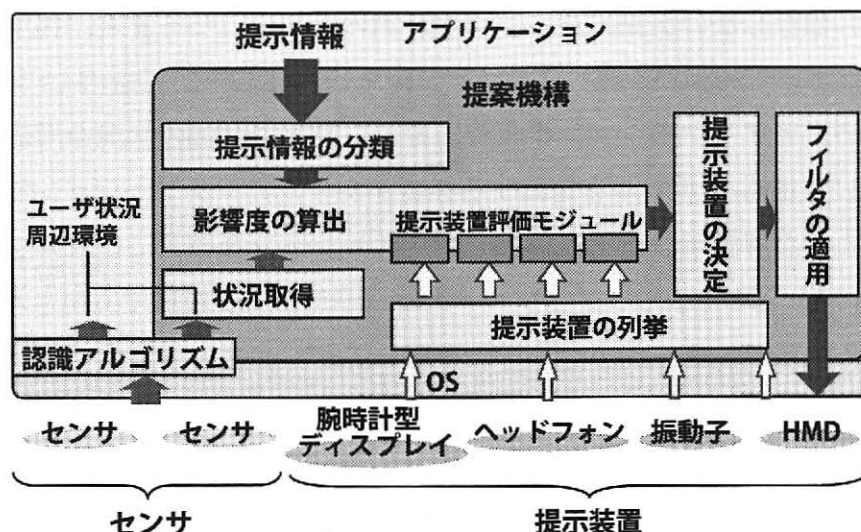


図 4.2: システム構成図

し、適する形式に情報を変換し提示する。具体的には、次に示すステップで提示を行う。これらの処理は、ユーザ状況、提示情報などの機構への入力に変化するたびに行う。

Step1: 提示情報の分類

アプリケーションから提示情報を受け取り、情報のメタデータを用いて分類する。

Step2: 利用できる提示デバイスの列挙

装置の物理的障害や接続状況から現在ユーザが利用できる情報提示デバイスを列挙する。

Step3: ユーザの状況、周辺環境の取得

ユーザの装着しているセンサから、歩いている、走っているなどのユーザ状況や環境音の大きさ、明るさなどの周辺環境を取得する。

Step4: 提示デバイスの影響度の算出と組合せの決定

Step1 から 3 の結果を用いて、提示デバイスに適する情報への変形手段を導出し、状況や提示情報に適する変形手段を決定する。変形手段とは、情報の形式を変換するフィルタの組合せである。

Step5: 提示情報への変形フィルタの適用

実際に決定した変形手段を適用し、提示を行う。

以降、各 Step について詳細に説明する。

Step1: 提示情報の分類

提案機構が受け取る提示情報は、提示する情報そのもの、情報の種類、情報の性質、情報の提示制約で構成される。情報の種類は、アプリケーションが提示機構に渡した情報が、どのような形式の情報であることを示す。情報の提示制約は、その情報をどのように提示したかといったアプリケーション制作者の意図を反映するための仕組みであり、XML フォーマットを用いて意図を表現する。制約の記述によって、提示デバイスや提示方法を固定するなどの提案機構を無視した従来どおりの情報提示も可能である。以下、定義した要素について説明する。

<apply>タグ 包含する要素の処理を適用させるよう働きかける要素である。

- 形式

`<apply f>～</apply>`

- 包含できる要素

`<filter>`, `<format>`

<forbid>タグ 包含する要素の処理を利用しないよう働きかける要素である。

- 形式

`<forbid f>～</forbid>`

- 包含できる要素

`<filter>`, `<format>`

<format>タグ 提示する情報の種類に関する制約を記述する場合に利用する。

- 形式

`<format type="..." />`

表 4.1: 提示情報の種類

値	説明
text	文字で構成される文章データ
number	数字で構成されるデータ
degree	その値の大きさに意味のある程度データ
image	画像データ
boolean	2値データ
direction	方向を表すデータ
sound	音のデータ
pair	2種類の関連するデータをまとめるデータ

- 属性

`type=type` : 表 4.1 に示す情報の種類を示す. `strength=int` : 制約の強さを示す. 1～10 の数字を用いて 10 段階で記述し, 数字が大きくなるほど強い制約となる.

<filter>タグ 利用する情報変換フィルタに関する制約がある場合に利用する. 情報変換フィルタの詳細は **Step2** で詳細に述べる.

- 形式

```
<filter type="..." />
```

- 属性

`type=type` : 表 4.2 に示すフィルタの種類を示す. 表中の入力情報, 出力情報は表 4.1 で定義した情報の種類を表す.

<device>タグ 利用する情報提示デバイスに関する制約がある場合に利用する.

- 形式

```
<device type="..." />
```

表 4.2: 情報変形フィルタの例

フィルタ名	入力情報	出力情報
Text to Image	text	image
Text to Voice	text	sound
Time to Text	text	text
Direction to Text	direction	text
Number to Text	number	text
Number to Degree	number	degree
Changing volume	sound	sound
Grayscale	image	image
Resizing image	image	image
Changing image position	image	image
Summarizing Text	text	text

- 属性

`type=type` : 提示デバイスを示す. `strength=int` : 制約の強さを示す. 1~10 の数字を用いて 10 段階で記述し, 数字が大きくなるほど強い制約となる.

例えば, 提示情報に対して, テキスト要約, スピーカでの提示を禁じ, 出来る限り画像にして提示するという制約を与える場合には, 図 4.3 のような制約を提示機構に要求する. このように現在は, 利用したいデバイス, 禁止するデバイス, 利用したいフィルタ, 禁止するフィルタを直接指定することで, 制約表現を実現している. 制約を解釈する部分を拡張することで, より自由度の高い「情報量を減らさない」などの意味的な制約も実現可能である.

情報の性質は, その情報のもつ固有の性質で以下の性質を定義した.

緊急性: ユーザに早く伝達する必要があるか

機密性: 他人に知られてはいけない情報か

有効性: ユーザに意味がある情報か

```
<apply>
  <format type="image" strength="5"/>
</apply>
<forbid>
  <device type="speaker" strength="10"/>
  <filter type="Summarizing Text">
</forbid>
```

図 4.3: 制約定義の例

持続性: 情報の有効期限はどのくらいか

これらの性質は、ウェアラブルコンピューティング環境で考えられている、ナビゲーションシステムや危険回避システム [4]、記憶補助システム [16]、健康管理システム [40]、作業支援システム [27, 49]、教育システムなどの多種類のウェアラブルコンピューティングアプリケーションを調査し、情報の提示に影響を与えそうな要素を抽出することで決定した。

Step2: 利用できる提示デバイスの列挙

提案機構では、ウェアラブルコンピューティング環境で用いられるあらゆる提示デバイスを想定しているが、全ての提示デバイスがどのような情報でも提示できるわけではない。そこで本ステップで、接続中の提示デバイスの列挙、およびその入力として利用できる情報の種類と提示デバイスの制限を取得する。例えば表 4.3 は、提示デバイスとその提示情報の種類の関係を示す。各提示デバイスは、提示情報の種類に示す情報の種類であれば提示可能である。具体例を挙げると、LED は程度のデータを入力として光の階調を出力として点灯でき、HMD は画像やその時系列データである動画を入力とし出力することを示している。

また各提示デバイスは、提示可能な情報に対して制限をもつ。表 4.4 は、提示デバイスのもつ提示情報の制限の一例である。ある提示デバイスに対して、情報が提示可能な情報の種類とその制限を満たすことで、その提示デバイスで提示可能であることが分かる。例えば、800×600 のサイズの情報を提示できる腕時計型ディスプレイには、大きなサイズの画像情報は提示できない。そのため、提示可能なサイズにまでリサイズを行った情報のみが提示可能である。

表 4.3: 提示デバイスの例

装置名	提示方法	提示情報の種類
LED	明るさの程度	degree
7セグメントディスプレイ	数字	number
ドットマトリクスディスプレイ	画像	image
HMD	画像	image
腕時計型ディスプレイ	画像	image
スピーカ	音	sound
バイブレータ	振動の程度	boolean
温冷覚提示	熱さの程度	degree
香りディスプレイ	香りの程度, 種類	degree

次に、実際に情報が提示可能なデバイスを抽出する。具体的には、あらかじめ定義している、情報の種類を変形する**情報変換フィルタ**を組み合わせ用い、提示情報を提示デバイスに適合する種類に変換できるかを判断する。本研究では、表 4.2 に示すような情報変換フィルタを考えている。例えば、テキスト情報に Text to Image フィルタが適用することで、画像を提示できるデバイスで提示可能となる。これらのフィルタを複数組み合わせたものを、本研究では**フィルタパス**と呼ぶ。実際に提示情報から提示デバイスに対して生成したフィルタパスの例を図 4.4 に示す。また適するフィルタが存在しない場合は、情報が提示できない。例えば、テキストをモルス信号のような時系列 2 値情報に変換する Text to TimeSeriesBinary フィルタを定義していれば、LED のような 2 値情報を提示できるデバイスでテキスト情報を提示可能であるが、そのようなフィルタがなければ、テキスト情報は 2 値情報を提示するデバイスを用いて提示できない。このような仕組みを用いて本ステップでは、提示情報の制約、提示デバイスの制約を満たす、考えられる全てのフィルタパスを列挙する。

Step3: ユーザ状況・周辺環境取得

提案機構では、各提示デバイスを用いる際に認知に影響するユーザ状況や周辺環境を接続されたセンサや認識アルゴリズムから取得する。ユーザの認知に影響する状況や環境は、

表 4.4: 提示デバイスの制限

情報の種類	制約
degree	値域, 量子化レベル
image	解像度, 色数

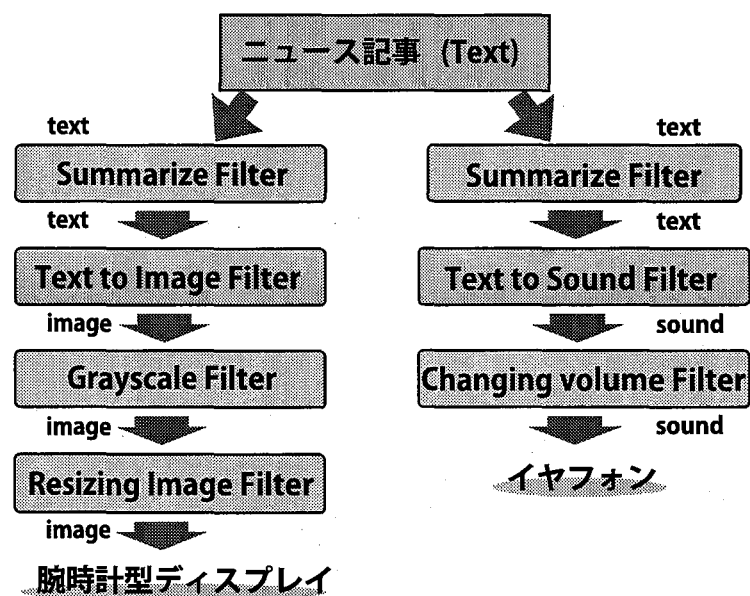


図 4.4: 情報変形フィルタ適用の例

あらかじめ各提示デバイスごとに定義する。例えば、第3章で明らかにしたとおり、光学式シースルー型 HMD は HMD の背景が明るい場合には情報が読み取れない、人混みや階段の歩行中には HMD を注視できない [38] といった影響関係が先行研究で明らかであるため、光学式シースルー型 HMD に対しては、その影響度を算出するために必要な特徴量である HMD の背景となる視界領域の画素の階調値、ユーザ周辺の混雑度合い、ユーザが階段を歩行中かどうかを取得する。またスピーカに対しては、周囲の騒音が大きいと情報が取得できない、会話中であると聞き逃すことがあるという先行研究から、周辺音の音量や会話状況を取得する [81, 82, 83]。

本研究では状況の取得方法については言及せず、状況認識部を通じてあらかじめ定義したユーザの認知に影響する状況・環境の特徴量が取得できるものとする。

Step4: 影響度の算出と提示デバイスの決定

本ステップでは、生成した複数のフィルタパス、取得した状況や環境に基づき、ユーザに確実に伝達できる提示デバイスを決定する。具体的には、Step2で生成した複数のフィルタパスに対して**変換コスト**、および各提示デバイスごとに定義している評価モジュールを用いて取得した状況や環境に応じた**認知コスト**を算出する。変換コストと認知コストの和をフィルタパス全体の認知に対する**影響度**とし、影響度に基づいて提示デバイスを決定する。現在のプロトタイプシステムでは、もっとも影響度の小さい値のフィルタパスを用いて情報を提示する。提示情報ごとに選択基準は変更が可能で、基準を変更することで提示に用いるデバイス数を調整できる。例えば、閾値以下の影響度を有するフィルタパスを選択して、複数のデバイスで提示することも可能である。

変換コストの算出

本研究で定義する変換コストは、情報を変換する際に発生する情報の質に対する影響度を指す。例えば、テキスト要約フィルタを用いることで情報が欠損するため、変換コストは大きな値となる。また、提示要求時に提示制約が与えられている場合は、アプリケーション制作者が意図しない変換を行う場合にも大きな値とする。例えば、制約条件でforbidで定義された情報の種類や情報変換フィルタ、提示デバイスに対しては、それぞれの制約の強さ（strength）に応じた値を与える。このように変換コストを定義することで、アプリケーションの意図した情報提示を優先した情報変換を行える。

本プロトタイプシステムでは、簡単のため各変換フィルタごとに初期値として変換コストを定数で定め、制約に反する変換を行う際には変換コストを大きな値とするだけの機能を実装している。必要に応じて提示する情報の量から一意に求まる変換コストの定義や制約の程度に応じて変換コストを変化させる拡張を行うことも可能である。

認知コストの算出

認知コストは、ユーザの状況や周辺環境が与える認知への影響度を表すヒューリスティックな値であり、各提示デバイスごとに定義している提示装置評価モジュールを用いて算出する。提示装置評価モジュールは、現在の状況がどの程度提示に適した状況であるかを評価するモジュールであり、先行研究等から明らかになっている状況と認知の関係などを参考に認知コストを算出する。

以下では、提示装置評価モジュールの一例として、第3章の成果を基に、実際に定義した光学式シースルー型HMDの評価モジュールについて具体的に説明する。光学式シースルー型HMDに提示された情報の読み取りやすさには、HMDの背景領域とユーザの注視状況が影響する。第3.3.1節で算出したとおり、HMDの背景が提示情報の視認性に与える影響度 E を算出する式(3.2)が明らかであり、影響度 E が閾値 $T_d = 4.09$ を超えたときにHMDに提示された情報が読み取れないことが分かっている。

また注視状況による影響に対して、様々な環境でどの程度HMDを注視できるかを調べた先行研究[38]を参考に、ユーザが各状況で取得可能な情報量を表4.5に示すように定義した。表中の E は、式(3.2)で算出した視認性に与える影響度である。表中の各値は、先行研究で行っているHMDの連続注視時間における実験で、人通りの少ない場所の歩行時に情報を提示した際は7秒程度、階段の上りや人通りの多い場所では、2.5秒程度、階段の下りでは1.5秒程度でありHMDを注視する余裕はほとんどない、といった結果から、階段の下りにおける認知コストは、背景の明るさによってHMDが読み取りが困難となったときと同程度のコストであると考え、以下の式(4.1)を用いて導出した。なお、この式は厳密な議論に基づいた式ではなく、提示デバイスの適切さを求めるヒューリスティックな値である認知コストを算出するために試験的に利用している式である。

$$C = \frac{Time_{down} * T}{Time_i} \quad (4.1)$$

C はHMDを注視可能な時間から求まる認知コストを意味し、 $Time_i$ は状況 i における先行研究における連続注視可能時間である。 $i = down$ は、階段の下りを示す。

フィルタパス全体の影響度の算出

算出した変換コストおよび認知コストの和をフィルタパス全体の影響度を算出する。例えば、図4.4で示したフィルタパスの例においては、イヤフォンに提示するフィルタパスの影響度は、「Summarize Filter」「Text to Sound Filter」「Changing volume Filter」の変換コスト、およびイヤフォンの評価モジュールによって算出できる認知コストの和を影響度として算出する。同様に、腕時計型ディスプレイについても影響度を算出する。

Step5: フィルタの適用

表 4.5: ユーザ状況と提示情報量の関係

ユーザ状況	認知コスト
停止	E
人通りの少ない場所の歩行	$E + 0.99$
人通りの多い場所の歩行	$E + 2.76$
階段の上り	$E + 2.73$
階段の下り	$E + 4.09$

フィルタパスごとに算出された認知に対する影響度から利用するフィルタを決定し、実際に提示情報を変換し提示デバイスでの提示を行う。各フィルタごとに実装している変換する処理を、決定した手順に従って変換し、各デバイスごとに実装した提示処理に基づいて提示する。

4.5 実装

提案機構のプロトタイプシステムを実装した。実装には、Microsoft Visual C# 2005 を用いた。また、テキストからサウンドへの変換には Microsoft Speech SDK 5.1, サウンドでの提示には Microsoft DirectX SDK 利用した。

プロトタイプシステムでは、情報変換フィルタとして、12 種類の変換フィルタを実装し、定義済みの提示デバイスとして光学式シースルー型 HMD, スピーカ, 振動提示デバイスを実装した。ただし、振動提示デバイスとユーザ状況の関係が明らかではないため、振動提示デバイスの評価モジュールは常に適合度 0 を返すものとして定義している。

以降では、提案機構の各要素の実装と拡張性について、新たに定義を追加する例を交えて説明する。

4.5.1 情報提示デバイスの定義

情報提示デバイスは、図 4.5 に示すクラスで定義している。デバイスの列挙時に、提示デバイスで提示可能な情報の種類や制限の参照、接続関係の取得が実行される。状況取得および認知コスト算出時に、認知に影響する状況の評価モジュールとその入力として必要

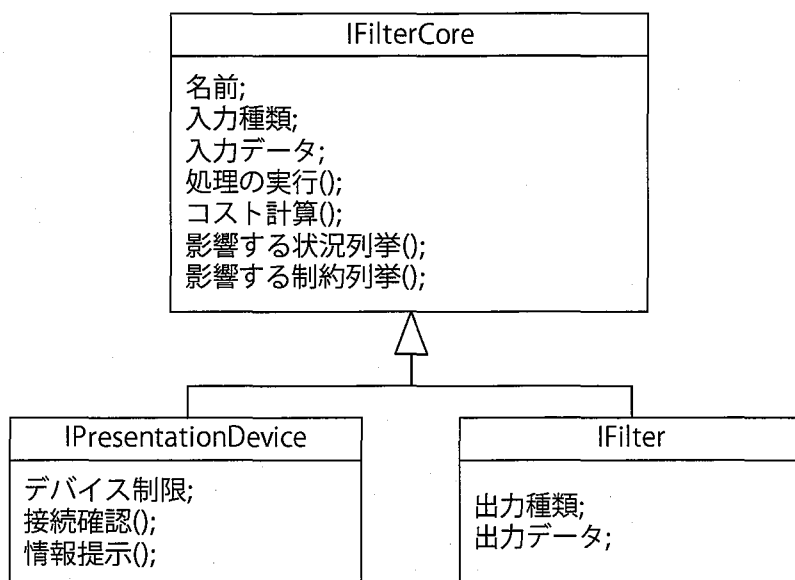


図 4.5: 提示デバイスとフィルタクラスの定義

な状況が参照される。また情報を提示する際に、提示可能な種類の情報を実際に提示する処理が実行される。

提案機構に新たに情報提示デバイスを追加する際には、これらについて実装する必要がある。例えば、新たに腕時計型ディスプレイを定義する場合、提示可能な情報として「画像」、デバイスの画面サイズと色数、接続の確認処理、画像を腕時計ディスプレイに提示する処理、および周囲の明るさや腕を使用状況などの状況とそれらから影響度合いを算出する評価モジュールを実装することで利用可能となる。

4.5.2 情報変換フィルタの定義

情報変換フィルタは、新規提示デバイスとほぼ同様、図 4.5 に示すクラスで定義されている。デバイス列挙時のフィルタパス生成時に、フィルタの入出力情報の種類を参照し、変換コスト算出時に変換コスト算出モジュールが実行される。フィルタパスが決定し、実際にフィルタ処理を行う際に、情報変換処理が実行される。

新規に情報変換フィルタを追加する際には、これらの処理について実装を行う。例えば Image to Text Filter を実装する場合、入力「画像」、出力「テキスト」であり、画像からテキストを抽出するアルゴリズムを実装する。変換コスト算出モジュールは、画像からテキストに情報を変換する際に情報の変化度合いが大きいため、大きな値にするなどとし

て定義する.

4.5.3 状況取得デバイスの定義

現在提案機構では、汎用的な状況取得は行っておらず、実際に提示デバイスが要求する特徴量を取得するセンサをプラグインとして作成し、機構が読み込む形で状況取得を行っている. このセンサプラグインには、センサとの接続処理、センサデータから特徴量への変換処理、特徴量の ID とその値への参照処理を実装している. 新規に状況を取得する際には、これらの処理の実装を行うことで対応が可能である.

また、このようにセンサプラグインを適宜追加することも考えられるが、ウェアラブルコンピューティング環境において状況や周辺環境は、提案機構のみが利用するものではなく、ウェアラブルコンピュータ上で動作する多数のアプリケーションが活用すると考えられる. そのため、将来は汎用的な状況認識基盤が実現され、本提示機構はそのような状況認識基盤から状況を取得できるものと考えている. 実際、すでに Wearable Toolkit [73] と呼ばれる Toolkit では、状況認識を行う基盤を提供しており、今後、多様な統合状況認識基盤が実現されると考えられる. そのような状況認識基盤が実現された場合には、センサプラグインを状況認識基盤のラッパーとして定義することで、あらゆる状況を本機構へ入力できる.

4.6 考察

4.6.1 提示デバイス決定に要する処理コスト

提案機構では、アプリケーションから直接情報提示デバイスに対して提示要求を行う従来の処理とは別に、提示に適するデバイスの評価や選択を行うというオーバーヘッドが発生する. この提案機構のオーバーヘッドは大きく分けて、画像処理や複数のセンサデータから特徴量を算出する状況の認識、フィルタパスの抽出とその影響度の計算、情報の変換処理の3つが考えられるが、状況の認識については状況認識結果は、提案機構以外のアプリケーションでも使用することが考えられ、提案機構固有のオーバーヘッドではないため、考慮しないものとする. フィルタパスの抽出とその影響度の計算のオーダは、 N 個のフィルタを定義し長さ M までのフィルタパスを認めた場合、 $O(N^M)$ の処理となり、多くのフィルタ

表 4.6: フィルタ数6個の場合のオーバーヘッド

フィルタ長 M	1	2	3	4	5	6
組合せ数	6 通り	36 通り	216 通り	1296 通り	7776 通り	46656 通り
処理時間 (ms)	24	30	60	102	152	220

を定義するほど、長いフィルタパスを認めるほどオーバーヘッドが大きくなる。情報変換処理は、選択されたフィルタに適用するだけであるため、 $O(M)$ の処理オーダーとなる。

6つのフィルタを定義したプロトタイプシステムを用いてオーバーヘッドを測定したところ、表 4.6 に示す結果となった。4fps の程度のフレームレートでの運用を考えた場合、フィルタ長は6程度に制限する必要がある。

フィルタは数多く定義する方がより汎用的な提示が可能となり、今後も数多くのフィルタを定義する必要があるため、フィルタ選択のアルゴリズム等はさらに検討の余地があると考えられるが、本機構では、情報提示要求ごとにフィルタパスを生成しており、一度提示された情報を提示中にデバイスや提示方法を変更しないため、フレームレートの遅さによる情報提示への影響は、提示要求から提示までの遅延だけであり、認知に対しては大きな影響はないものと考えられる。

4.6.2 提示デバイス選択の有効性評価

提示デバイスの選択的利用の有効性を簡単なテキスト情報を提示するアプリケーションを用いて評価した。被験者は、4.2 節の図 4.1 で示したとおり、光学式シースルー型 HMD(島津製作所, DataGlass2/A) とスピーカを接続したウェアラブルコンピュータ (Sony, VGN-UX90PS) を装着して実験を行った。評価を通じて、提示デバイス選択の判断基準となる認知に対する影響度の有効性を、影響度の小さいデバイス (Selected Device) と大きいデバイス (Not-selected Device) を比較することで確認する。さらに、もっとも提示情報を認知できると考えられる両方のデバイス (Both Device) に提示した場合との違いから、認知に対する影響度の有効性を確認する。

実験では、「Click 2 times !」といった 3 単語で構成されたテキスト情報を、平均到着率 1 分のポアソン分布の間隔で、Selected Device, Not-selected Device, および Both Device の 3 種類から被験者に分らないようにランダムに選ばれた、いずれかの提示方法で提示す



図 4.6: HMD に提示した情報の一例

る。音声やHMDを通じて図4.6に示すようなメッセージが提示されると、被験者は腰に装着したボタンを用いて反応する。研究室の学生7名を被験者とし、静止時、人通りの少ない場所の歩行、階段の昇降の4種類の状況における反応回数及び反応時間を測定した。

表4.7は、被験者が正しく返答した回数を示す。表から、提示に適するデバイスに提示する方法は不適切なデバイスに提示するものと比較して、高い割合で応答できていることが分かる。また全てのデバイスに提示する場合と比較した場合は、同程度かやや劣る割合となった。ただし、両方のデバイスに提示する場合と比較して、適するデバイスに提示する方法は少ない提示デバイスで情報を提示しているため、ユーザの困惑や不快感にはなりにくいと考えられる。

また表4.8は、情報提示からユーザが反応するまでの平均時間を示している。表から、反応時間は提示に適するデバイスに提示した場合も、適さないデバイスに提示した場合も大きな差は見られない。一方で、全てのデバイスへの提示では、比較的早く反応できている。これは、音の提示はユーザに積極的に提示を行えるためユーザは早くに気付くことができるが、ディスプレイでの提示はユーザの注視が必要であるため判断が遅れるからであると考えられる。つまり反応速度に関しては、デバイスそのものの特性が影響しているものと考えられる。実験では、提示情報に緊急性を求めているためこのような結果となったが、緊急性を高く設定した情報を入力することで、提案機構ではディスプレイでの提示に影響度が高く算出され、音での提示が選択されやすくなる。

評価結果から、全ての装置で提示する場合と比較して、提案手法は少ない提示デバイスで同等の気付きやすさを実現でき、その点で有用であるといえる。特にウェアラブルコンピューティング環境では、ユーザは情報を受ける機会が多く、毎回全ての提示デバイスを用いて提示が行われると、ユーザにとって不快であると考えられるため、提示するデバイスを減らすことは重要であるといえる。

表 4.7: 反応回数

ユーザ状況	Selected Device	Not-selected Device	Both Device
静止時	16/16	9/10	18/18
人の少ない場所の歩行	22/24	10/15	21/21
階段の上り	17/18	8/14	18/18
階段の下り	17/20	6/15	21/22

表中の数字は (反応回数 / 提示回数) である.

表 4.8: 反応時間

ユーザ状況	Selected Device	Not-selected Device	Both Device
静止時	1.41 秒	2.02 秒	1.62 秒
人の少ない場所の歩行	2.04 秒	2.15 秒	1.51 秒
階段の上り	2.42 秒	1.85 秒	1.92 秒
階段の下り	1.95 秒	2.21 秒	1.90 秒

4.6.3 アプリケーションの作成の手間

提案機構を用いたアプリケーション開発は、従来の一般的なアプリケーション開発と同様の記述量で実現できる。これは従来のアプリケーション開発において Graphical User Interface (GUI) やサウンド出力のために定義していた記述が、情報の種類や制約などのメタデータを付与した情報を、提示機構に提示要求として発行する記述に変わるだけであるためである。

提案機構を用いたアプリケーション開発を例として、実際に簡単な RSS リードをアプリケーション作成の手順を説明する。初めにアプリケーションの動作の初期化に、提示機構を起動するための記述を行う。必要に応じて、アプリケーションでは使わないデバイスやフィルタの定義を行う。次に通常の RSS feed を取得する機能を実装し、最後に提示を行う命令を発行する。ここでは、従来の GUI 向けプログラムにおいてテキスト表示の命令を記述していた部分を、図 4.7 に示すコードを用いて提案機構に提示を命令するコードに変更する。提案機構に提示を命令する際に、情報の種類や制約を記述したメタデータを付与す

```
//Getting RSS feeds as same as general RSS reader.  
String strNewsArticle = GetRSSNews();  
  
//We set the format and the characteristics of presentation information.  
//If necessary, we set restrictions here.  
Restriction restNews = new Restriction( DataFormat.Text, Immediacy.Low );  
  
//Issue of presentation requests  
DisplayManager.Presentation( strNewsArticle, restNews );
```

図 4.7: RSS リーダのプログラム例

ることで、提案機構が動的に提示デバイスを選択する。情報ごとに提示するデバイスを固定化したい場合や、提示方法に制約を設けたい場合は、より複雑な制約を記述する。このように、従来の開発と同様の手間で状況依存情報提示が実現できる。

現在のプロトタイプでは、簡単のため単一情報の提示のみを考慮しており、複雑な情報提示を実現できないが、単一情報であっても「この情報は他の情報と同時に提示」などの提示情報間の関係などの制約を定義することで、例えば画像にキャプションをつけるなどの、複数情報の情報提示は可能である。将来的には、機構への提示要求で用いる情報にハイパーテキストなどのマルチメディアデータを扱える形式を認めることで、より複雑な情報提示にも対応できると考えている。

4.6.4 影響度の一貫性

現在は各提示デバイスごとに評価モジュールを定義しているため、他の提示デバイスの出力する適合度との一貫性が保てない問題が発生する。今後は、評価モジュールから算出する適合度の一貫性を保つ仕組みを検討する必要があると考えている。この課題に関しては、ある特定の環境で情報を提示することでキャリブレーションを行う、ユーザのフィードバックを基に算出された適合度の修正を行うなどの方法が考えられる。

4.6.5 状況の取得について

現在の提案機構では、提示デバイスの着脱や故障には動的な対応を行えるが、センサの着脱や故障によって、提示デバイスに影響を及ぼす状況が取得できない場合は一定の適合

度を返すだけである。ウェアラブルコンピューティング環境では、機器やセンサの故障は多発するものであり、ユーザが必ずしも提示デバイスに影響を及ぼす状況を取得できるセンサを装着しているとは限らず、そのような状況でも適応的な情報提示ができることが望まれる。このような状況に対応するためには、センサの故障を考慮したセンサデータの補完手法 [33] などを用いることで、装着していないセンサを装着しているセンサから補うような機構などが必要となる。

4.7 むすび

本研究では、ウェアラブルコンピューティング環境におけるユーザ状況と周辺環境を考慮した情報提示機構を実現した。提案機構は、アプリケーションから受けとった提示情報、様々なセンサから判断された状況や環境、利用できる提示デバイスから、ふさわしい提示デバイスの組合せを決定し、それらの適合度を計算して提示デバイスを決定する。さらに、フィルタを用いて提示デバイスに応じた形に情報を変換する。また実際にプロトタイプを作成し、提案機構の有効性を確認した。提案機構の実現により、アプリケーション制作者にとっては、アプリケーション制作時に状況を考慮した情報提示を実装する必要がなく、状況に応じて適切なデバイスを機構が動的に選択するため、開発の手間が削減できる。また、ウェアラブルコンピュータの利用ユーザにとっては、従来では認知できない状況で提示されていた情報が代替手段で提示され、確実に提示情報を認知できる。

今後の課題としては、情報ビューアに限定せず、ユーザの入力に対応したシステムの拡張を行う必要がある。これはユーザの入力手段によって最適な提示デバイスは変わると考えられるためで、例えば、タッチディスプレイなどの利用時に、ディスプレイのタッチなどのユーザインタラクションが行われた場合、それに関連した情報はディスプレイに提示するなどが考えられる。このような仕組みは、提案機構に定義している状況を取得する部分と同様に、入力を取得する部分を導入し、入力する提示情報の制約にユーザ入力に関連した情報であるという制約を加えることで、実現できると考えている。

第5章

結論

本論文では、ウェアラブルコンピューティングにおけるユーザにとって必要な情報を選択するための情報選択手法とユーザに情報を確実に伝えるための情報提示手法について議論した。

まず、第1章では、ウェアラブルコンピューティング環境における情報提示の重要性を明確にし、提示情報を選択する必要性、および提示情報を適切な情報提示デバイスで適切な方法で提示することの必要性について述べた。

第2章では、まずユーザにとって必要な情報を選択する情報選択に着目し、ウェアラブルコンピューティング環境に特有のユーザの移動中という状態において、情報選択を行うことを目的とした目的地予測手法を提案した。提案手法では、ユーザの移動経路、移動時の周辺環境を用いて過去の移動履歴と比較することで、ユーザの目的地を予測する。提案手法を、車両を用いた移動と歩行時の移動の2種類の実移動履歴に対して適用し、その有効性を評価した。結果より、提案手法を用いることで9割以上の移動期間で、正しい目的地を上位4位以内に予測できることを確認した。

第3章では、ウェアラブルコンピューティング環境で多用されている光学式シースルー型HMDに着目し、その視認性に大きく影響するHMDの背景を考慮して情報を配置する手法を提案した。提案手法では、ユーザが視界取得用に装着しているカメラを用いてHMDの背景に相当する部分のカメラ画像を取得し、視認性に影響を与える画像の特徴量を算出する。算出した特徴量から、ディスプレイ内の読み取りやすい位置に情報を配置する。提案手法の有効性を、実際に光学式シースルー型HMDを装着した被験者に情報を提示し、その反応回数を調べることで評価した。結果より、提案手法を用いることでユーザは高い割

合で提示された情報を認知できることを確認した。

第4章では、第3章で行ったような単一の提示デバイスに対する情報提示技術を複数組み合わせられるような情報提示機構を提案した。提案機構では、情報提示デバイスごとに定義された状況評価モジュールを用いて提示要求ごとに提示デバイス进行评估できるため、ユーザの状況に応じて動的に提示に最適なデバイスを選択できる。提案機構の有効性を検証するためにプロトタイプシステムを作成し、実際にテキスト提示アプリケーションを動作させることでその認知率进行评估した。結果より、提案機構を用いることで、すべての提示デバイスに情報を提示する場合と同等の認知率が得られることを確認した。

本研究の成果によって、ウェアラブルコンピューティング環境において、ユーザの作業状態や周辺環境の影響で認知できない情報を、より確実にユーザに伝えられるようになる。本論文の評価では、できる限り被験者に日常生活を行うよう指示を行っているが、例えば普段HMDを装着していない被験者がHMDを意識してしまうなど、提案手法利用時に手法を全く意識していないとは言い切れず、より長時間、多数のユーザで実運用を通じて評価していく必要がある。しかし、本論文における提案手法はすべてプロトタイプシステムを用いた評価実験で有効性を確認しており、評価で行ったような短期間での利用においては、評価実験と同様の性能が得られると考えられる。

今後の課題として、情報選択フェーズにおいては、現在、ユーザの移動中のみに着目しているため、ユーザの他の状況における情報選択手法が必要であると考えている。ただし、情報選択フェーズにおいては、情報提示フェーズと異なり、すべてのアプリケーションに共通して情報選択を行うことが必ずしも有効であるとは限らないため、共通して情報選択すべき部分とアプリケーションで提示を抑制する部分との切り分けが重要となると考えられる。また、実際に選択された情報がユーザに有益であったかをフィードバックして、より情報選択の精度を高める手法も必要である。

情報提示フェーズにおいては、現在は情報を提示するタイミングについては考慮できておらず、提示要求時に最適な提示デバイス、提示方法を決定しているだけである。情報提示において、提示デバイスや提示方法を変更する以外に、適切と考えられる時間まで提示を待つといった、時間を考慮した手法も考えるられるため、情報を改変して今提示すべきか、情報を改変せずにしばらく待って提示すべきかを汎用的に考えられる仕組みを導入する必要がある。この仕組みを実現するためには、直近の未来のユーザ状況、周辺環境を予測する手法が重要となる。

謝辞

本研究全般に関して、懇切なる御指導と惜しめない御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾章治郎教授に謹んで御礼申し上げます。

本研究を推進するにあたり、直接の御指導、御助言、御討論を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 寺田努准教授に衷心より感謝申し上げます。

本論文をまとめるにあたり、大変有益な御指導と御助言を多数賜りました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 岸野文郎教授、藤原融教授、寺西裕一准教授に心より感謝申し上げます。

講義、学生生活を通じて、学問に取り組む姿勢をご教授頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 薦田憲久教授に厚く御礼申し上げます。

本研究において、多大なる御指導と御助言をご教授頂きました大阪大学サイバーメディアセンター 下條真司教授、金沢工業大学ロボティクス学科 小暮潔教授、国際電気通信基礎技術研究所知能ロボティクス研究所 野間春生博士に厚く御礼申し上げます。

本研究において、ともに研究を進め、多大なる御協力を頂いた三菱電機株式会社 中川隆志博士、山口喜久氏、ウエストユニティス株式会社 宮前雅一博士、NTT コミュニケーション科学基礎研究所 岸野泰恵博士に深く御礼申し上げます。

本研究において、多大なる御助言、御協力、御支援を頂きました神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本昌彦教授、大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 原隆浩准教授、大阪大学サイバーメディアセンター 義久智樹准教授、大阪大学大学院工学研究科 春本要准教授、東京大学情報基盤センター 小川剛史講師、大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 神崎映光助教、東京大学知の構造化センター 中山浩太郎特任助教に深謝致します。

筆者の所属する研究グループにおいて、共に研究を進め、御協力頂きました神戸大学自然科学系先端融合研究環重点研究部 竹川佳成助教、大阪大学大学院情報科学研究科 村尾

和哉氏，株式会社三菱総合研究所 宮下浩一氏，三菱スペース・ソフトウェア株式会社 山下雅史氏，シャープ株式会社 高橋悟史氏，株式会社 NTT データ 山抱加奈氏，大阪大学大学院情報科学研究科 片山拓也氏，神戸大学大学院工学研究科 矢高真一氏に心より感謝申し上げます。

本研究を進めるにあたり，多くの御討論や御助言を頂きました大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻 西尾研究室，神戸大学大学院工学研究科電気電子工学専攻 塚本研究室の諸氏に心より感謝申し上げます。

最後に，研究生活を送る上で，暖かい御支援と多大なる御理解を頂いた両親に心からの感謝と御礼を申し上げます。

参考文献

- [1] Asai, K., Osawa, N., Sugimoto, Y., and Kondo, K.: Operation-support system for transportable earth station using augmented reality, in *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Computer-Human Interaction (APCHI)*, pp. 9–18 (2004).
- [2] Benesse 教育研究開発センター: 若者の仕事生活実態調査報告書ー 25～35 歳の男女を対象にー, ベネッセ教育研究開発センター所報, Vol. 37 (Dec. 2006).
- [3] Benko, H., W. Ishak, E., and Feiner, S.: Collaborative Mixed Reality Visualization of an Archaeological Excavation, in *Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*, pp. 132–140 (Nov. 2004).
- [4] Cassinelli, A., Rynolds, C., and Ishikawa, M.: Augmenting spatial awareness with haptic radar, in *Proceedings of International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2006)*, pp. 60–64 (Oct. 2006).
- [5] Duarte, C., and Carriço, L.: A conceptual framework for developing adaptive multimodal applications, in *Proceedings of International conference on Intelligent user interfaces (IUI 2006)*, pp. 132–139 (Jan. 2006).
- [6] Farrington, J., Moore, A., Tilbury, N., Church, J., and Biemond, P.: Wearable sensor badge and sensor jacket for context awareness, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 1999)*, pp. 107–113 (Oct. 1999).
- [7] Feiner, S., MacIntyre, B., Höllerer, T., and Webster, A.: A Touring Machine: Prototyping 3D Mobile Augmented Reality Systems for Exploring the Urban Environment,

- in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC '97)*, pp. 74–81 (Oct. 1997).
- [8] Golding, A. R. and Lesh, N.: Indoor navigation using a diverse set of cheap, wearable sensors, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 1999)*, pp. 29–36 (Oct. 1999).
- [9] 五味雄一, 森田圭紀, 寺田 努, 東 健, 塚本昌彦: 内視鏡手術における HMD 利用に関する一考察, 情報処理学会研究報告 (ヒューマンコンピュータインタラクション研究会報告 2008-HCI-106), Vol. 2008, No. 106, pp. 75–81 (Oct. 2008).
- [10] Harders, M., and Szekely, G.: Enhancing human-computer interaction in medical segmentation, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 91, No. 9, pp. 1430–1442 (Sept. 2003).
- [11] Kanbara, M., Tenmoku, R., Ogawa, T., Machida, T., Koeda, M., Matsumoto, Y., and Kiyokawa, K.: Nara Palace Site Navigator: A Wearable Tour Guide System Based on Augmented Reality, in *Proceedings of CREST/ISWC Workshop on Advanced Computing and Communicating Techniques for Wearable Information Playing*, pp. 7–14 (Oct. 2004).
- [12] 片山拓也, 村尾和哉, 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 装着型センサを用いた経路推薦機構をもつナビゲーションシステムの構築, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 9, pp. 2350–2359 (Sept. 2009).
- [13] 片山拓也, 村尾和哉, 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: イベント空間におけるユーザ情報を活用した経路推薦機構をもつナビゲーションシステムの開発, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2008, p. 36 (Nov. 2008).
- [14] Katayama, T., Nakamiya, N., Yamashita, M., Murao, K., Tanaka, K., Terada, T., and Nishio, S.: Development of a Navigation System with a Route Planning Algorithm Using Body-Worn Sensors, in *Proceedings of International Conference on Advances in Mobile Computing & Multimedia (MoMM2008)*, pp. 88–93 (Nov. 2008).
- [15] 片山拓也, 中宮正樹, 山下雅史, 村尾和哉, 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 装着型センサを用いた経路推薦機構をもつナビゲーションシステムの開発, 情報処理学会マル

- チメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2008) 論文集, Vol. 2008, No. 1, pp. 641–649 (July 2008).
- [16] Kawamura, T., Fukuhara, T., Takeda, H., Kono, Y., and Kidode, M.: Ubiquitous Memories: Wearable Interface for Computational Augmentation of Human Memory based on Real World Object, in *Proceedings of International Conference on Cognitive Science (ICCS 2003)*, pp. 273–278 (July 2003).
- [17] Kawamura, T., Kono, Y., and Kidode, M.: ice2CU: Managing a Person's Augmented Memory, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2003)*, pp. 242–243 (Oct. 2003).
- [18] Kern, N., Schiele, B., Hunker, H., Lukozicz, P., and Tröster, G.: Wearable sensing to annotate meeting recordings, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2002)*, pp. 186–196 (Oct. 2002).
- [19] Kishino, Y., Tsukamoto, M., Sakane, Y., and Nishio, S.: Realizing a Visual Marker Using LEDs for Wearable Computing Environment, in *Proceedings of International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing (IWSAWC 2003)*, pp. 314–319 (May 2003).
- [20] Kiyokawa, K., Ohno, H., and Kurata, Y.: An Optical See-through Display for Mutual Occlusion with Real-time Stereo Vision System, Elsevier Computer & Graphics, Vol. 25, No. 5, pp. 2765–2779 (May 2001).
- [21] 小林 誠, 嶋 恵子, 小針里美, 曾布川靖, 伊東幸宏, 酒井三四郎: 車載端末向け情報選別配信システムにおける到着地推定機構, 情報処理学会論文誌, Vol. 45, No. 12, pp. 2688–2695 (Dec. 2004).
- [22] Leykin, A., and Tuceryan, M.: Automatic determination of text readability over textured backgrounds for augmented reality systems, in *Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2004)*, pp. 224–230 (Nov. 2004).

- [23] Liao, L., Fox, D., and Kautz, H.: Learning and inferring transportation routines, in *Proceedings of National Conference on Artificial Intelligence (AAAI 2004)*, pp. 348–353 (July 2004).
- [24] MIThril Project, <http://www.media.mit.edu/wearables/mithril/>.
- [25] Miyamae, M., Terada, T., Kishino, Y., Tsukamoto, and Nishio, S.: An Event-driven Navigation Platform for Wearable Computing Environments, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2005)*, pp. 100–107 (Oct. 2005).
- [26] Miyaame, M., Terada, T., Tsukamoto, M., and Nishio, S.: Design and Implementation of an Extensible Rue Processing System for Wearable Computing, in *Proceedings of International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems (MobiQuitous 2004)*, pp. 392–400 (Aug. 2004).
- [27] Miyamae, M., Kishino, Y., Terada, T., Tsukamoto, M., Hiraoka, K., Fukuda, T., and Nishio, S.: A Wearable System for Supporting Motorbike Races –Suzuka 8 Hours World Endurance Championship Race in July, 2004–, in *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2005)*, (Sept. 2005).
- [28] Miyamae, M., Terada, T., Tsukamoto, M., Hiraoka, K., Fukuda, T., and Nishio, S.: An Event-Driven Wearable System for Supporting Motorbike Racing Teams, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2004)*, pp. 70–76 (Oct. 2004).
- [29] 宮下浩一, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 田中宏平, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムにおける情報提示手法, 電子情報通信学会 2006 年総合大会 基礎・境界講演論文集, p. 313 (Mar. 2006).
- [30] 宮下浩一, 寺田 努, 田中宏平, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムのためのマップマッチング手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 1, pp. 75–86 (Jan. 2009).

- [31] 村松邦彦, 塚本昌彦: ウェアラブル機器を用いた歯科医療コミュニケーション支援システムの設計と実装, 情報処理学会論文誌, Vol. 49, No. 1, pp. 11-18 (Jan. 2008).
- [32] Murao, K., Laerhoven, K., V., Terada, T., and Nishio, S.: A Method for Context Awareness using Peak Values of Sensors, in *Proceedings of International Symposium on Ubiquitous Computing Systems (UCS 2009)* (Aug. 2009).
- [33] Murao, K., Terada, T., Yoshinari, T., and Nishio, S.: A Context-Aware System that Changes Sensor Combinations Considering Power Consumption, in *Proceedings of International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2008)*, pp. 197-212 (Mar. 2008).
- [34] Nagahara, H., Yagi, Y., and Yachida, M.: Super Wide Viewer Using Catadioptrical Optics, in *Proceedings of ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST 2003)*, pp. 169-175 (Oct. 2003).
- [35] 中尾太郎, 寺田 努, 塚本昌彦, 宮前雅一, 庄司 武, 岸野泰恵, 義久智樹, 西尾章治郎: ウェアラブル型ルールベースシステムを用いた農作業支援システム, 情報処理学会 第65回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 211-214 (Mar. 2003).
- [36] Nakamura, S., Shoji, T., Tsukamoto, M., Nishio, S.: SoundWeb: Hyperlinked Voice Data for Wearable Computing Environment, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2005)*, pp.14-17 (Oct. 2005).
- [37] Naya, F., Ohmura, R., Takayanagi, F., Noma, H., and Kogure, K.: Workers' routine activity recognition using body movement and location information, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2006)*, pp. 105-108 (Oct. 2006).
- [38] 沖野将司, 寺田 努, 塚本昌彦, 義久智樹: 情報爆発社会のための装着型ディスプレイの注視状況に基づく情報提示手法, 情報処理学会 第70回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 1-2 (Mar. 2008).
- [39] 大津展之: 判別および最小2乗規準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌 D, Vol. J-63, No. 4, pp.349-356 (Apr. 1980).

- [40] Ouchi, K., Suzuki, T., and Doi, M.: LifeMinder: a wearable healthcare support system using user's context, in *Proceedings of IEEE International Workshop on Smart Appliances and Wearable Computing (IWSAWC 2002)*, pp. 791–792 (July 2002).
- [41] Patterson, D. J., Liao, L., Fox, D., and Kautz, H.: Inferring high-level behavior from low-level sensors, in *Proceedings of Ubiquitous Computing (UbiComp 2003)*, pp. 73–89 (Oct. 2003).
- [42] Resnick, P., Iacovou, N., Suchak, M., Bergstrom, P., and Riedl, J.: Grouplens: An open architecture for collaborative filtering of netnews, in *Proceedings of ACM 1994 Conference on Computer Supported Cooperative Work*, pp. 175–186 (1994).
- [43] Rousseau, C., Bellik, Y., Vernier, F., and Bazalgette, D.: A framework for the intelligent multimodal presentation of information, *Signal Process*, Vol. 86, No. 12, pp. 3696–3713 (June 2006).
- [44] Roy, D. K., and Schmandt, C.: NewsComm: a hand-held interface for interactive access to structured audio, in *Proceedings of SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, pp. 173–180 (Apr. 1996).
- [45] Sawhney, N., and Schmandt, C.: Nomadic Radio: Speech Audio Interaction for Contextual Messaging in Nomadic Environments, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, Vol. 7, No. 3, pp. 353–383 (Sept. 2000).
- [46] 清水亮一, 星野孝総, 亀井且有: 字幕付き映像における視認性向上のための字幕表示システムの提案, ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004 講演会論文集, pp. 807–810 (Oct. 2004).
- [47] 篠田裕之, 竹内 亨, 寺西裕一, 春本 要, 下條真司: 行動履歴に基づく協調フィルタリングによる行動ナビゲーション手法, 情報処理学会研究報告 (マルチメディア通信と分散処理 2007-DPS-132) , pp. 87–92 (Sept. 2007).
- [48] 惣田一幸, 角谷和俊, 上原邦昭: 携帯情報端末における音声を用いた Web ナビゲーション, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ論文集, pp.179–186 (July 2001).

- [49] Stiefmeier, T., Ogris, G., Junker, H., Lukowics, P., and Tröster, G.: Combining motion sensors and ultrasonic hands tracking for continuous activity recognition in a maintenance scenario, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2006)*, pp. 97–104 (Oct. 2006).
- [50] 竹内雄一郎, 杉本雅則: 位置情報履歴を利用したユーザアダプティブな街案内システム, 電子情報通信学会論文誌 J90-D, No. 11, pp. 2981–2988 (Nov. 2007).
- [51] 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型 HMD のための背景を考慮したオブジェクト配置手法, ウェアラブルコンピューティング研究会研究報告, Vol. 1, No. 1, pp. 9–16 (Mar. 2005).
- [52] 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型頭部装着ディスプレイのための背景を考慮したオブジェクト配置手法, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2005) 論文集, Vol. 2005, No. 6, pp. 749–752 (July 2005).
- [53] 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 広角カメラを用いた光学式シースルー型 HMD における情報提示手法, インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2005) 論文集, pp. 9–14 (Dec. 2005).
- [54] 田中宏平, 岸野泰恵, 宮前雅一, 寺田 努, 西尾章治郎: 光学式シースルー型 HMD のための読みとりやすさを考慮した情報提示手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 48, No. 4, pp. 1848–1858 (Apr. 2007).
- [55] Tanaka, K., Kishino, Y., Miyamae, M., Terada, T., and Nishio, S.: An Information Layout Method for an Optical See-through HMD Considering the Background, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 2007)*, pp. 109–110 (Oct. 2007).
- [56] Tanaka, K., Kishino, Y., Miyamae, M., Terada, T., and Nishio, S.: An Information Layout Method for an Optical See-through Head Mounted Display Focusing on the Viewability, in *Proceedings of IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR 2008)*, pp. 139–142 (Sept. 2008).

- [57] 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 西尾章治郎: Flash と装着型センサを連携させた体感型ゲームの作成支援フレームワーク, インタラクティブシステムとソフトウェアに関するワークショップ (WISS 2008) 論文集, pp. 111–112 (Nov. 2008).
- [58] 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 西尾章治郎: Flash コンテンツクリエイタのための体感型コンテンツ作成支援フレームワーク, 情報処理学会研究報告 (エンターテインメントコンピューティング研究会 2008-EC-11), pp. 63–68 (Dec. 2008).
- [59] 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 宮前雅一, 西尾章治郎: 装着型センサを用いた体感型 Flash コンテンツ作成支援フレームワーク, マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2009) 論文集, Vol. 2009, No. 1, pp. 280–287 (July 2009).
- [60] 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: カーナビゲーションシステムのための走行履歴と運転状況を考慮した目的地予測手法, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2008) 論文集 (Mar. 2008).
- [61] 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: カーナビゲーションシステムにおける目的地予測のための走行履歴と運転状況の利用に関する一考察, 日本データベース学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 269–274 (June 2008).
- [62] 田中宏平, 岸野泰恵, 寺田 努, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムにおける目的地予測手法, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2008, p. 34 (Nov. 2008).
- [63] Tanaka, K., Kishino, Y., Terada, T., and Nishio, S.: A Destination Prediction Method Using Driving Contexts and Trajectory for a Car Navigation Systems, in *Proceedings of ACM Symposium on Applied Computing (SAC 2009)*, pp. 190–195 (Mar. 2009).
- [64] 田中宏平, 寺田 努, 岸野泰恵, 西尾章治郎: カーナビゲーションシステムのための走行履歴と運転状況を用いた車両目的地予測手法, 情報処理学会論文誌, Vol. 51, No. 1 (Jan. 2010, to appear).
- [65] 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムにおける情報配置手法, 電子情報通信学会 2006 年総合大会 基礎・境界講演論文集, p. 314 (Mar. 2006).

- [66] 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティングのための状況依存情報提示機構の実現に向けて, ウェアラブルコンピューティング研究会, Vol. 3, No. 6, pp. 1-5 (Oct. 2007).
- [67] 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピュータのための状況依存情報提示機構, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2007, p. 45 (Dec. 2007).
- [68] 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: 情報爆発社会におけるユーザ状況を考慮した情報提示装置選択機構, 情報処理学会 第70回全国大会論文集, Vol. 5, pp. 1-2 (Mar. 2008).
- [69] 田中宏平, 寺田 努, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティングのためのユーザ状況を考慮した知覚影響度に基づく情報提示手法, 情報処理学会マルチメディア, 分散, 協調とモバイルシンポジウム (DICOMO 2008) 論文集, Vol. 2008, No. 1, pp. 1479-1486 (July 2008).
- [70] 田中宏平, 寺田 努, 山口喜久, 中川隆志, 西尾章治郎: 目的予測型カーナビゲーションシステムのための運転状況を考慮した目的地予測手法, 電子情報通信学会データ工学ワークショップ (DEWS 2007) 論文集 (Feb./Mar. 2007).
- [71] Terada, T., Miyamae, M., Kishino, Y., Tanaka, K., Nakagawa, T., Yamaguchi, Y., and Nishio, S.: Design of a Car Navigation System that Predicts User Destination, in *Proceedings of International Workshop on Tools and Applications for Mobile Contents (TAMC 2006)*, pp. 54-59 (May 2006).
- [72] Terada, T., Miyamae, M., Kishino, Y., Tanaka, K., Miyashita, K., Nishio, S., Nakagawa, T., and Yamaguchi, Y.: A Car Navigation System for Daily Driving, in *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2006) Poster Session*, DVD-ROM (Sept. 2006).
- [73] 寺田 努, 宮前雅一, 山下雅一: Wearable Toolkit: その場プログラミング環境実現のためのイベント駆動型ルール処理エンジンおよび関連ツール, 情報処理学会論文誌, Vol. 50, No. 6, pp. 1587-1597 (June 2009).
- [74] 地域環境共生地中式廃棄物ガス化熔融機械システムの開発に関するフィージビリティスタディ報告書: <http://www.ena.or.jp/GEC/report/>.

- [75] Thomas, B., Piekarski, W., Hepworth, D., and Gunther, B.: A Wearable Computer System with Augmented Reality to Support Terrestrial Navigation, in *Proceedings of IEEE International Symposium on Wearable Computers (ISWC 1998)*, pp. 168–171 (Oct. 1998).
- [76] Tsukada, K., and Yasumura, M.: ActiveBelt: Belt-Type Wearable Tactile Display for Directional Navigation, in *Proceedings of International Conference on Ubiquitous Computing (UbiComp 2004)*, pp. 384–399 (Sept. 2004).
- [77] 塚本昌彦: モバイルコンピューティング, 岩波科学ライブラリー, 岩波書店 (Dec. 2000).
- [78] 上岡隆宏, 河村竜幸, 河野恭之, 木戸出正継: I'm Here!: 物探しを効率化するウェアラブルシステム, ヒューマンインタフェース学会誌, Vol. 6, No. 3, pp. 275–285 (Aug. 2004).
- [79] wisdom Business Leaders Square ユビキタスビジネストrend 情報と人をつなぐインターフェース: <http://www.blwisdom.com/btrend/06/2.html>.
- [80] 山口和範, 高橋淳一, 竹内光悦: 図解入門よくわかる多変量解析の基本と仕組み-巨大データベースの分析手法入門, 秀和システム (May 2004).
- [81] 矢高真一, 寺田 努, 塚本昌彦, 田中宏平, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティング環境におけるユーザ状況を考慮した音声情報提示システム, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2008, p. 32 (Nov. 2008).
- [82] 矢高真一, 田中宏平, 寺田 努, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピューティング環境におけるユーザ状況を考慮した音声情報提示手法, 情報処理学会研究報告 (ユビキタスコンピューティングシステム研究会 2009-UBI-22), Vol. 2009-UBI-22, No. 11 (May 2009).
- [83] 矢高真一, 田中宏平, 寺田 努, 塚本昌彦, 西尾章治郎: ウェアラブルコンピュータのためのユーザ状況を考慮した音声情報提示手法, ユビキタス・ウェアラブルワークショップ 2009, p. 32 (Nov. 2009).
- [84] 吉岡元貴, 小澤 順: 移動先エントロピーを用いた車両の走行履歴による到着地の推定, 情報処理学会論文誌, Vol. 46, No. 12, pp. 2973–2982 (Dec. 2005).

- [85] 吉岡元貴, 工藤貴弘, 小澤 順: 行動の Frequent Pattern を用いたクラスタリングによる予測手法, 情報処理学会第 66 回全国大会講演論文集, pp. 221-224 (Mar. 2003).

