

Title	HAPMAP : 手すりを伝う感覚による触覚ナビゲーションシステム
Sub Title	HAPMAP : Haptic walking navigation system with support by the sense of handrail
Author	今村, 有希 (Imamura, Yuki) 砂原, 秀樹 (Sunahara, Hideki)
Publisher	慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科
Publication year	2011
Jtitle	
JaLC DOI	
Abstract	<p>本論文では、手すりを伝う感覚による触覚ナビゲーションシステムHAPMAPの提案と、そのプロトタイプとして開発したデバイスの評価を行う。私たちは慣れない土地を訪ねる時、視覚的なナビゲーションシステムを使用することが多いが、視線や意識が手元に集中してしまい街を十分楽しめなくなるばかりか注意力散漫になり危険である。知らない土地こそ、迷う事に気をとられずリラックスした時に多くの発見があり、都市本来の良さが歩く人に伝わる。この点で、現状のナビゲーションシステムは都市経験を損なわせている。そこで、都市を楽しむ上で必要な感覚を損なうことなく使用できる触覚ナビゲーションシステムを手すりのインターフェースを用いて実現し、都市経験の向上を目指す。この目的のもと、直感性、シンプルな構造、自由曲線を誘導可能などの特性をもったデバイスを実装し、SIGGRAPH2011にて実証実験を行った。その結果、手すりのインターフェースが歩行誘導において十分な精度をもつ事が確認できた。また、実際に都市でデバイスを用いてフィールドワークを行い、アンケートによるユーザーフィードバックと、使用に伴う言動の変化の観測を行った。アンケート結果や歩行速度に顕著な差がみられ、HAPMAPを使用する事により都市経験が向上すること、デバイス特性が実際の都市において有効である事を確認できた。</p>
Notes	修士学位論文. 2011年度メディアデザイン学 第151号
Genre	Thesis or Dissertation
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KO40001001-00002011-0151

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the Keio Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

KMD-81035119

修士論文

HAPMAP:手すりを伝う感覚による
触覚ナビゲーションシステム

今村 有希

2011 年度

慶應義塾大学大学院
メディアデザイン研究科

本論文は慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科に
修士(メディアデザイン学) 授与の要件として提出した修士論文である。

今村 有希

指導教員：

砂原 秀樹 教授 (主指導教員)

舘 暲 教授 (副指導教員)

審査委員：

砂原 秀樹 教授 (主査)

舘 暲 教授 (副査)

大川 恵子 教授 (副査)

HAPMAP:手すりを伝う感覚による 触覚ナビゲーションシステム

内容梗概

本論文では、手すりを伝う感覚による触覚ナビゲーションシステム HAPMAP の提案と、そのプロトタイプとして開発したデバイスの評価を行う。私たちは慣れない土地を訪ねる時、視覚的なナビゲーションシステムを使用することが多いが、視線や意識が手元に集中してしまい街を十分楽しめなくなるばかりか注意力散漫になり危険である。知らない土地こそ、迷う事に気をとられずリラックスした時に多くの発見があり、都市本来の良さが歩く人に伝わる。この点で、現状のナビゲーションシステムは都市経験を損なわせている。そこで、都市を楽しむ上で必要な感覚を損なうことなく使用できる触覚ナビゲーションシステムを手すりのインターフェースを用いて実現し、都市経験の向上を目指す。この目的のもと、直感性、シンプルな構造、自由曲線を誘導可能などの特性をもったデバイスを実装し、SIGGRAPH2011にて実証実験を行った。その結果、手すりのインターフェースが歩行誘導において十分な精度をもつ事が確認できた。また、実際に都市でデバイスを用いてフィールドワークを行い、アンケートによるユーザーフィードバックと、使用に伴う言動の変化の観測を行った。アンケート結果や歩行速度に顕著な差がみられ、HAPMAPを使用する事により都市経験が向上すること、デバイス特性が実際の都市において有効である事を確認できた。

キーワード

ナビゲーションシステム, 触覚技術, 拡張現実, モバイル, インタラクション

慶應義塾大学大学院 メディアデザイン研究科

今村 有希

HAPMAP:Haptic Walking Navigation System with Support by the Sense of Handrail

Abstract

In this paper, I propose a tactile navigation sensory system that emulates the sensation of using a handrail called HAPMAP. People commonly use visual navigation system when visiting unfamiliar places. They get so focused in reading the map that their eyes and consciousness are diverted from the landscape. It is only when we are a relaxed state that we can discover the intrinsic beauty of an unknown city. Therefore, in order to increase enjoyment of city exploration, I aimed to create a sensory handrail interface navigation system to ensure the sense of support of a handrail in the streets. The device was constructed and operated by an analog controller with an automated navigation based on location.

HAPMAP was presented and tested at SIGGRAPH Emerging Technologies. The results were positive as a handrail interface navigation device. Furthermore, the prototype was tested in the city where a survey and user feedback were collected. Based on those results, a noticeable difference was seen in the walking velocity when utilizing HAPMAP, thus increasing city exploration experience. The device's unique design proved to be effective.

Keywords:

Navigation System, Haptic Media, Augmented Reality, Mobil, Interaction

Graduate School of Media Design, Keio University

Yuki Imamura

目 次

第1章 序論	1
1.1. 創造経済において求められる都市のあり方	1
1.1.1 景観の美しさがもたらす経済効果	1
1.1.2 都市の環境刺激が育む創造性	3
1.2. 空間デザインとテクノロジー	6
1.3. 触覚技術によるナビゲーション	9
1.4. 本研究の目的	10
第2章 関連事例	12
2.1. 都市におけるナビゲーション	12
2.1.1 地図	12
2.1.2 Google Maps	13
2.1.3 音声ナビゲーション	13
2.1.4 案内標識・サイン	14
2.1.5 触地図	14
2.1.6 盲導犬	15
2.2. 触覚技術における先行研究	16
2.2.1 触知覚原理	16
2.2.2 触覚提示技術	17
2.3. 触覚ナビゲーションにおける先行研究	18
2.3.1 触覚ナビゲーションの定義	18
2.3.2 Buru-Navi	18
2.3.3 Pull Navi	19
2.3.4 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導	20

第3章	手すりを伝える感覚による触覚ナビゲーションシステムの提案	21
3.1.	これまでのナビゲーションシステムの問題点	21
3.2.	コンセプトメイキング	21
3.3.	手すりの感覚を用いる有効性	22
3.4.	目指すシステム像	24
3.5.	本章のまとめ	26
第4章	設計・プロトタイピング	28
4.1.	触覚を再現する手法	28
4.1.1	手すりの感覚についての考察	28
4.1.2	提案する圧力分布再現法	29
4.2.	コントローラー型デバイスのプロトタイピング	30
4.2.1	1st プロトタイプの実装	30
4.2.2	実験	31
4.2.3	2nd プロトタイプ	33
4.2.4	仮現運動の検討	35
4.2.5	ファイナルプロトタイプ	36
4.3.	本章のまとめ	37
第5章	位置情報に基づく自動ナビゲーション	40
5.1.	MotionCaptureによる自動化	40
5.2.	SIGGRAPHにおける実証実験	43
5.2.1	実験の目的	43
5.2.2	展示構成と体験の流れ	44
5.2.3	データ分析	46
5.2.4	体験の様子	47
5.2.5	体験者の感想	48
5.3.	本章のまとめ	50
第6章	フィールドテスト	53
6.1.	実験の目的	53

6.2.	実験条件	53
6.3.	実験結果	55
6.3.1	アンケート結果	55
6.3.2	観察記録	56
6.3.3	考察	58
6.4.	本章のまとめ	60
第7章	結論	61
7.1.	本研究の試みと成果	61
7.2.	今後の展望	62

目 次

1.1	ビルバオ・グッゲンハイム美術館	2
1.2	「居住地と幸福に関する調査」の主な結果	3
1.3	Google 社オフィス	4
1.4	Facebook 社	5
1.5	skype 社	5
1.6	ダ・ヴィンチが描いた解剖図	7
1.7	飛行装置設計図	7
1.8	印象派絵画（「散歩，日傘をさす女」クロード・モネ）	8
2.1	スティックチャート	13
2.2	ポイティングー図	13
2.3	SDA Design Award 優秀賞, 東京大学先端研のサイン	15
2.4	佐藤卓による武蔵野美術大学図書館のサイン	15
2.5	手の受容器	17
2.6	ぶるなび（1方向のみ）	19
2.7	ぶるなび（8方向）	19
2.8	Pull Navi	20
3.1	コンセプト図	23
3.2	経路を示す手すり	24
3.3	目指す体験・システム	25
4.1	手すりを伝う際に手のひらに加わる圧力分布	28
4.2	設計	29
4.3	自由曲線のナビゲーション	29

4.4	プロトタイプ構成図	31
4.5	1st プロトタイプ	31
4.6	装着した様子およびデバイス動き	31
4.7	実験ルート	32
4.8	実験の様子	32
4.9	実験結果	32
4.10	歩行経過	33
4.11	2nd プロトタイプ	34
4.12	改良過程のプロトタイプ例 1	37
4.13	改良過程のプロトタイプ例 2	37
4.14	ファイナルプロトタイプ	38
4.15	手に持った状態	38
5.1	システム構成	41
5.2	制御方法の概要	43
5.3	フロアプラン	44
5.4	iphone アプリケーション	45
5.5	軌跡のプロジェクター表示	45
5.6	展示ブースの様子	46
5.7	ルートと目的地	46
5.8	平均誤差と標準偏差グラフ (単位 cm)	47
5.9	体験者が歩いた軌跡の例: ルート 1 (ピンクライン)	48
5.10	体験者が歩いた軌跡の例: ルート 2 (イエローライン)	49
5.11	体験者が歩いた軌跡の例: ルート 3 (グリーンライン)	50
5.12	体験風景	51
5.13	あるユーザーの体験の流れ	52
6.1	実験経路	54
6.2	写真記録の結果例	58
6.3	GoogleMaps 使用時の様子	59

6.4 HAPMAP 使用時の様子	60
-----------------------------	----

第1章

序 論

1.1. 創造経済において求められる都市のあり方

1.1.1 景観の美しさがもたらす経済効果

創造経済とは、創造性が経済発展の中核的な資源となる経済システムである。経済が成熟し市場が飽和に近づいたことによって、生産効率以上に商品がもつ付加価値の重要性が高まっている。必要なものが一通りそろった私たちの生活において、商品に機能を果たす以上の付加価値、新しい感動や体験を与えてくれる固有の特性が求められるようになった。一方、デジタルコンテンツやインターネットなどの技術革新により、アイデアが経済にもたらす影響力はかつてないほど拡大している。創造性を持つ者が富を得やすい社会へと変化し、資源や機械を持つだけでは競争力を維持することが難しくなっているのである。付加価値が重要となるのは都市においても例外ではない。インターネットショッピングの普及により物流における商環境の必然性が薄れ、自宅にいながらクリック一つで翌日、遅くとも数日以内に商品が届く時代において、場所性、付加価値、場がもたらしてくれる楽しい体験など、わざわざ交通費と労力を払って商環境に出かける理由・意義が都市に求められるようになった。効率化における豊かさを十分享受している我々を動かすものは、楽しさ・感動などの精神的な満足であり、美しい景観デザイン・都市の文化的アイデンティティ創造は集客力・人が場にいる理由として機能し場の経済活性化に一役買うものだ。これを体現したものが、スペインのバスク自治州ビルバオ市にあるビルバオ・グッゲンハイム美術館（図1.1）である。ビルバオ市はバスク国の首都ではあるが、目につく産業は造船、商業、製造業とであり、美術館が建設されている敷地は、以前は工場1棟、駐車場1つが

あるだけの地味な場所だった。しかし、フランク・ゲーリーによって設計された壮大なグッゲンハイム美術館は、くすんだ工業都市の印象が強かったビルバオを芸術最先端中心地へと一転させた。ゲーリーの斬新なデザインにより美術館は瞬く間にビルバオの町のみならずバスク国を象徴するシンボルとなり、開館して最初の10年間でビルバオの町に注目を集めて都心を再建というゴールを達成したのである。現在は毎年世界各国から年間100万人の訪問客を魅了し、地元に必要な経済効果をもたらす有数の美術館となっている [1]。

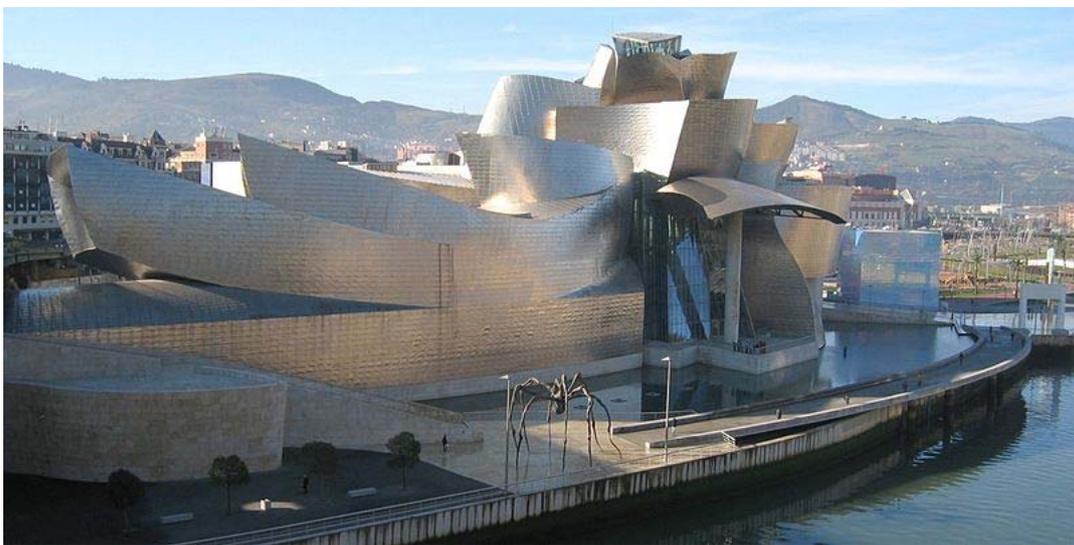


図 1.1 ビルバオ・グッゲンハイム美術館

また、美しい景観は居住地の選定にも影響している。アメリカにおける居住地と幸福に関する調査 (図 1.2) では、居住地の満足度を裏付ける主だった要素のうち、美的感覚と基本的サービスの2つが上位を占め、次いで開放性が3位という結果が出ている [2]。

1. 美的感覚…美観, 快適性, 文化的環境
2. 基本的サービス…学校, 医療, 住宅の入手しやすさ, 交通の便
3. 開放性…人種・民族的マイノリティや高齢層など, 多様性に対する寛容性

4. 治安と経済安定…犯罪と安全に対する認識，経済の方向性，雇用機会
5. リーダーシップ…官民のリーダーシップの資質と実行力，住民の地域参加

出典：クリエイティブ都市論

居住地選択の要因	5段階評価の平均スコア	相関係数			
		場所に対する全体的な幸福感	都市に対する満足感	友人や家族への推奨	将来への展望
美的感覚	3.65	.622	.581	.579	.503
基本的サービス	3.46	.603	.545	.558	.509
開放性	3.03	.509	.455	.475	.427
治安と経済的安定	1.72	.497	.454	.441	.437
リーダーシップ	NA	.432	.408	.377	.376

【注】平均値は1から5までの5段階評価に基づく。1が最も低い評価で、5が最も高い評価。回答総数2万7885件。なお、NAはNo Answerの略である。

図 1.2 「居住地と幸福に関する調査」の主な結果

地域で基本的サービスを提供してもらえることは生活の前提であり，上位に位置するのは尤であり妥当だ。しかし，注目すべきは他の生活の基盤として重要かつ実用的な要素を差し置いて，美的感覚が最も重視されている点である。食べ物や住居など，生存を確保するための消費はあらゆるものが不足した状態でこそ最優先にされるものの，一定ラインを確保できた後，限界価値の低下は早い。一方，美的感覚や娯楽など限界価値の低下はゆるやかである。そのため，都市の景観の美しさは経済が成長するにつれてより重視されることとなり，今後ますますその傾向は高まると予測できる。

1.1.2 都市の環境刺激が育む創造性

このように付加価値が重視される社会の中で，その源泉となる創造性を磨く需要が高まっている。書店に行けば「ブルーオーシャン戦略」「イノベーション」

「ブランディング」など創造性にまつわるキーワードが並び、リクルーティングにおいてはグループディスカッションや新規事業企画ワークショップ等、学生の創造性における適性をはかる試験が多くの企業で課されるようになった。企業主催の学生向けビジネスコンクールも頻繁に開催されている。こういった、創造性を学ぼうという意欲や創造性をもった人材を集めようという動きは随所にみられるが、創造性を発揮する上で環境に受ける影響を軽視してはならない。この事をよく理解し、実際に活用されている例が、海外のネット企業のオフィスである。図 1.3,1.4,1.5 は Google 社、Facebook 社、skype 社のものであるが、従来型の画一的なオフィスから一線を隠し、創造性を刺激する工夫が随所にみられる。



図 1.3 Google 社オフィス

特に Google 社は創造的オフィスの代名詞的存在として注目を集めており、働くという概念にある負の要素を覆し、働く事とリラックスする事がイコールで結ばれるオフィス空間を目指して、革新性だけでなく、生活環境としても成立する空間を提供している [3]。ユニークなインテリアやおもちゃによってインスピレーションとリラクゼーションを両立し、雑談がブレインストーミングに発展した際には思いつきを壁に描いて仲間とシェアできるようになっている空間は、もともと自由な彼らの思考を拡張する力をもっている。

日本においても企業の創造力を生み出す場として、オフィス環境に高い関心が

払われるようになっているが、現状としてユニークなオフィスをもつ企業はまだまだ少数派である。また、オフィス環境の充実は創造性の発揮において有効な手段であるが、オフィスは閉ざされた空間のため組織に属する者だけが享受できるものである。創造経済において日本の競争力を全体として高めるためには、日本に住むひとりひとりが創造性を育む機会に恵まれる必要がある。そのため所属する組織を問わず、日常の中で誰もが身をおく事ができる都市こそ、創造性を刺激する場として機能すべきと考える。

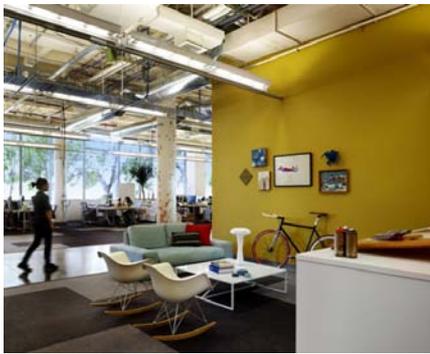


図 1.4 Facebook 社



図 1.5 skype 社

創造性を磨く上で効果的な方法のひとつとして、創造的な物を多く見ることがあげられる。新しい創造とは今までの記憶の中から、これまで存在しなかった新しい「組み合わせ」を考えだす行為だからである [4]。我々はそれまで知らなかった新たな発見があると脳が刺激され活性化すると共に、そこで得た新規性を思考の基礎として脳に蓄積する。この蓄積されたものが、些細な出来事と紐づいて突然にアイデアとなって飛び出してくるのだ。フィールドワークによる発想法はこれを短期間に高確率で起こす方法のひとつである [5]。日常の中でフィールドワークを行うように発見をもたらす機会を多く与えてくれる都市こそが、創造性を育てる力をもった都市であると私は考えている。

現代の日本における環境刺激の豊富な場所のひとつに銀座がある。日本最大の繁華街であり東京屈指の高級な商店街として、日本国外においても戦前より知られているブランド価値の高い街だ。その高級なイメージから、歩行者の年齢層は他の街に比べ若干高め傾向があるが、私は銀座こそ、若い人が眼と創造性を磨

く絶好の場所だと考えている。銀座は美や文化における集中が起こっている街である [6]。銀座の中央通りには和光・松屋・松坂屋・三越・プラダ銀座など大型百貨店、歴史のある靴やカバンなどの専門店、代表的な高級ブランド店が軒を連ねている。歴史を感じさせる街並みから店舗の中に視線を移すと、先端のトレンドが圧縮された世界が広がり、店舗の顔となるショーウィンドーたちはまるで街全体が美術館であるかのように、新鮮な造形の美に溢れている。そして、3ヶ月ごとに変化することで新鮮さを失わない。造形は感性に訴えるものであることから、万人が受け取りやすいメリットがある。優れた創り手が世に出すものは、その後ろに新規性やねらいがあり、驚きや発見をもたらす。これにより、創造の引き出しを開く訓練となるのである。私は初めて銀座の街を歩いた時に強い衝撃を受け、都市歩きにおける発見の経験を拡張したいと思うようになった。

しかし、このような都市環境が実現していく前の段階として、私たちは環境刺激を十分に受け取る準備が整っているだろうか。多くの人にとって都市を歩く行為は目的地にたどり着くための手段である。時には観光のさなかでさえ、名所巡りの手段としてしまっている場合もある。

都市はそこに暮らす人々の感性や文化の現れである [7]。そこで、創造的な都市への進化の前提にはまずは人の視線を都市に向けて人の感性や文化をつくる必要性を感じた。

1.2. 空間デザインとテクノロジー

都市という空間に、新たなアプローチを開拓するには、空間デザインとテクノロジーのコラボレーションが有効である。

アート分野とテクノロジーは離れた存在ではなく、古くより互いに影響し合うことでそれぞれの分野に発展をもたらしてきた。ルネサンス期を代表する画家レオナルド・ダ・ヴィンチは、「自分の芸術を真に理解できるのは数学者だけである」という言葉を残している [8]。描く対象の美しさを真実に近づける目的から人体解剖に立ち会い、極めて詳細に書きこんだ解剖図 (図 1.6) を多数作成、他に

も飛行用装置の試作 (図 1.7) や橋の設計, 歯車を用いた史上初めての機械式計算機, バネの動力で動く自動車の構想など, 多くの研究成果を残し, 13,000 ページに及ぶ手稿は 19-20 世紀になってから科学技術の分野での先駆的な研究として注目を集めている。彼は幾何学的な透視図法に「遠くのものには色に変化し, 境界がぼやける」という概念を組み合わせ空気遠近法を創造するなど, 以降の画家に多大な影響を与えたが, この技法ひとつとっても彼が芸術家としての鍛錬だけでなく, 対象物を科学的にみる視点によって芸術の世界に新規性を提供した事が感じられる。

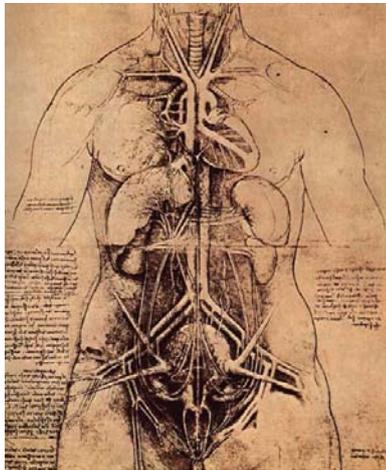


図 1.6 ダ・ヴィンチが描いた解剖図

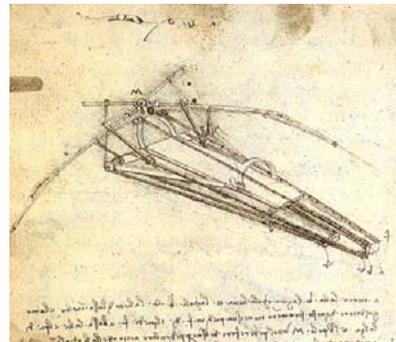


図 1.7 飛行装置設計図

また, 19 世紀末から 20 世紀初頭にかけて誕生した印象派絵画は, 1827 年に発明された写真と, 1840 年に絵の具を長時間保存可能とするチューブの発明によって生み出されたものだ [9]。19 世紀頃のヨーロッパでは肖像画を描くことが一つのステイタスとして大きな需要があったため産業として確立し, 学校も多く設立され, 技術さえ学べばそこそこの絵が描けるようになっていた。そんな折に, はるかに安価で納期が早く正確に被写体を再現する写真が発明され, 更に, チューブの絵の具の登場により, 画家の没個性化が進んだ。それまで絵の具は保存がきかないため描く都度に画家が自ら調合しており, 色づくりの技術が画家の個性の一つとなっていたが, チューブの絵の具が販売されるようになったために, 誰でもきれいな色を表現できるようになった。写真とチューブ入り絵の具はどちらも



図 1.8 印象派絵画（「散歩，日傘をさす女」クロード・モネ）

当時の先端技術である。画家の専門性「写実表現」「色づくりの技術」は技術革新によりコモディティ化し、当時の画家に大きな脅威をもたらした。しかし同時に、それらはまったく新たな表現のインスピレーションと手段を与えたのである。瞬間をとらえた写真映像は当時の人々にとってこれまでにない新鮮なものであり、チューブ入りの絵の具はそれまでの下地となる単色画の上に薄く溶いた色絵の具を重ねる技法を覆す手段となった。瞬間を捉え、豊富な色とふんだんな絵の具によって光そのものを描く印象派は、技術革新が絵画のあり方にまで革新をもたらした好例なのである。このように、テクノロジーとアート表現は古くから密接な関係にあるが、近年に近づくにつれて一層その表現方法はテクノロジーの影響を強く受ける方向へと進化している。戦前のアートにおけるテクノロジーの扱いは、概して絵画、彫刻といった従来の美術表現の枠内での表現にとどまっていた。しかし、電子テクノロジーの発展を背景に、先端的な科学技術や工業製品そのものに求める動きが生じ、電子部品や工業的な素材を用いて、光、音、動きで観客を包み込むような空間を演出する新しい表現が生まれた。これが現代のインタラクティブアートやデジタルアートへと発展を見せている [10]。

これらの歴史から、科学の視点、先端技術の動きに対して興味をもち取り入れ

ることが、既存の表現の殻から抜け出す有効な手段であるということが読み取れる。今では古典とされている過去の芸術たちも、その時代においては最先端のテクノロジーによって変化を遂げた先端アートなのである。そこで私は現代の先端技術との融合によって、都市における発見の体験を拡張するあらたな空間デザインを行いたいと考えた。

1.3. 触覚技術によるナビゲーション

この考えから先端技術に興味を持つようになり、特に拡張現実の関連技術について調べるようになった。当時セカイカメラ [11] が実社会でも話題になりはじめ、興味のとっかかりとなりやすかったためだ。そんな折に本研究科で触覚の先端技術に出会った事が、強いインスピレーションと創作意欲もたらした。触覚研究は現在、ヒトの触覚原理の解明 [12][13] およびその知見を援用した触覚提示 [14] やロボットの触覚センサ [15] など、広い分野で盛んに行われているが、基礎研究の段階に近いため実社会で応用されている例は少ない。そのため予備知識がないままに体験する事となったのだが、バーチャルなものに触れる感覚が思っていた以上にリアルに再現されており、自分の知覚が騙される様はまるで魔法かマジックのように不思議かつ新鮮な体験であった。「意外性」や「驚き」はデザインにおける重要な要素であるため、デザイン分野との相性の良さを感じ、この技術を用いた都市空間における新しい試みを模索した。「見えるが、触れない」「見えないが、触れる」「見えるし、触れる」「見えるものとさわり心地が違う」など、様々な「見えると触る」について考察していくのだが、そのうちに存在への知覚は見えることよりもむしろ触れることにあると思うようになった。これは創作の世界などにおいても見て取れるのだが、例えば、見えるが触れられない幽霊には実体がなく、透明マント [16] に見えなくする力はあるが、存在は消せないためぶつかるとばれてしまう。ゲーム表現においても、「すり抜けられる壁」と「通り抜けられない場所」では後者に実体が与えられている。見えるが触れない物は実体がないまやかしのよう扱われ、見えないが触れる物は隠された真実のように扱われているのだ。多くの触覚技術は視覚による感覚の補完のためにディスプレイ

に表示させているが、視覚を使わず触覚にフォーカスすることで、目に見える空間とは異なる主観上の空間を作り出すことができ、ディスプレイの範囲に縛られずに空間要素を変化させるくらい大きい、あるいは遠くまで続くものを表現できると考えた。公共の空間をすべての人にとって最適なものにするというのはとても難しい。都市が変化する為には長い時間が必要であり、汎用性があるように作られるため個の都合に対して融通が効かない。まして、その日時々の個人の都合に応じて都市が変化することは、物理空間ではありえない事だ。しかし、触覚技術を用いることで主観上の都市であれば、変化させる事ができる。この表現は都市空間における新たな可能性を提案できると考えた。

そして、この表現を応用することにより、人の目を都市に向けた新たな都市ナビゲーションができるのではないかと考えた。現状、ナビゲーションシステムは視覚を用いたものが多く、都市経験を損なわせている。人が環境刺激をより多く受け取るのは知らない土地を尋ねた時だが、この際ナビゲーションをつかうことにより視線が手元に集中し、その土地の魅力を受け取ることができないばかりか、注意力散漫になり危険な状態になってしまう。これでは都市歩き本来の楽しみを感じることができず、ナビゲーションのあり方に改善の必要があるといえる。例えば、その時の都合に応じて自分の行きたい場所を示すように主観上の都市が変化するナビゲーション体験は現状の視覚的ナビゲーションと異なり、楽しさや気楽さを与えてくれるだろう。触覚を用いてこのようなナビゲーションを実現する事によって、人の視線を街並みに向け、都市への関心を促進できると考えた。

1.4. 本研究の目的

本研究の目的は、都市を楽しむ上で必要な感覚を損なわず、都市への関心を促進するナビゲーションシステムの実現である。創造経済を背景に美や付加価値の重要性が増し、人材には創造性が求められるようになった。誰もが日々接する都市においても付加価値創造や創造性を育む場として機能することが必要となっている。しかし、環境刺激を受け取る準備が整っていなくては、創造性を享受することはできない。本来ならば、いつもと違う場所を歩いている時ほど新鮮な環境

刺激を得られるものだが、私たちは慣れない土地を訪ねる時、視覚的なナビゲーションシステムを使用することにより視覚をふさいでしまっている。多くのナビゲーションは街を歩く上で、効率を補佐するものでしかない。この問題に対し、必要な5感を損なうことなく使用できる触覚ナビゲーションシステムを提案し、ユーザーの心持ちの変化を通して都市経験の向上を目指す。また、現実の建築・都市は個人や時間の都合に合わせて容易に変化させることができないが、目に見える空間とは異なる主観上の空間を触覚テクノロジーで創ることによってもたらされる可能性を探求したい。

第2章

関連事例

2.1. 都市におけるナビゲーション

2.1.1 地図

最も根源的なナビゲーションは地図である。地図は地球上にある自然物または人工物を、数値・記号・文字・線などを使い、一平面上に表現したものであり、現在は国土交通省・国土地理院により管轄されている。地図の始まりは生活において有利な情報を残すために空間を絵に簡略化して表すことを起源としている [17]。文字よりも古いコミュニケーション手段として、表現手法として人類に重宝されてきた。よりよい生活をおくるには、食料や水源、危険地帯などの地理情報を仲間と共有する必要があったため、木の枝を用いたスティックチャート (図 2.1) や貝殻とヤシの繊維を編んで表した海図、洞窟の壁面に描かれた絵地図など、さまざまな手段を用いて地理情報を抽象化した図で残そうとしたことがはじまりである。地図には 30 以上もの種類があり、我々が一般に都市を歩く際に地図として使用しているのは道路地図やガイドマップを指す。道路地図は、世界を正しく計測・記録する技法よりも、目的地に迷わず到達できることに主眼をおいて作られた実用的な地図であり、その基礎は、ローマ時代に作られた。ローマは土木と軍事に長けていた国民性から、道路を基本としてローマ帝国の領土全体を描いた『ポインティングー図』(図 2.2) を発明した。現在では、モバイル端末によるナビゲーションが普及し、紙の地図を用いることは少なくなったが、あらゆるナビゲーションの前提となる情報である。

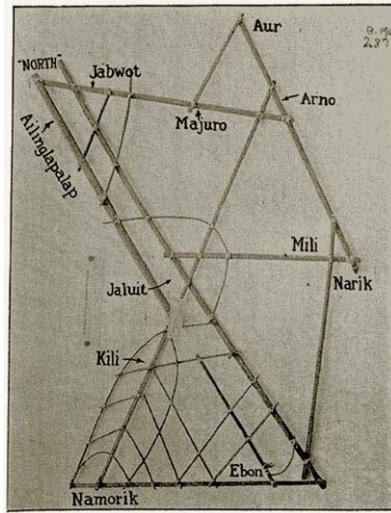


図 2.1 スティックチャート

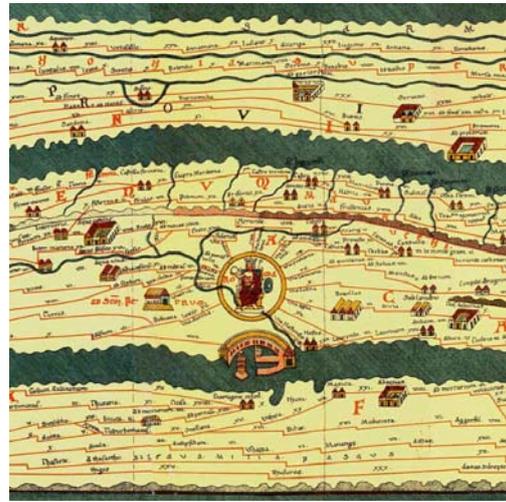


図 2.2 ポイティンガー図

2.1.2 Google Maps

2006年のGoogle日本語版検索ランキングの1位は「地図」であり、インターネットによる地図配信はインターネットにおいて最も主要なコンテンツとなった。視覚的なナビゲーションの中で最も主要なものがGoogle Mapsであり、Googleがインターネットを通して提供しているローカル（地域）検索サービスである。アメリカとヨーロッパ一部地域や日本は経路検索も可能で、道路からの風景を見るストリートビューも提供されている。Google Mapsは単体での利用のほかに、公開されているAPIを利用することで、一般のホームページの中にGoogle Mapsによる地図を組み込むこともできる。また、ライフログ[18]や防災[19]、文化振興[20]など、Google Mapsをベースにした研究が多く発表されている。

2.1.3 音声ナビゲーション

音声ナビゲーションはカーナビゲーションに代表されるように、画面だけでなく音声で操作や指示をナビゲートするものである。古くから音声によるインターフェースは研究者により盛んに研究され、音声合成・認識が発展してきた背景のもと、視覚障害の歩行援助やナビゲーションによって視覚が塞がれる事による危

険を回避する目的で音声による歩行誘導が多数研究されている [21][22]. これらの研究は主に危険回避に視点をおいているためか, ブザー音や合成音声など, デジタル的な表現によって開発される例が多い. 視覚障害を持った人の多くは視覚以外の感覚の重要度が増し, 聴覚はその最たるものである. 周囲の状況の変化や気配を察知するために鋭敏になった聴覚にとって, 強すぎる音の刺激はかえって都市における安全を損ねてしまう可能性がある. 単に正しくナビゲーション出来るかではなく, そういったセンシティブなことに対しても考慮しながらのアプローチが必要な分野である.

2.1.4 案内標識・サイン

サインの情報要素は「案内」「誘導」「記名」「解説」「注意」の5つに大別でき, これらの情報要素を設置場所の状況に応じて, 単独で, あるいは組み合わせて配置する. 街をわかりやすく案内し, 街や文化に対する理解を深め, すべての人が自在に活動できるようなまちづくりのために, サインは大きな役割を担っている. サインは単体では比較的小規模だが, 一定の領域にわたって展開される場合, そのあり方が景観に大きな影響を与えるため, 提供すべき情報が増えていく状況の中で, 乱立による景観の阻害を防ぎ, 良好な環境を形成するという役割もサインには求められている [23]. 近年の建築においては空間デザインの一部としてデザイン性に富んだサイン計画も多くなされている (図 2.3,2.4).

2.1.5 触地図

触地図とは, 視覚障害者が触覚により空間認識を行うための地図のことで, 「触知地図」や「触覚地図」とも呼ばれる. 1880年代に盲学校において地理の授業用に作成されたのが始まりであり, 道路や建物などの地物を凹凸のある線や網目模様で, 注記を点字により表現する. バリアフリーのため, 駅や公共施設などに構内図や周辺図として設置されている. 国土地理院から配信されるベクタ形式の地図情報を取り込み, 触地図を作成するための原稿データをその都度動的に生成する「触地図原稿作成システム」も開発され, 一般に試験公開されている. 街な



図 2.3 SDA Design Award 優秀賞, 東京
大学先端研のサイン



図 2.4 佐藤卓による武蔵野美術大学図書館のサイン

かに設置されている触知案内図や点字サインの歴史は 1970 年代初頭から始まり, 1990 年代から法律などで福祉の現場で設置が義務づけられるようになると, 建築工事の一環として製作されるようになった. 結果, わが国は世界でも例をみないほど多量の触知案内図や点字サインが整備されているが, 一方で質の低下という新たな問題を生んでいる [24].

2.1.6 盲導犬

視覚障害者を安全に快適に誘導する犬である. 盲導犬には, 白または黄色のハーネスをつけることになっており, ユーザー (使用者) は, このハーネスをにぎって盲導犬とともに街を歩き, 盲導犬はユーザーの指示を受けながら目的地まで安全に誘導していく. 盲導犬の機能は, 主人の命令に従って, 直進, 左折, 右折等を先導する「服従機能」, 障害物がある場合には主人の命令に従わず停止し, そのことを知らせる「かしこい不服従機能」, 人間と犬との情報伝達, およびそれらの共同作業の「マンマシーンコミュニケーション機能」がある [25]. 犬が目的地に連れていってくれると一般に誤解されやすいが, あくまでも主人が行きたい方向に対して犬が障害物などを避け, 段差などを知らせながら先導するだけにとどまっ

ている [26]. 盲導犬とのコミュニケーションは、イメージよりも静的なものである。何かある度に犬が止まる、そして主人が確かめることによって障害物や段差を知るのである。これはナビゲーションにおいても参考になる教育方法で、ナビゲーションが前走りユーザーの意志をコントロールするのではなく、ユーザーの行動に対して適切なフィードバックを行うことが、危険回避においてもストレスのないユーザー体験においても重要である。

2.2. 触覚技術における先行研究

2.2.1 触知覚原理

触知覚原理について述べた本として、『Human Hand Function』 [12] や『タッチ』 [13] などがあげられる。手の運動と体性感覚、さわる・さわられる、認識の基盤としての体性感覚、体性感覚系の基礎知識などが述べられている。本研究においては特に手の感覚に関する情報が重要となる。これまで、人間の手の進化は主に3回あり、1度目では手が5本指になることで物の持ち運びが簡単になった。2回目には爪ができることにより、のぼりおりが簡単になった。そして、3回目に受容器が増えた。この3つの代表的な進化により、融通のきく手の動きができるようになり、2足歩行を選択するようになった。それでも霊長類（人間）の手は他の部位（足や顔や肩、膝、おしり）よりも比較的原始的である。手のひらの触覚においては、3回目の進化により増えた受容器が非常に重要となる。受容器とは、外界や体内からの刺激を受け取る器官のことであり、圧力に対し非常に速やかに順応し、振動などによく反応するマイスナー小体（主に表皮下層に分布）やパチニ小体（真皮下層や皮下組織に分布）、圧力に対し遅く順応し、持続的な皮膚への圧力によく反応するメルケル触盤（主に表皮に分布）、圧力に対し遅く順応し、持続的な皮膚の変形などによく反応するルフィニ終末（主に真皮に分布）、自由神経終末などをさす (図 2.5)。触覚や圧覚の生理的基盤としては、圧力の変化に対して応答する細胞が主たるものとして考えられている。圧力に反応する細胞には数種類あり、主に圧力がかかって反応し始めてから、順応して反応しなくなるまでの時間特性が異なる。順応が早い細胞は圧力がかかり続けている状態で

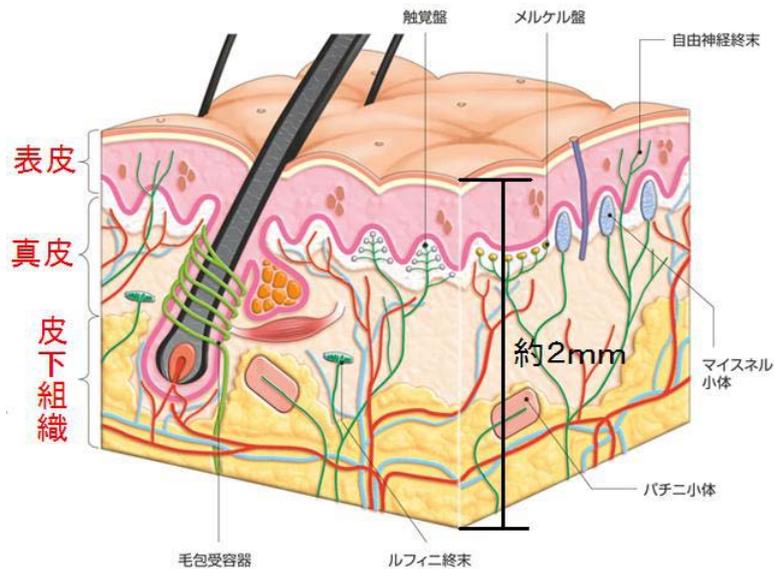


図 2.5 手の受容器

は反応しないため、圧力の変化や振動があるときにのみ反応する。順応が遅い細胞は持続的な圧力の存在に反応する。

2.2.2 触覚提示技術

触覚提示技術の例として、GravityGrabber[27], Pen de Touch[28], AuxDeco[29]などを例にあげる。GravityGrabberは、空の箱やグラスの中にまるで何かが入っているかのような感覚を提示するシステムである。実際には存在しない物体の重さや慣性質量の提示を、指先に装着するシンプルなデバイスで実現している。Pen de Touchは、バーチャルな物体に触った力を提示する触覚ディスプレイであり、ペン型のデバイスを介して様々な物体に触った感覚を再現することができる。体験者は、デバイスを持って空間中で手を動かすことで、画面上に表示されたバーチャルな物体を触って感触を楽しみ動かして遊んだりすることができる。これらは、DUALSHOCK(Sony)やWiiリモコン(任天堂)など、振動感覚による触覚フィードバック機能を持ったユーザインタフェースが一般家庭にも普及しつつあることを背景に、より進化した家庭用インターフェースを提案するため、小型・

安価で効果的な触覚体験を提示可能な手法の開発を行なった研究である。また、AuxDecoは、額における感覚（触覚）を使って物を認識する感覚代行技術を用いている。ヘッドバンドに内臓された小さなカメラが装着者の眼前の視界をとりこみ、とりこまれた視界の画像は電気刺激により触覚情報に変換される。AuxDecoは視覚障害者特に全盲の方にとって、外科的手術の必要ない視覚代行を目指したシステムである。

2.3. 触覚ナビゲーションにおける先行研究

2.3.1 触覚ナビゲーションの定義

ここで述べる触覚ナビゲーションとは、単にバイブレーションを使って右左を示すものとは異なり、人の知覚、体性感覚に錯覚などを起こすことにより、自然な感覚として歩行誘導するシステムを指す。

2.3.2 Buru-Navi

Buru-Navi(図2.6, 2.7)はNTTの雨宮らの研究で、手を引っ張る感覚による道案内をコンセプトとし、重りを往復運動させる際の往路と復路の加速度の差により一方向に引っ張られる錯覚によってナビゲーションを行うシステムである[30]。利用者の手を引くようにある方向にナビゲートするためには、外部に固定されたけん引装置が必要となる。しかし、それでは携帯することができず、ロケーションを選ばない自由な移動も不可能である。そこで雨宮氏は物理的なけん引力を発生させるのではなく、物体に触れた時に、その形状や硬度、重量、抵抗や運動などの情報を感知する「力覚」に訴える仕組みを考えた。人間は周囲の現象をそのまま正確に認識しているわけではないという仮定のもと、引っ張られる錯覚を起こすために再現すべきエッセンスとして速い動きには敏感である一方、遅い動きは知覚しにくいという、人間の感覚特性に注目した。ケースの中に重りを仕込み、けん引したい方向には速く、逆方向にはゆっくりと動く非対称な往復運動をする装置の実装に至っている。



図 2.6 ぶるナビ (1方向のみ)



図 2.7 ぶるナビ (8方向)

Buru-Naviは携帯電話への応用を前提に開発されているが、この機構を携帯電話に組み込むに当たっては、小型・軽量化が大きな課題となっている。けん引力は【質量×加速度】で生み出されるので、小型化のためには振動速度の向上を図ることが求められる。Buru-Naviの構造は一方向に対して引っ張る力を提示することに成功しているが、多方向を示す為に複数同様の装置を重ねる方法をとっている。現状の携帯電話のデザインは縦幅に比べ横幅が狭いため、この方法を変更せずに携帯電話への内蔵を試みる場合、特に左右方向におもりを往復させる機構を内蔵させる上での工夫が必要となると思われる。また、外力を発生させることができず、不自然感が残ってしまっている点も課題である。

2.3.3 Pull Navi

PullNaviは電気通信大学の小島らが開発した耳牽引型ナビゲーションデバイスである。耳が引っ張られる触覚の提示により、わずかな力で方向を提示する。耳を引かれる体験は多くの人々が共通して持つ体験であるため、ごく自然に運動方向を誘導することができる。視覚的なナビゲーションは、「見る」「判断する」「リアクションする」の3段階のプロセスからなるが、PullNaviを用いることで「提示」と「リアクション」を同時に起こすことが出来、前後、左右、上下の3軸を示すことが出来る。小さな力で直感的に、多方向にナビゲーション可能なPullNaviであるが、ヘッドマウント型であるため、頭部に目立つ装置をつけねばならず、実際の都市のシチュエーションでは使用しにくいのが難点である。



図 2.8 Pull Navi

2.3.4 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導

前庭感覚ディスプレイは、耳の後ろに小型電極を装着し、微小電流を流すことにより平衡感覚に対して影響このインターフェースを用いることで身体に直接働きかけ、平衡感覚が操作され、視覚・姿勢・歩行に影響がおこる。陽極側に歩行が誘導され、歩行方向の誘導量は刺激電流量に比例して大きくなる。これによって、ユーザーが触覚提示に対して能動的に対応しなくとも自動的に歩行誘導されるシステムを構築している。また、このインターフェースによる平衡感覚の知覚作用を用いてバーチャル空間における地面の傾きや揺れの感覚、加速度感覚を知覚させることにも応用する実験がなされている。前庭感覚刺激インターフェースの歩行ナビゲーションへの応用の問題点としては、その特性である平衡感覚をうばってしまうこと自体にある。盲導犬が引っ張らないよう教育を受けている点からもわかるように、自律的に都市を楽しむユーザーにとって、自己判断を不可能にするような強制力は利点にはならない。ユーザーの能動性、行動が先立った上で、適切なフィードバックを行うことが危険回避においても、ストレスのないユーザー体験においても重要である。

第3章

手すりを伝う感覚による触覚ナビゲーションシステムの提案

3.1. これまでのナビゲーションシステムの問題点

都市におけるナビゲーションは、個人が手持ちするモバイルナビゲーションから公共のサインまで、ほとんどが視覚に依存しているため、都市環境における感受性を阻害し都市経験を損なわせている。テレビの副音声など、視覚の代用として聴覚を用いる例は多々あるが、音声によるナビゲーションは言語に依存し騒音に弱いだけでなく、会話や音楽、都市のサウンドを楽しむ上で必要な感覚を損なうため、この問題の解決においては適切ではない。そのため、都市において必要なら感を損なうことなく使用できるナビゲーションを開発すべく、視覚に不自由をもった体験と照らしあわせてコンセプトを立てた。

3.2. コンセプトメイキング

人は目に不自由がある時、壁など自分の位置や進むべき方向を把握できるものに触れることによって安心感を得たいと感じるが、都市の中では触れながら歩ける物が思いの外存在しない。私は片目の怪我によって、都市を歩く行為ががいか視覚に依存しているかを実感した。学校に向かう僅かな距離でさえ片目を眼帯で塞ぎ距離感や焦点が合わない目での歩行は思いの外辛く、無意識に弱っている部分を他の部分を使ってカバーしようと視覚の補佐になるような、触れて迎えるものを探していた。「探した」と自覚したのは、それが見つからなかったためだ。

ガードレール、歩道脇の建築物や塀など、空間を区切るものの多くは触れられる物が多く、イメージの上では触れられるものは存在すると思っていたが、実際には駐車された自転車の妨害、地面のタイルのみによって区切られた私有地、シャッターのあいた店舗などが連続的にあり、数メートルさえ触れ続けられるものはなかった。この時、私はとても心細い気持ちになり、ストレスを感じた。「都市で障がい者を見かけないのは、障がい者が安心して歩ける街ではないから」障がい者支援施設でボランティアをした時に聞きかじった言葉だが、障害をもった人に比べればちっぽけな目の不自由でさえこんなに苦勞するのでは、街を歩けないというのも頷けると思った。この時、ほとんど視覚を使わずとも移動に困らなかった室内に比べ、都市においては著しいストレスと不便を感じた事が、空間を触覚で変化させることによるナビゲーションの構想と紐付き、壁や手すりを辿るようなインターフェースをナビゲーションに適応するアイデアが浮かび上がった。室内で移動に困らなかった要因は、壁や手すりなどの触れて辿ることで経路を知らせてくれるものの存在である。自分のためだけに都市に伸びる壁や手すりがルート以外の空間を遮ることで、分岐のない道を歩くように、迷うことに気をとらわれないリラックスした状態をつくることができる。この気持ちの変化が都市の見え方を変え、環境刺激による活性化や都市に対する関心・感受性の高まりを促進できると考えた。この事から、コンセプトとして「手すりを伝う感覚によるナビゲーション」を立案し、このシステムの名称を「HAPMAP」とした。

3.3. 手すりの感覚を用いる有効性

ナビゲーションシステムで再現する触覚については、当初は壁や手すりなど、室内で触れて辿ることができる物を軸に検討していた。その中で、日常習慣的動作やナビゲーション使用時の姿勢を考慮する中で手すりの感覚を再現する事が最も自然な使用感を創ることができるという結論に至った。手すりをもつ姿勢はほとんど通常の歩行姿勢と変わらず、長時間続けても疲れる要因とならない。また、手すりを伝う行為は日常的に身体に刻まれた動作である。階段を降りるときや室内を歩く時、何気なく手すりをもって歩くが、この際、手すりの曲がる方向を目で



図 3.1 コンセプト図

確認しなくとも、手のひらに感じる感覚で自然と手すりの曲がる方向へと誘導される。この「辿るだけで経路がわかる」という手すりのアフォーダンスを再現することにより、無意識に誘導される自然な使用感を実現できると考えた。手すりを伝える感覚は身体記憶として我々の無意識に深く定着している。記憶には「意識的かつ言語による顕在記憶」と「無意識的で非言語的な潜在記憶」があり、潜在記憶は顕在意識より強固な記憶であり、身体記憶は潜在記憶に身体感覚が結びついたものである [31]。例えば、ピアノ等の楽器演奏における発表の場で緊張から頭が真っ白になってしまう事があるが、それでも日頃よく弾き込んだ演奏者は正確に手を動かすことができる。記憶が無意識の層まで深く根付いていることによって、意識に関係なく記憶を再現できてしまうのだ。このように、潜在記憶は非常に強固なだけでなく、シチュエーションや条件がそろふ事により無意識に再現してしまう性質ももっているため、デバイスによって類似した触覚のフィードバックがされる事で自然とそのように動いてしまう直感性を得られる利点がある。



図 3.2 経路を示す手すり

3.4. 目指すシステム像

本研究が目指すユーザー体験とシステムを図に示す(図 3.3)。スマートフォンにユーザが行き先を入力し、現在位置の情報の取得後ルート検索・選定を行う。その選定したルートに応じて空間上にバーチャルな手すりを設定し、その手すりとうーザの位置関係に対応して、向かうべき方向を示す触覚情報をデバイスに反映させて目的地に導く。

このシステムの実現の要件は大きく3つあげられる。

1. 手すりの感覚を提示するデバイス
2. 精度の高い位置情報
3. 使用場所に合ったサービス (アプリケーション)

まず、手すりの感覚を提示するデバイスだが、使用用途・シーンから考えると、このシステムに必要とされるデバイスの要件はスマートフォンなどのプラットフォームとの接続、把持型、触覚の持続的提示である。位置情報の取得やアプリを起動するためのプラットフォームとしてはスマートフォンを用いることを検討し、携帯性と装着の簡易性を実現するために把持型である必要がある。このことからスマートフォンと通信する事を前提に、自然な動作にあった持ちやすいデバイスの形状、触覚提示方法を模索した。



図 3.3 目指す体験・システム

続いて、位置情報についてだが、都市で歩行ナビゲーションを行うためにはユーザの現在地を取得するため、GPS(Global Positioning System)を用い経路情報と現在地を比較し、デバイスの制御を行う。バーチャルな手すりをマップ上に設定するためには、曲がり角でタイミングがずれずに自然なカーブを描くためにも歩道の道幅と同等レベルの精度の位置情報が必要である。システムを屋内に応用する場合には、カメラ・センサ・室内GPSなどによって位置を取得する。

サービスについては、ナビを使用する場やシチュエーションに合わせたアプリケーションの開発が必要になる。都市において使用する際には、スマートフォンなどのプラットフォームにGoogle Mapのような、目的地を入力するためのアプリケーションが必要となる。施設内で応用する場合には、その場所に合わせたアプリケーションを作成する。例えばアミューズメントパークの場合には乗り物の混雑情報やこのデバイスを使用することで参加できる体験型イベント、ショッピングモールでは買い物促進につながるコンテンツをユーザーに提供するなどである。目的地入力方法においても、施設内であれば目的地が限られるため、地図選択の他に目的地の画像選択の方が操作が簡単になる場合もある。

本研究では、デバイスおよび位置情報に基づくデバイス制御方法を優先して開発を行った。この2点が本システムの要であり、これを確立することにより、GPSに繋げるだけでなく、使用者の目的にあわせてセンサ環境を整備することで、デバイスの応用先に広がりを持つことが出来る。コンセプトの有効性を示す上でも、デバイスの特性や有効性をしっかりと確立し論文として示す事が重要である。

3.5. 本章のまとめ

本章では、コンセプトに至った経緯とその妥当性、そして目指すシステム実現の要件を述べた。これまでのナビゲーションは視覚に依存していることから都市体験を阻害する問題がある。視覚を使わずに使用できるナビゲーションをつくるにあたり、目の怪我によって視覚に不自由があった体験を通して、無意識レベルで視覚の代替えとして手すりの安心感を求めているという気づきをコンセプトへとつなげた。そして、そのインターフェースがナビゲーションにおいて有効であ

る根拠を身体記憶の観点から述べた。最後に、目指すシステム実現に必要な要件として、デバイス・位置情報を取得できるセンサ環境・アプリケーション化と運営の3つを明らかにした上で、本研究ではデバイスおよび位置情報に基づくデバイス制御に焦点をあてて開発をすすめる方向性を示した。

第4章

設計・プロトタイピング

4.1. 触覚を再現する手法

4.1.1 手すりの感覚についての考察

デバイスの開発をはじめるとにあたり、まずは既存のデバイスである指先装着型触覚ディスプレイ [27] を用いて、デバイスの位置がルートから大きく離れるほど強く圧力をかけるプログラミングにより、手すりを伝う感覚の再現を試行した。このことにより、ルートから外れた時のみの触覚提示では正しいルート歩いている時にデバイスの反応がないことで手すりを伝う感覚を失ってしまう事や、ルートから外れてしばらくすると、指にかかる圧力が単に指を締め付けている感覚になってしまうことから、指先の触覚を提示する既存デバイスによる感覚提示では不十分であることがわかり、手すりの感覚がどのような要素から成り立つかを考えた。手すりの感覚を再現するには、手すりが手のひらの表面を滑る触覚、



図 4.1 手すりを伝う際に手のひらに加わる圧力分布

そして手すりを曲がったときのカーブ感の2つの触覚情報が必要であるが、ナビゲーションを行うには方向を示す上で有用なカーブ感がより重要と思われる。私は手すりに手を這わせ、手が局面に触れる感触は何によってもたらされるかを模索した。目を瞑って手すりを持っただけでは、それがどのくらい先まで続いている手すりなのか分からない。一度に触れられる範囲は手のひらの面積だけで、先まで手すり伸びている事を確認できるのは運動が伴うからである。アニメがいくつものコマが連続して少しずつ変わることによって動いているように見えるのと同じように、手すりの感触も、手を滑らせる一瞬の連なりによって認識しているのだ。

その一コマを切り取り並べると、触れている面が少しずつ傾きを変える事により、沿わせている手が同じように向きを変えるというシンプルな動きに集約できる。この角度変化に伴う圧力分布の変化(図4.1)が歩く行為と重なることによってカーブ感を認識させていると考えた。

4.1.2 提案する圧力分布再現法

前項で分析した事を基に、カーブした手すりを伝う圧力分布を再現する為の機構として、サーボモーターを使用し手のひらに触れるパーツがシーソーのように動く機構を設計した(図4.2)。歩く速度に対応して傾きが変化し、水平を保っている状態では直進を示し、前方が起き上がるにつれ右、後方が起き上がるにつれ左に手すりが曲がっているような錯覚が生まれる仕組みとなっている。この方法に

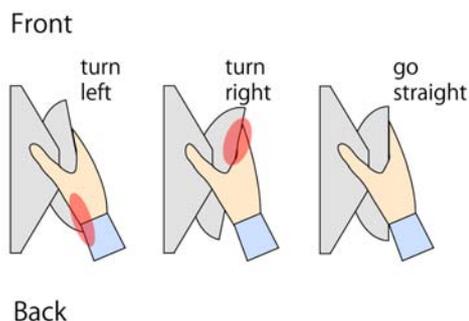


図 4.2 設計

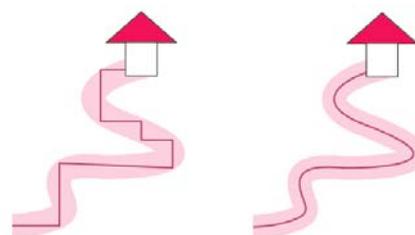


図 4.3 自由曲線のナビゲーション

より、ポータブルかつシンプルな方法で、右・左などの記号的な方向ではなく、自由曲線の微妙なラインまで詳細にナビゲーションすることを可能とした。このことにより、普通のナビゲーションでは十分に誘導できないシチュエーションにおいても有効にナビゲーションを行うことが出来る。たとえば、普通のナビゲーションだと“直線”と表現される道でも実際には緩やかにカーブしている場合があるが、これでは視覚に不自由のある人にとって、信頼して使えるナビゲーションには成り得ない。また、左右などの記号的な方向でのナビゲーションでは、アミューズメントパークなど広場状で道のない場所では誘導できない、あるいは著しく不自然な誘導により混乱をおこしてしまう。このようなシーンにおいて、自由曲線を誘導できる機構を用いる事で正確にカーブをナビゲーション出来る性能は特に利点がある。機微の表現ができるため視覚に不自由がある人においても使えるポテンシャルをもち、左右を示すなんの取っ掛かりもない場所であっても、自由曲線を描くことにより自然な経路を案内することができるのである。

4.2. コントローラー型デバイスのプロトタイピング

4.2.1 1st プロトタイプの実装

前項で示したデバイスの設計をもとに、まずはつまみ可変抵抗を用いた角度調整コントローラタイプのデバイスを作成し、手動でユーザをナビゲーションすることを試みた。ファーストプロトタイプの構成を図(図4.4)に示す。

サーボモータ (GWS/PICO/STD/F) とつまみ可変抵抗を電気系統を制御するためオープンソースハードウェア Arduino につなぎ、また電気供給のため eneloop を用いる事で様々な環境で実験できるようモバイル化を行った。プラットフォームとしてスマートフォンを用いる前提のもと、携帯性と装着の簡易性を実現するためにケース型の実装を選択し、iPhone ケース型のプロトタイプデバイス (図4.5) を実装した。このデバイスを、手すりを持つような姿勢でデバイスを実際に装着したところ、とても自然な感覚として曲がるべき方向を示すことができた。

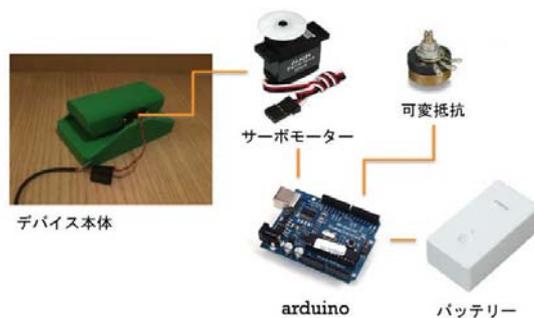


図 4.4 プロトタイプ構成図



図 4.5 1st プロトタイプ



図 4.6 装着した様子およびデバイス動き

4.2.2 実験

このプロトタイプを用いて実験を行い、カーブ間の提示による誘導の有効性を検証した。被験者は目隠しをした状態で右手にデバイスを持ち、提示された感覚のみを頼りに、直径 4m50cm の曲がりくねったルート（図 4.7）を歩行する。

この際、被験者にルートの形状を知られないよう、目隠しをしてスタート地点まで手を取り誘導した。デバイスは後方からリモコンで操作する。1人5回ルートを辿り、9人で合計45試行を行った。結果、ルートを正しくたどれたのは28回、最初のカーブだけ成功し、後は失敗したのが10回、たどれなかったのが8回と、6割強の成功率となった（図 4.9）。また、成功率の高い被験者で最小回転半径を測ったところ、40cm程度で回る事ができた。

また、この実験のフィードバックとして以下のような感想が得られた。

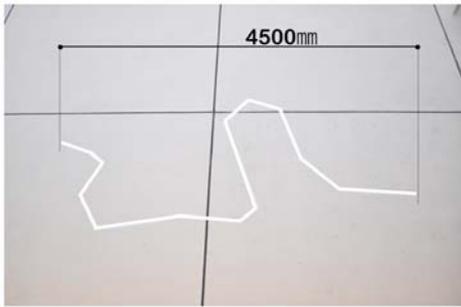


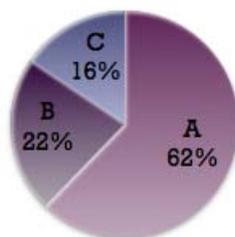
図 4.7 実験ルート



図 4.8 実験の様子

- 思ったよりも手すりっぽいと感じられた
- 強制されているような不快感はない
- 右折は分かりやすいが、左折は分かりにくい
- 曲がり続ければいいのか、曲がったら直進すればいいのか少し迷った

この結果をもとに失敗要因の抽出を行い、今後の改良の参考とした。実験結果は個人差が大きく影響しているが、共通する原因として以下のことが考えられる。左折に失敗した場合の失敗要因は、右手にデバイスをもっているため左折する際、小指側の手のひらへの触覚提示が弱い、あるいは親指にかかる圧力がカーブの感覚を得る上で必要であり、その提示ができていないことが原因であると考えた。左折、右折共に失敗した場合の失敗要因は、手のひらは指先などの他の部位にくらべ手の感覚が鈍いため、十分な圧力提示ができていないことが考えられる。他



9人×5回=45試行

A	ルートを正しくたどれた	28
B	最初のカーブだけ成功、あとは失敗	10
C	たどれなかった	7

図 4.9 実験結果

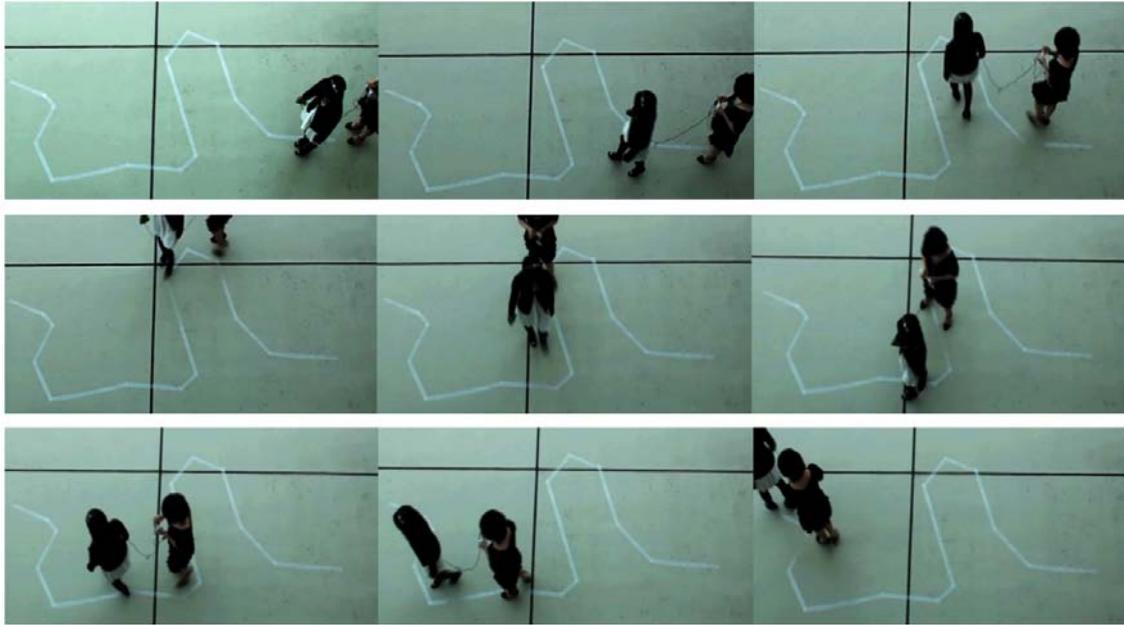


図 4.10 歩行経過

の原因としては、曲がる指示が出た後、直進の指示に戻すまで曲がり続ける人と、一瞬曲がった後すぐに直進しようとする人の2パターンがあることから、後者の場合はデバイスによる触覚提示が「手すりの感覚」ではなく記号的な左右の指示として感じられた可能性が考えられる。このことから、より手すりのさわり心地に近く、手にフィットする圧力がかかりやすい形状に改良する必要があることがわかった。

4.2.3 2nd プロトタイプ

ファーストプロトタイプの実験で得た考察を参考に、以下のポイントを重視しデバイスの改良を行った。

1. 手にフィットする形状の模索
2. 無線化

3. 小型化

親指サイドにも触覚が提示され、かつ手にフィットする形状に改良するため、一度スマートフォンと切り離してより手すりに近い棒状の形状にし、グリップしやすいようになだらかにくびれのような曲線を取り入れた。この事により、手にフィットする感覚は格段に向上した。また、前作では有線で行なっていたつまみ方可変抵抗器による角度調整コントローラー間の通信を無線化することに挑戦した。Zigbee規格の無線通信の実装にあたり、Digi International社のXBee PRO v1.0を使用、Arduinoの中でも最も小さいFioを用い、電気供給はeneloopからリチウムイオンバッテリーSFE-PRT-00341/860mAhに変更することで、部品をデバイス内に内蔵させられるように設計した。しかし、実際に実装してみたところ、内蔵すると無線が不安定になってしまった為、結局外側に出すこととなった。

このプロトタイプを用いて周りの景色が見られる状態においてナビゲーションをされた場合と、目隠しの状態でスロープを誘導するという、2種類の実験を行い、デバイスの使用感を確かめた。まず、景色が見られる状態での実験は、行き先は伝えず建物外から建物に入り、ある部屋の中の椅子まで誘導するという実験を行った。この際、エレベーターでの階数指定や鍵の解除を除き、対人コミュニケーションなく目的地にたどり着くことができた。次に、目隠しをした状態で幅約2メートルのスロープを誘導した。目隠しで街中をあるく事に慣れていないこともあり、歩行速度がゆっくりではあったが、壁にぶつかることなく4つのコーナーを曲がりきることに成功した。



図 4.11 2nd プロトタイプ

4.2.4 仮現運動の検討

続いて、手すりを滑る感覚を強化するため、仮現運動を用いた触覚提示を試みた。触覚の仮現運動とは皮膚上に複数個並べた振動子がある特定の時間差で振動させることで、実際には振動子は移動していないにも関わらず、まるで振動子が移動しているような感覚を得る現象である [32]。まずは、最も良い触覚を提示できる周波数を既存研究から参考にし [33]、250Hz の矩形波を出力する方法として、Arduino の pwm ピンとボイスコイル (型番) を用いて試作した。電圧の調整で周波数をコントロールし、ディレイで提示時間を調節している。しかし、手のひらは鈍感な箇所のため、振動が弱く感じてしまい、仮現運動はおこななかった。そのため、音に関わるのプログラム制御に強みのある Max/MSP を用いて 250Hz の正弦波をアンプを通して出力したところ、仮現運動らしい触覚の提示に成功した。しかし、ピンポイントな振動が手のひらを流れていく感覚は、手すりの面を滑る感覚よりも鋭く、手すりのつなぎ目の部分など、凹凸面をを通過するときの感触のように感じられた。それでも手をふるタイミングと合わせて提示する場合には手すりらしさを感じられるのだが、重たくなる事からサーボモーターの出力が弱まり、カーブ感覚の触覚の劣化がみられた。この解決のため、サーボモーターをより強力なもの (GWSMICRO/2BBMG/J) に変更した。これによって、カーブ感覚の劣化は改善された。

しかし、このデバイスをイスタンブールのカンファレンス World Haptics で展示を行った所、仮現運動に対しては良いコメントは得られなかった。原因としては、デバイスが重くなりシンプルさがなくなったことやノイズ音が増えたことなど、効果に対してデメリットが大きい事があげられる。そのため、シンプルな方法で触覚提示する方法を検討した。仮現運動を用いると、少しわざとらしい程に方向性を感じるが、手すりに沿って手を滑らせている時、実際にはそれほど方向性は感じていない。むしろ、素材のテクスチャーを感じる程度である。そこでもっと単純に、バイブレーションによって手のひら全体に振動を与え、タイミングに合わせるシンプルな実装に変更することとした。

また、開発時に周囲にデバイスを試してもらう中で、カーブ感の触覚がファーストプロトタイプよりやや劣化しているという意見があり、当初は振動子の重さ

によりサーボモーターの強さが足りずに劣化が起きていると考えていたが、実際にはそれだけではなく、ベース部分と手のひら側のパーツが手に触れる面積のバランスが崩れている事が原因であった。World Haptics で展示を行った際に得たフィードバックのうち、「手のひら側のパーツだけが動いているように感じる点が興味深い」という感想により、カーブ感の劣化の原因が形状にある可能性が浮かび上がった。方向提示の為には手のひら側のパーツだけが動いているように感じさせなければならないが、実際にはベースとなる部分にも力が働いている。ベースとなる部分を指で固定する力が、常に手のひらに加わる圧力よりも大きくなければ、提示したい方向の反対側にも指示を感じノイズとなってしまうので注意が必要である。このプロトタイプの形状だと、親指サイドにもナビする方向への触覚提示が行われる一方、ベース部分を固定する力がかかりにくい形状のため、ノイズが混じっていたのだ。人間の手は、物を指先でつかみやすいよう末端の指骨の形状がU型に丸くなっているため [12]、指先がベース部分にしっかりと力を加えられるように設計する事でこの問題を回避できた。

この他にも、棒状のデバイスだとスマートフォンと接続するビジョンは説明がなくてはわからないという感想がみられた。

4.2.5 ファイナルプロトタイプ

前プロトタイプで得た反省から、ファーストプロトタイプに立ち返り、スマートフォンケース型デバイスを洗練させていく方向にシフトした。デバイスの改良は、形状と部品の2つのアプローチから行った。ファーストプロトタイプでは小ささ、軽さ、手軽さを重視し、GWS/PICO/STD/FあるいはGWSMICRO/2BBMG/Jなどのアナログサーボモーターを使用していたが、より強力かつ、故障の少ないサーボモーターを採用するため、サイズ、トルクの強さ、メタルギアによる耐久性などから ROS-3101HV ICS (近藤科学) を使用した。このサーボモーターはこれまで使っていた Arduino では制御出来ないため、マイコンボードも同メーカーの KCB-1 に変更した。また、セカンドプロトタイプ以降、無線化に挑戦していたが、スマートフォンと直接接触するケース型デバイスの場合、最終的にも無線が必要ないため有線接続に戻した。続いて、形状については、セカンドプロトタイプか



図 4.12 改良過程のプロトタイプ例1 図 4.13 改良過程のプロトタイプ例2

ら学んだ曲線の利点をケース型に応用し、全体に丸みのある持ちやすい形状にモデリングした。また、これまでのプロトタイプはベースと手のひらに触れるパーツの間に不恰好な隙間が開いていたが、デザインを工夫することにより隙間のない一体感のあるデザインに改良することで、より手のひら側のパーツが安定して固定された。手へのフィット感や触覚の質は実際に試作して触れてみなければわからないため、何度もプロトタイプをマイナーチェンジし(図4.12,4.13)、最終的に(図4.14)の形状に至った。デバイスの形状において重要なポイントは、角度提示のパーツが土台よりもわずかに高い位置にあること、ベースが角度提示を邪魔しないよう、山形になっていること、触覚提示パーツ下の空間を十分にあげ、左右それぞれ60°程度は角度をつけられるようにすることなどである。また、コントローラーについても直感的に操作できるデザインを目指し、握みの部分を人形にするなどの工夫を行った。完成したデバイスは、触覚の質・頑丈さ・安定性など多くの面で改善され、より自然に曲がりたくなる感覚を促せるようになった。

4.3. 本章のまとめ

本章では手すりを伝う感覚がどのような要素から成り立つかを考察し、特にカーブ感に着目して手すりを伝う圧力分布を再現する機構を設計、コントローラー制御型のデバイスを開発し、実験や展示におけるフィードバックから得られた考察をもとに改良を繰り返した経過を述べた。セカンドプロトタイプの形状や仮現運動の実装については、触覚の劣化やシンプルさの喪失など難点がありうまくいか



図 4.14 ファイナルプロトタイプ



図 4.15 手に持った状態

なかったが，そこから得た反省をもとに，ファイナルプロトタイプではに触覚の質・頑丈さ・安定性など多くの面で優れたデバイスを開発する事に成功した。

第5章

位置情報に基づく自動ナビゲーション

5.1. MotionCaptureによる自動化

コントローラー型デバイスの改良に伴い、次のステップとして位置情報に基づく自動ナビゲーションの実装を決定した。実世界上で歩行ナビゲーションを行うためには、ユーザの現在地を取得するため、GPS(Global Positioning System)を用い、経路情報と現在地を比較し、デバイスの制御を行う。しかし、現状のGPSやAGPS(Assisted-GPS)の精度は本デバイスを使用する上では十分ではない。キネマティックGPSやGPS/GLONASS(Global Navigation Satellite System)など、高精度GPSは研究されているが現状ではGPSシステム単体で非常に重い場合や、特定場所にGPS衛星電波を受信する受信ポストを所定位置に複数個設置しなければいけないため、歩行誘導に適さない。そこで、光学式モーションキャプチャーを使ってプロトタイプシステムを実装。OptTrack(Natural Point社)を用いて位置情報に基づく自動ナビゲーションのプロトタイプを開発した。

図5.1にシステムの構成を示す。モーションキャプチャーカメラにより位置情報を取得し、PCに送る。その情報を元にデバイスの制御を行う。

構築したシステムにおけるデバイス制御の流れは次のとおりである。ユーザーが手に持ったiPhoneの専用アプリを立ち上げ、ルートを入力し手すりを持つような姿勢をとると、iPhoneの加速度センサがiPhoneの傾きを感知し、ナビゲーションがスタートする。この際、iPhoneからPCにルートが送られ、目的

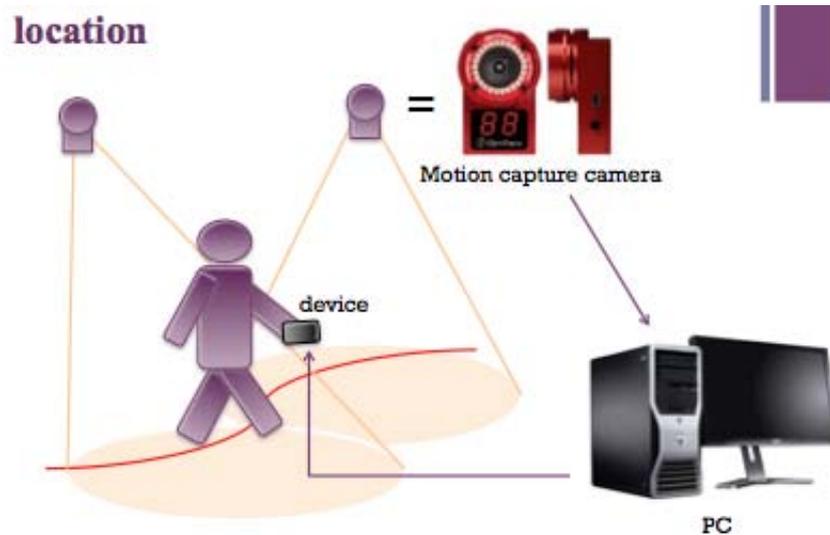


図 5.1 システム構成

地に対応して空間上にバーチャルな手すりを設定する。

以後，ユーザーがゴールに到着するまで，Optitrack は毎秒 100 回位置情報を更新し，以下の制御をループしつづける。

現在位置 P_d ・ユーザーの姿勢（上から見た平面における x 軸に対するデバイスの向き） θ_d 情報を取得する。

デバイスの位置： $P_d = (x_d, y_d)$

ユーザーの姿勢： θ_d

現在位置をもとに最も近いルート上の点（最近点） P_g を探索する。

最近点： $P_g = (x_g, y_g)$

最近点での接線の傾き： θ_g

以下の式において、 d_i が最小になる点が最近点である。 i : i 番目の点

$$d_i = \sqrt{(x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2} \quad (5.1)$$

現在地と最近点がとれたら、デバイスに提示する角度を決定するため、ルートから離れた場合の修正を考慮し、角度成分と距離成分の2つを組み合わせて用いる。デバイスが提示する最大角は左右共に 60° である。この際、現在地とルートの最近点の距離に応じて提示する成分の優先度を変える必要がある。例えば、ルートから大きく外れている時に角度成分が強くなってしまうと、ルートに戻る力が強く働かないだけでなく、場合によっては戻るべき方向と逆の方向に誘導してしまうシチュエーションもでてきてしまう。そこで、現在地とルートの最近点の距離が近いほど角度成分の割合が高まり、離れているほど距離成分の割合が高まるようにする。

角度成分はユーザーの向きとルートの向きを合わせる成分であり、最近点の接戦の向きである。 d : 距離 (m), θ_{angle} : 角度成分が提示する角度

$$\theta_{angle} = \theta_g - \theta_d \quad (5.2)$$

$$\theta_{angle} = \begin{cases} \theta_{angle}(1.0 - \frac{1}{0.6}d)(d < 0.6) \\ 0(d > 0.6) \end{cases} \quad (5.3)$$

距離成分はユーザーの向きを最近点方向に向ける成分で、現在地がルートの右側か左側かを判別し、60cm ずれた時にデバイスが最大角を提示するようにした。

$\theta_{distance}$: 位置成分が提示する角度

$$\theta_{distance} = \begin{cases} \begin{array}{l} \text{ルート上より右側にいる時} \\ 60^\circ \cdot \frac{1}{0.6}d \quad (d < 0.6) \\ 60^\circ \quad (d > 0.6) \end{array} \\ \begin{array}{l} \text{ルート上より左側にいる時} \\ -60^\circ \cdot \frac{1}{0.6}d \quad (d < 0.6) \\ -60^\circ \quad (d > 0.6) \end{array} \end{cases} \quad (5.4)$$

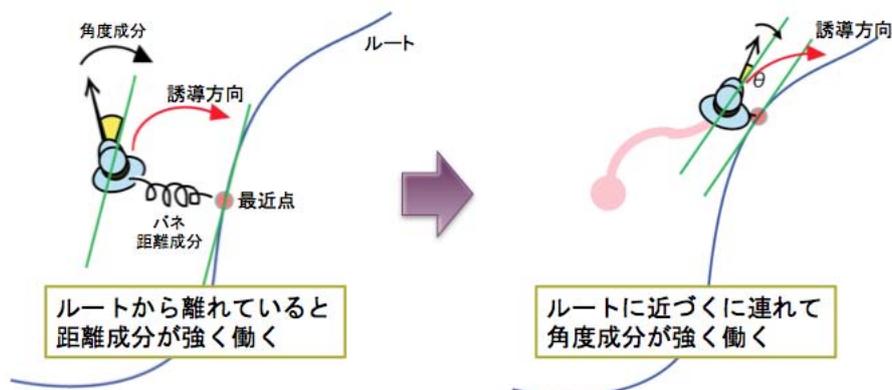


図 5.2 制御方法の概要

この2つの成分を足しあわせる。

$\theta_{display}$: デバイスで提示する角度

$$\theta_{display} = k_{angle} \cdot \theta_{angle} + k_{distance} \cdot \theta_{distance} \quad (5.5)$$

ここまでを目的地に到着するまでループしつづけることで、位置情報に応じた角度提示を行なっている。今回のプロトタイプでは角度成分に 1.2 (k_{angle}), 位置成分に 0.7 ($k_{distance}$) をかけて、やや角度成分を強く出力した。到着時はユーザーに音で知らせた上でナビゲーションを終了する。

5.2. SIGGRAPH における実証実験

5.2.1 実験の目的

前項で構築したシステムとデバイスのファイナルプロトタイプを実際に多くの人に体験してもらい、フィードバックを得て有効性の検証を行う目的のもと、世界最大のインタラクティブ技術の国際会議 SIGGRAPH2011 の Emerging Technologies

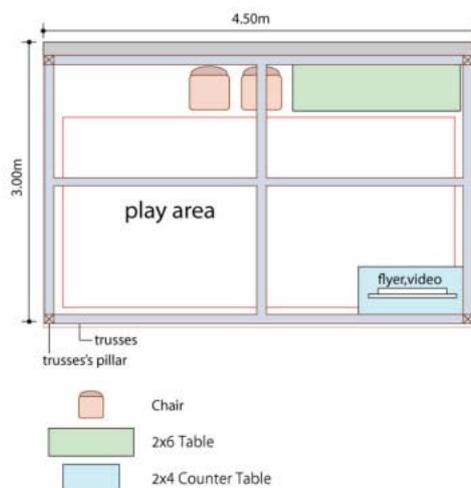


図 5.3 フロアプラン

にて展示を行った。ユーザーが視線を開放して都市を歩くことができる触覚ナビゲーションを実現するには、視覚に頼らずに正確に歩行できる事が要であり、安心してナビゲーションシステムを使用するためにも十分な精度をもつ必要がある。道幅や経路の複雑さなど、ナビゲーションにおいて求められる精度はさまざまだが、前項で述べた距離成分の割合を弱める事で精度を緩めることは可能であるため、視覚を遮断した状態での限界精度を明らかにする事を目的とした。

5.2.2 展示構成と体験の流れ

フロアプランを図 5.3 に示す。展示ブースでは、幅 4 m 50 c m，奥行き 3 m のスペースに高さ 3 m のトラスを組み、15 台の MotionCaptureCamera を設置した。フロアの左側をスタート地点とし、反対側のゴールとなる地点にはニューヨーク、京都、パリ（以下、順に目的地 1，目的地 2，目的地 3 と示す）の 3 都市を象徴するバナーを設置した。ゴール際正面には体験後にユーザーが歩いた軌跡を確認するためのスクリーンを配置した。

また、システムの構成は以下の通りである。

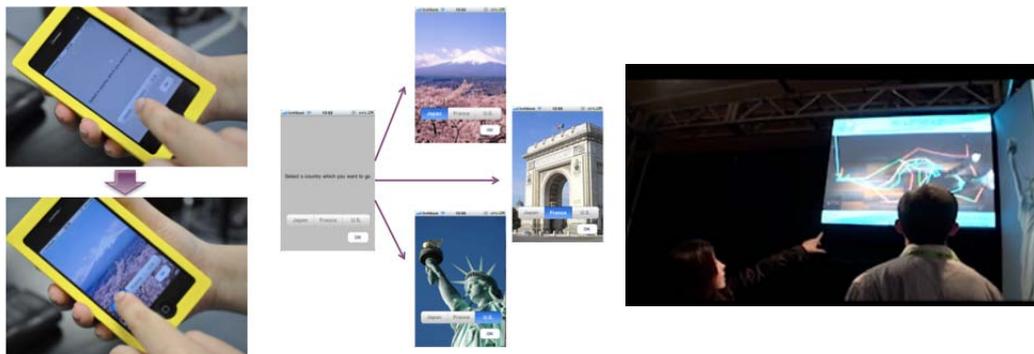


図 5.5 軌跡のプロジェクター表示

図 5.4 iPhone アプリケーション

1. インストラクション用のコントローラー型デバイス
2. iPhone 上で3種類の目的地から選択するアプリケーション (図 5.4)
3. モーションキャプチャトラックを用いた位置情報に基づく自動ナビゲーション.
4. 体験後、ユーザーが軌跡を確認するためのプロジェクターによる表示 (図 5.5)

続いて体験の流れだが、まずブース際のフリースペースでコントローラ型デバイスを用いて簡単なコンセプト説明と使用方法のインストラクションを行う。その後ブース内にて自動ナビゲーション用のデバイスを渡し、体験に入る。この展示においては3種類の好きな都市へユーザーを導くというテーマで行ったため、iPhone アプリケーションにおいても3つの都市画像から好きなものを選ぶという簡易な入力によってルートを決定できるようにした。選択後、手すりを持つような姿勢をとると、デバイスが手すりにジョイントするような金属音と共に「Close your eyes. Let's start!」という音声の流れ、ナビゲーションがスタートする。この際、ユーザーは目を閉じることで視覚を封じ、完全にデバイスの指示に従って曲がりくねったルートをたどる。ゴールに到着すると音によって到着を知らせて体験は終了となり、最後にたどった軌跡をスクリーンで確認しながら感想を尋ねた。1人1回ルートを辿り、5日間の展示の中で合計591人が体験した。



図 5.6 展示ブースの様子



図 5.7 ルートと目的地

5.2.3 データ分析

実験条件を一定にするため、分析は特定の日付（2011/8/10）のデータを使用し、ルート1：30人分、ルート2：50人分、ルート3：49人分行った。体験者が京都（ルート2）とパリ（ルート3）を好む傾向があったので人数にばらつきがあった。各ルートの平均誤差と標準偏差を分析、さらに全体の平均誤差と標準偏差を算出したものを表に示す。（単位：cm）MotionCaptureによって取得したユーザー座標と、最近点との距離の平均値を出した。元データはパソコン上の座標のためピクセルを用いているため、元となるルート画像の幅と展示ブースの幅の比から値を算出し、第2小数点以下四捨五入した。全体平均誤差が13.5cmであり、どのルートにおいても平均誤差15cm以内に収まる精度で複雑な曲線をナビゲーションできた事が確認できた。

表 5.1 平均誤差と標準偏差（単位 cm）

ルート1 (30名分)		ルート2 (50名分)		ルート3 (49名分)	
平均誤差	標準偏差	平均誤差	標準偏差	平均誤差	標準偏差
13.5	11.6	12.3	12.0	14.6	13.9

全体平均誤差	全体標準偏差
13.5	12.5

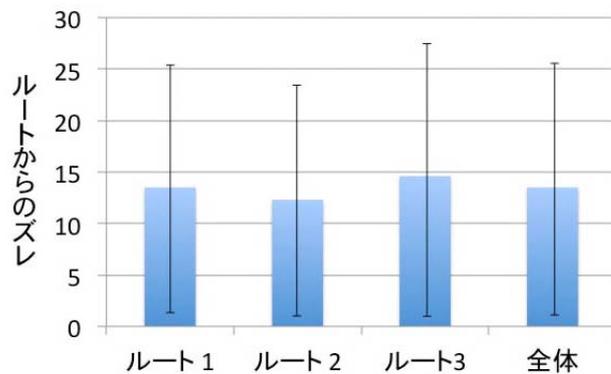


図 5.8 平均誤差と標準偏差グラフ (単位 cm)

5.2.4 体験の様子

ユーザーは目を閉じての歩行自体に慣れていないことから、比較的ゆっくりとしたスピードで歩行する事が多かった。ルートから離れた際の修正をシビアに設定したこともあり、カーブに従い細目に方向転換を行ないながら歩行している事が見て取れた。目的地2に向かうルートに関しては、最もきついカーブでは半径30センチほどで曲がらねばならず、一部のユーザーはカーブ途中で曲がりきれなかったと判定されルートをショートカットしたが、他のルートでは概ねの被験者が複雑な自由曲線をデバイスによってたどる事ができた。ルートにぴったり沿って歩けた人、曲がる位置は一致しているもののラインは少しずれている人、カーブの指示が出てから反応が出るのにワンテンポ遅れる人など、精度には個人差が出たものの、各ゴールの間隔は1m弱と狭かったが概ね正しい目的地に到着している。体験後は非常に楽しそうに自発的に感想や改良案を話す人が多く、後ほど友人を連れてくる様子が多く見られた。正確に歩行できるユーザーが体験しているときはより観客が集まり、体験の順番待ちがみられ、コンテンツとして楽しんでいる様子が伺えた。また、順番待ちをしている観客が体験を終了したユーザーに正確に歩いていた旨を伝えるなど、ユーザー間のコミュニケーションも生まれていた。体験にゲーム性を感じるユーザーが多いようで、複数でブースを訪れた体験者が結果を競う様子もみられた。



図 5.9 体験者が歩いた軌跡の例：ルート1（ピンクライン）

5.2.5 体験者の感想

ユーザーの感想は、まずは「面白い」「楽しかった」など、展示としての楽しさを評価した上で、デバイス自体に対する意見を言う事が多く、「実社会で使うイメージができた。実用化を期待したい」「事業化や技術の売却は検討していないのか」「商品化はいつか」など、実用化を要望する感想が多く見られた。SIGGRAPHの Emerging Technologies はユニークな研究が多い半面、ビジネス化が難しいものが多いという認識をもっている人もおり、今年度の展示では最もビジネスチャンスがあるという評価が複数あった。実際、障がい者用の建材メーカーが共同研究の機会があれば建材を提供するという申し出と共に名刺を置いていった他、ボストン美術館、技術買取企業など、複数の企業人に声をかけていただくなどの反響があった。また、「将来的に更に小型化はできるのか」「ケース型と製品に組み込むのではどちらがいいか」「製品化に向けての一番の障害は何か」など、製品化に向けたアップグレードをどのように考えているかといった質問も多く見られ

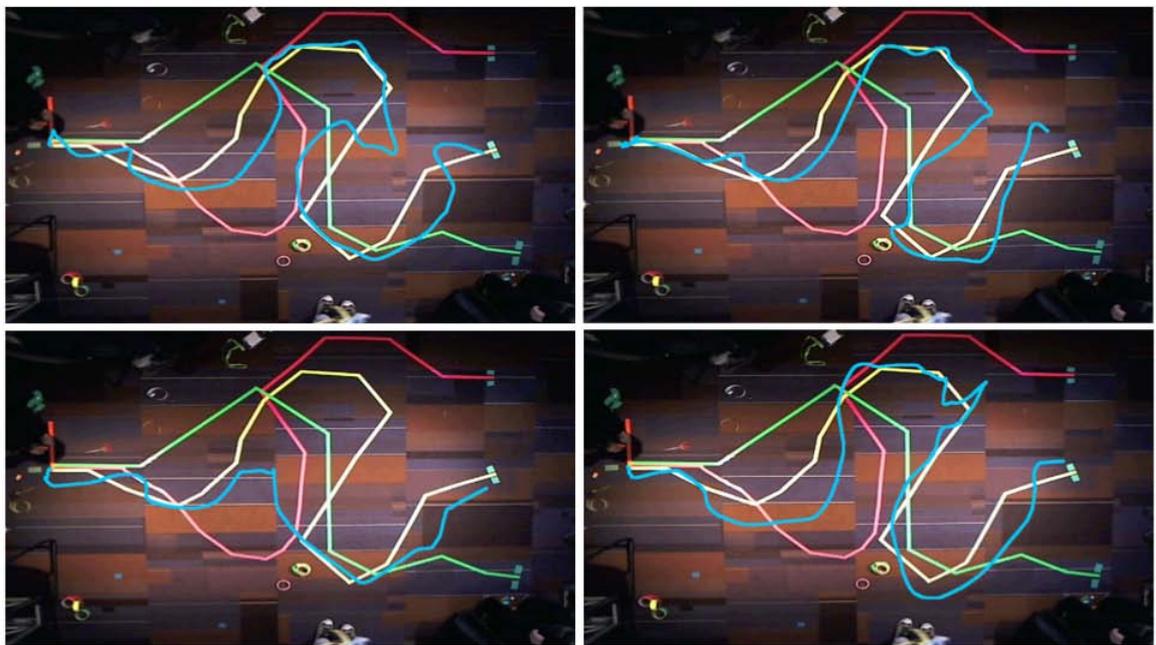


図 5.10 体験者が歩いた軌跡の例：ルート 2（イエローライン）

た。ビジネスや改良に対する意見は先端技術に詳しく、毎年 SIGGRAPH の展示をチェックにきているような人、あるいは、体験者自身もエキシビジョンなどの発表者である事が多かった。また、一般の体験者と思われる人においては、「次はもっと正確に歩けると思う」「もう一度挑戦したい」「この展示では1回しか歩かないが、何度か使えば正確に歩けると感じる」など、習熟により精度上昇する旨と共に、もう一度チャレンジしたいというコメントが多く見られた。小型化に関しては、構造がシンプルであるため、サーボモーターをより小型のものに変更する他、メーカーではなく大学の研究室の中で開発をすすめるにあたり、既存のプラットフォームを使用する現在のあり方を選択したが、ケース型ではなく製品に組み込むタイプにする等工夫次第で十分可能と考える。製品化に向けての障害についても、GPS などの技術的な問題に加え、サービスとして成立させるには流通の確保や世界中の地図に対応したルート作成、ユーザ対応など、多くのタスクや課題が存在すると考えている。この点で言えば、美術館やショッピングモールなどの施設内でセンサ環境を整えて行う方が実現性は高いだろう。

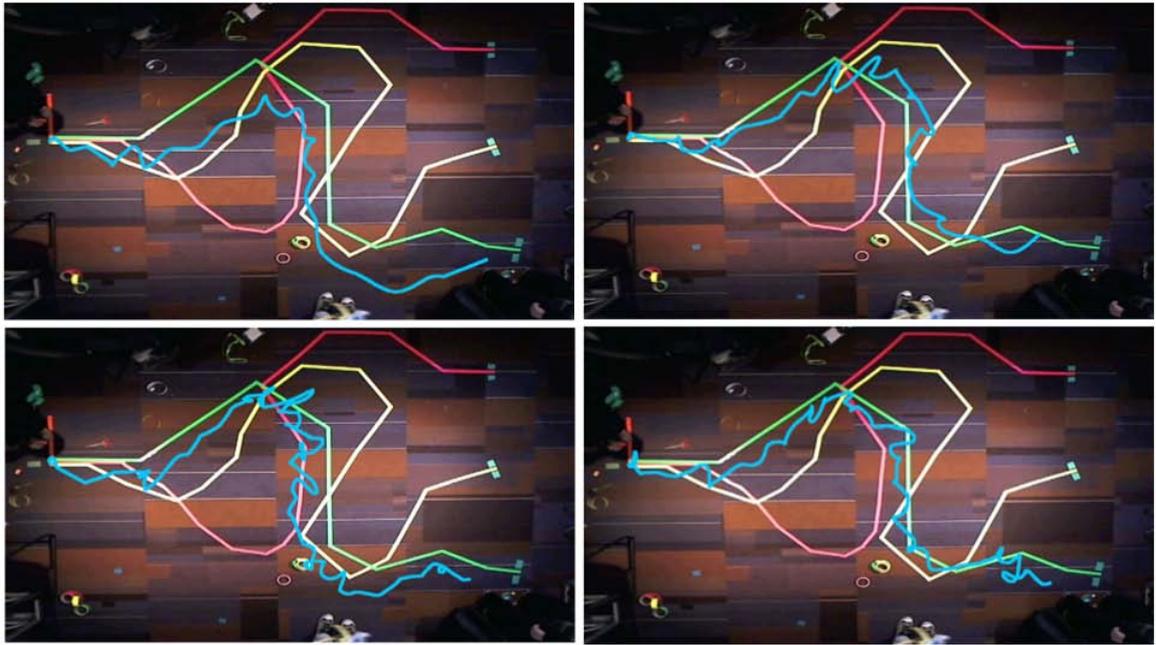


図 5.11 体験者が歩いた軌跡の例：ルート 3（グリーンライン）

5.3. 本章のまとめ

本章では MotionCapture を用いて位置情報に基づくナビゲーションのプロトタイプを開発し、構築したシステムの処理の流れを示した上で、このシステムの実証実験として SIGGRAPH2011 Emerging Technologies にて展示を行った経過と結果について述べた。視覚を遮断した状態での限界精度を明らかにする事を目的として、目を閉じて曲がりくねったルートをデバイスの指示のみを頼りに歩く展示を行い体験データを記録した所、全体の平均誤差が 13.5cm と良好な結果を得られた。この事から、ナビゲーションを行う上で十分な精度をもつ事を証明すると共に、ユーザーのフィードバックからただ道を示すだけのナビゲーションにはない楽しさを感じてもらえたことが確認できた。



图 5.12 体验风景

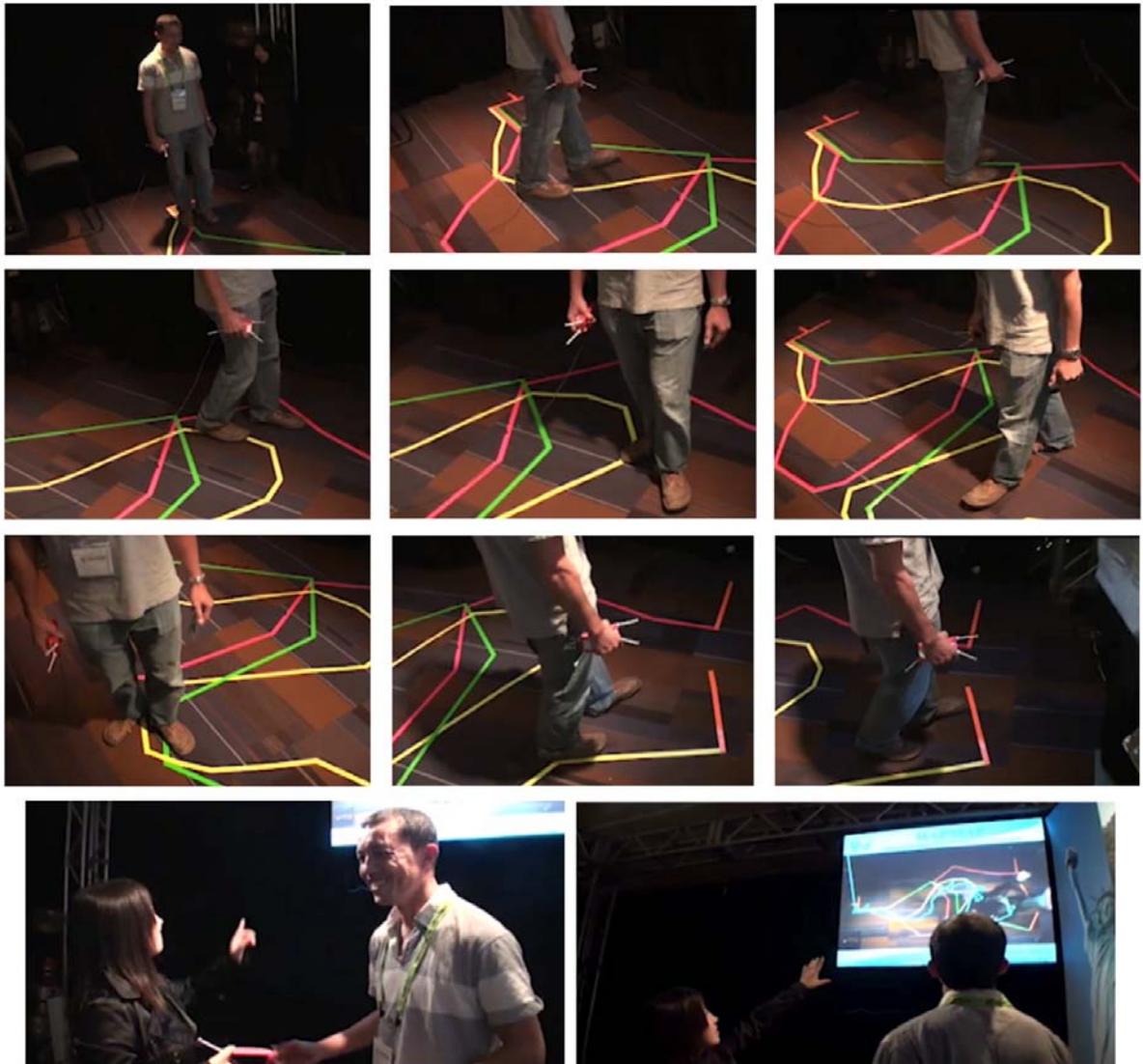


図 5.13 あるユーザーの体験の流れ

第6章

フィールドテスト

6.1. 実験の目的

前項ではナビゲーションの精度評価を行い、十分な精度でナビゲーション出来る事が確認できたが、本研究は従来の視覚に頼ったナビゲーションが都市経験を損なわせているという問題の解決を目標としている。そのため、コンセプトの有効性を評価するには都市経験がどのように変化するかを検証する必要がある。このことから、フィールドテストでは実際に都市でデバイスを用い、人の感覚・感性に重きをおいて、アンケートによるユーザーフィードバックと、使用に伴う言動の変化の観測を行った。

6.2. 実験条件

実験場所は横浜駅周辺とし、図6.1の経路を1から2にかけてiPhoneのGoogleMaps, 2から3にかけてコントローラー型HAPMAPデバイス(図4.14に示したもの)を使用した。この間、ビデオにて撮影を行う。

被験者は3名で、全員デバイスの試用経験はない。横浜訪問回数や携帯MAPの利用頻度、街歩きの得手不得手など、実験に関わる被験者データを表に示す(表6.1)。

評価は5段階評価のアンケート、被験者の自由感想、ビデオデータによる観察記録を用いて行った。

まず、被験者は目的地となる地点2の住所をGoogleMapsに入力し、ナビに従って地点1をスタートする。この際、被験者は全ルート上で気になったものを撮影



図 6.1 実験経路

するよう指示しておく。(並行作業1) 図6.1の赤い線で囲まれている場所は“会話エリア”となっており、この場所では目的地に到着するまで会話しながら歩いてもらう。(並行作業2) 地点2に到着したらHAPMAPに持ち替え、地点3に向けてナビゲーションする。この際、被験者が来た時の記憶に頼って歩かないよう、目的地の地図情報は知らせず、「スタート地点に戻るわけではない」とだけ伝えた。HAPMAP使用時にも、全ルート上で気になるものの撮影や会話エリアでの会話を行いながら目的地に向かう。また、HAPMAPを用いるルートには五叉路がある道を設定し、角度違いの道を判別可能かをチェックした。地点3に到着した所で、アンケートを実施する。実験中、並行作業を実施する理由は、1つは写真撮影によって都市への注意力の変化をみること、もう1つはナビゲーションの負荷レベルの差を観測できるシチュエーションをつくる事である。ナビゲーション

表 6.1 被験者データ

	横浜訪問回数	Map機能の利用	地図で街歩き
Kさん	1回	初めて使用	特に問題ない
Tさん	1回	たまに使用	苦手
Hさん	1回	常用	得意

ンの負荷が高いほど、意識も視線ももう一つの作業に費やすことが難しくなるため、行動としてダイレクトにあらわれやすく、被験者自身、制約感の自覚もしやすいと考えた。

6.3. 実験結果

6.3.1 アンケート結果

5段階評価アンケートの結果を表 6.2 に示す。また、自由感想では以下のようなコメントが得られた。

- 感覚的に素直に動けたのに驚いた。普段気づかない店とかが見えた気がした【Kさん】
- 携帯MAPだと自分の位置把握が出来ず迷った。HAPMAP楽しかった。一度、HAPMAPが元の位置に戻すのを曲がるのと一瞬勘違いした時があった。【Tさん】
- 楽しかった。左手でHAPMAPを持っていたらもっとナビ以外の作業ができたかも。慣れたら平気だが、最初のうちはHAPMAPにも気を使った。【Hさん】

5段階アンケートにおいては、概ねHAPMAPを使用する効果として想定していた結果が得られた。「簡単に目的地に辿りつけた」という項目では、地図による街歩きを得意とするHさん以外はHAPMAPの方が簡単と評価し、「辿り着くまでの過程を楽しむことができた」「ナビ確認以外の作業を容易に行える」の項目で

表 6.2 5段階評価アンケート結果

評価項目	Kさん		Tさん		Hさん	
	携帯MAP	HAPMAP	携帯MAP	HAPMAP	携帯MAP	HAPMAP
簡単に目的地に辿りつけた	2	4	1	4	5	5
周りの風景や状況を把握できた	3	3	4	3	2	5
辿り着くまでの過程を楽しむことができた	2	4	2	5	1	4
ナビ確認以外の作業(会話・写メ)を容易に行える	2	3	2	5	1	3

は、全被験者が HAPMAP に高評価をつけた。ただし、周囲の情報把握においては、HAPMAP は目に見える風景の把握には適しているが、携帯 Map のように街を俯瞰する視点が得られないことから、人によって評価が異なる結果となった。自由感想においては、共通して楽しいという感想が得られた。都市を歩いている間にもこういったワードは多くみられ、その際は、思ったよりも自然に曲ってしまうなど、予想よりも不思議な感覚だという旨と共に発せられていた。このようなデバイスの使用感を楽しむ感想は展示会場でも多くみられたが、「普段気づかない店がみえた」「携帯 Map だと自分の位置把握ができずに迷う (HAPMAP は違う)」などは都市での実験ならではの感想である。また、「HAPMAP が元の位置に戻すのを曲がるのと一瞬勘違いした時があった」や「最初のうちは HAPMAP にも気を使った」などの意見については、コントローラ型デバイスを用いたことによる操作の不手際や、デバイス使用経験が全くない状態で実験が行われた事が原因だが、被験者は1度も曲がり角を間違えることなくルートをたどれていること、体験を始めて数分の間にデバイスの使用に慣れることができたことなどから、改善の必要性は薄いものと考えている。

6.3.2 観察記録

実験中に撮影したビデオと被験者のカメラデータを使用し、被験者の歩行速度 (表 6.3)、実験中の撮影頻度 (図 6.2)、歩行時の様子を分析した。

表 6.3 被験者の歩行速度

	距離		Kさん	Tさん	Hさん
行き iPhone map	300m	歩行時間	7分57秒	10分43秒	4分9秒
		分速	37.73m	27.99m	72.29m
帰り HAPMAP	460m	歩行時間	7分15秒	7分37秒	6分46秒
		分速	63.25m	60.44m	67.95m

実験中、顕著にみられた行動として、GoogleMaps を使用した際には、以下のようない行動が目立った。

- スタート時歩き出す方向の決定でかなり迷い、路上の地図と照らしあわせていた。(Tさん)
- 曲がり角で立ち止まり、ランドマーク確認。Hさん以外は時間をかけて検討した。
- 会話の際、地図をみたまま対応、会話に意識が向いたためしばらく迷うなどの反応がみられた。

それに対し、HAPMAP を使用した際には

- スタート時、すぐに歩く方向を決定する事ができた。
- すべての曲がり角を止まることなく正しいルートへ誘導された。
- 会話スタート地点より前から、被験者側から話しかける、顔を見てジェスチャーをしながら話すなどの会話が促進された。

など、GoogleMaps を使用した時に比べ、スムーズな歩行や会話の促進が確認できた。これは歩行速度の結果にもあらわれている。地図による街歩きがもともと得意なHさんを除き、Kさん・Tさん共に歩行速度が分速にして約2倍になっている。2人ともGoogleMaps 使用時は曲がり角など道中において頻繁に立ち止

Hさんの写メ結果



図 6.2 写真記録の結果例

まっていたが、HAPMAPを使用した際には立ち止まることなく速やかに目的地にたどり着くことができた。Hさんにおいては、歩行速度に関してはHAPMAP使用時の方が遅くなっているが、3人の歩行速度を比較すると、GoogleMapsを使用した際にはバラバラだった分速が、HAPMAPにおいてはすべて分速60m台に収まっている事から、この街を歩く上で適正な速度がこの程度の値であり、都市を楽しむ余裕ができたことから、すこしゆっくりとした歩行になったと推測できる。また、Hさんの写真撮影の枚数差は一枚差でHAPMAPが多いという誤差レベルの差になったが、HAPMAP使用時の撮影は会話開始前に密集しており、密度に差がみられた。会話開始後は屋台などに注目し話題にとりあげていたが、会話に集中していたため写真撮影は行わなかった。また、五叉路においても、角度違いの2つの右折を問題なくナビゲーション可能であり、街中においてもデバイス特性が有効である事を確認できた。

6.3.3 考察

観察記録やアンケートから、目的地に辿り着くための精神的負担の軽減し、会話・過程を楽しむ余裕が向上していると感じられた。「携帯MAPの時は景色を見



図 6.3 GoogleMaps 使用時の様子

ているつもりだったが、考える余裕がなかった。HAPMAP をやってる時に余裕ができて、一度見たことがある景色だと思い出した」(T さん) という感想もあり、同じ「見ている」状態でも、認識の質に違いがでるなど、都市への注意力向上が感じられるコメントを得られた。実際、GoogleMaps を使用した際には、実験時間の 3~6 割は手元を見ているのに対し、HAPMAP 使用時には、「会話相手の顔をよく見る」「ジェスチャーをする」など、会話に集中している様子が見えがえた。

また、これまで、現状の GPS ではデバイスのポテンシャルを活かす事が難しいと考えていたが、実際に都市で使用したところ、現状の GPS でも実装できるのではと思うようになった。道路は物理的に区切られているため、距離成分を出して高い精度を保つ必要が少なく、分かれ道などの要所で角度成分を主に提示することになる。また、間違っただ道に向かった場合、位置の違い以前にユーザーの向きがルートと異なる方向を向くため、ジャイロによって GPS の精度を補えるのではと感じた。更に、5 差路において角度違いの道の判別の必要があり、従来の触覚ナビや音声ナビでは誘導しにくいシチュエーションに挑戦したが、詳細な



図 6.4 HAPMAP 使用時の様子

カーブまで誘導できるデバイス特性により、問題なく誘導することができた。これらの事からデバイスの特性が街中においても有効であると確認できた。

6.4. 本章のまとめ

本章では、実際に都市でデバイスを用いて人の感覚・感性に重きをおいて被験者3名に対しフィールドワークを行い、アンケートによるユーザーフィードバックと、使用に伴う言動の変化の観測を行った。実験場所は横浜駅周辺とし、GoogleMapsとHAPMAPを使用し、都市経験に着目して比較を行った。この際、アンケート結果や歩行速度に顕著な差がみられ、HAPMAPを使用する事により都市経験の向上が確認でき、デバイス特性が実際の都市において有効である事を確認できた。

第7章

結 論

7.1. 本研究の試みと成果

1章では研究の背景として、創造経済において求められる都市の姿やアート分野とテクノロジーが影響し合った歴史を述べ、現代の先端技術との融合によってあらたな空間デザインを行う方法として触覚技術を取りあげた。そして、視覚的ナビゲーションが都市における発見の経験を損なわせているという問題に対し、触覚ナビゲーションシステムを開発することにより、都市における発見の体験を拡張するという本研究の目的を述べた。

2章では都市におけるナビゲーションや触覚技術の事例をあげたうえで、本研究の先行研究にあたる触覚ナビゲーションシステムについてまとめた。

3章では、コンセプトに至った経緯とその妥当性、そして目指すシステム実現の要件と開発の方向性について述べた。これまでのナビゲーションは視覚に依存していることから都市体験を阻害する問題がある。視覚を使わずに使用できるナビゲーションをつくるにあたり、目の怪我によって視覚に不自由があった体験を通して、無意識レベルで視覚の代替えとして手すりの安心感を求めているという気づきをコンセプトにつなげた経過と、そのインターフェースがナビゲーションにおいて有効である根拠を述べた。最後に、目指すシステム実現に必要な要件として、手すりの感覚を提示するデバイス・位置情報を取得できるセンサ環境・アプリケーション化と運営の3つを明らかにした上で、本研究ではデバイスおよび位置情報に基づくデバイス制御に焦点をあてて開発をすすめる方向性を示した。

4章では手すりを伝う感覚がどのような要素から成り立つかを考察し、特にカーブ感に着目して手すりを伝う圧力分布を再現する機構を設計、コントローラー制

御型のデバイスを開発し、実験や展示におけるフィードバックから得られた考察をもとに改良を繰り返した経過を述べた。セカンドプロトタイプの形状や仮現運動の実装については、触覚の劣化やシンプルさの喪失など難点がありうまくいかなかったが、そこから得た反省をもとに、ファイナルプロトタイプでは触覚の質・頑丈さ・安定性など多くの面で優れたデバイスを開発する事に成功した。

5章では MotionCapture を用いて位置情報に基づくナビゲーションのプロトタイプを開発し、構築したシステムの処理の流れを示した上で、このシステムの実証実験として SIGGRAPH2011 Emerging Technologies にて展示を行った経過と結果について述べた。視覚を遮断した状態での限界精度を明らかにする事を目的として、目を閉じて曲がりくねったルートをデバイスの指示のみを頼りに歩く展示を行い体験データを記録した所、全体の平均誤差が 13.5cm と良好な結果を得られ、デバイスの精度および自動ナビゲーションの有効性を感じられる結果となった。

6章では、実際に都市でデバイスを用いて人の感覚・感性に重きをおいて被験者3名に対しフィールドワークを行い、アンケートによるユーザーフィードバックと、使用に伴う言動の変化の観測を行った。実験場所は横浜駅周辺とし、GoogleMaps と HAPMAP を使用し都市経験に着目して比較を行った。この際、アンケート結果や歩行速度に顕著な差がみられ、HAPMAP を使用する事により都市経験の向上が確認でき、デバイス特性が実際の都市において有効である事を確認できた。これらの事から辿るだけで簡単に目的地に着くという手すりのアフォーダンスを再現でき、実際に都市体験の向上がみられたという結論に至った。

7.2. 今後の展望

本論文ではデバイスおよび自動ナビゲーションの構築を実現したが、今後は実際にこのシステムを用いたサービスデザイン、およびアプリケーション化を検討したい。そのため、実際に GPS との連動を試みる他、美術館やショッピングモールなどでの実現において期待のコメントを多く頂いているため、センサ環境を整えた施設内においても展開を試みたいと考えている。これに辺り、道路・ショッ

ピングモール・アミューズメントパーク等，シチュエーション毎にデバイスを使用可能な最低精度を明らかにする必要がある。また，コメントにおいて小型化やカバンの取っ手に装着するタイプの実装，障がい者に向けた改良，スキューバダイビングへの応用などの要望があったため，このあたりについても検討していきたい。

謝 辞

本研究の副指導教員であり、修士1年の初めから本研究について暖かな指導と多くのチャンスをくださった慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の 舘 暲教授に心から感謝いたします。研究のスタート段階の時から学会への投稿に向けて頑張るように促して下さり、修士1年生の時に、先輩方のお手伝いを通してSIGGRAPH2010の空気感を体験させていただくなど、本当に恵まれた環境の中で過ごさせて頂きました。SIGGRAPH2011への投稿の際も暖かく応援していただき、先生のご指導あってこそ、こんなにたくさんの方に研究をデモし、体験してもらえる機会に恵まれたのだと思います。

本研究の主旨指導教員であり、いつも的確で暖かいご指導と学生生活においてもたくさんの心遣いと励ましをいただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の砂原秀樹教授に心から感謝いたします。工学的視点だけでなく社会への適応など、多角的な視野からいつもご指導いただくたびに、自分がかつと描いたビジョンがどういうものなのかを振り返る事ができました。デバイスやシステムを作る側の考え方だけでなく、それを使える環境を構築するために、異なる専門を持つ技術者にどのような情報を提供すればいいのか、デバイスがエンドユーザーに受け入れられる為に必要なこと等、とても大切な視点をいつも投げかけて下さり、本当に勉強になりました。

温かく研究活動を見守り、たくさんのご指導をいただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の稲見昌彦教授に心から感謝いたします。プロジェクトミーティングや発表の場で暖かく研究へのご指導・励ましをくださり、心強い気持ちで自分の考えをプレゼンテーションすることができました。学生が創造活動に試行錯誤する過程を見守る眼差しや研究に対するコメントの暖かさに度々尊敬を深めておりました。

本研究の副指導教員であり、研究について暖かな励ましとご指導をいただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の大川恵子教授に心から感謝いたします。

研究について暖かな励ましとご指導をいただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の加藤朗教授に心から感謝いたします。

触覚技術に興味を持つきっかけをくださり、研究や論文執筆などにおいてたくさんのお助言とご指導をいただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科の南澤孝太先生に心から感謝いたします。

研究活動を暖かく支援していただきました慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科リサーチャーの家室証さんに心から感謝いたします。

研究活動を共に進め、苦楽を共にしたメディアデザイン研究科の荒川裕紀さんに心から感謝いたします。

さまざまな面から研究活動を支えていただいた慶應義塾大学大学院メディアデザイン研究科 HapticMediaProject, NetworkMediaProject の皆様に心から感謝いたします。

最後に、研究活動に関するご理解とともに、経済面や生活面において支援していただきました家族に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] チャールズランドリー. 創造的都市 - 都市再生のための道具箱. 日本評論社, 2003年10月.
- [2] リチャード・フロリダ. クリエイティブ都市論 - 創造性は居心地のよい場所を求める. ダイヤモンド社, 2009年2月.
- [3] Googleのオフィスはいかにして作られたのか. http://gigazine.net/news/20060707_google_office/.
- [4] ポアンカレ. 科学と方法 - 改訳 (岩波文庫 青 902-2). 岩波書店, 1953年10月.
- [5] 川喜田二郎. 発想法 - 創造性開発のために (中公新書 (136)). 中央公論社, 1967年6月.
- [6] 岡本哲志. 銀座四百年 都市空間の歴史 (講談社選書メチエ). 講談社, 2006年12月.
- [7] 芦原義信. 街並みの美学 (岩波現代文庫). 岩波書店, 2001年4月.
- [8] 田中英道. レオナルド・ダ・ヴィンチ 芸術と生涯 (講談社学術文庫). 講談社, 1992年2月.
- [9] ジョンリウォルド. 印象派の歴史. 角川学芸出版, 2004年11月.
- [10] 長嶋洋一, 由良泰人, 藤田泰成, 片寄晴弘, 井口征士. マルチメディア・インタラクティブ・アート開発支援環境と作品制作・パフォーマンスの実例紹介. 情報処理学会研究報告.[音楽情報科学], Vol. 96, No. 75, pp. 39-46, 1996.

- [11] 小林亜令. モバイル ar プラットフォームの事例紹介—セカイカメラ/セカイカメラ zoom. ITU ジャーナル, Vol. 41, No. 7, pp. 41–43, 2011.
- [12] Lynette A. Jones and Susan J. Lederman. *Human Hand Function*. Oxford University Press, USA, 1 edition, 4 2006.
- [13] 岩村吉晃. タッチ (神経心理学コレクション). 医学書院, 2001 年 4 月.
- [14] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 館すすむ. 皮膚感覚神経を選択的に刺激する電気触覚ディスプレイ. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-パターン処理, Vol. 84, No. 1, pp. 120–128, 2001.
- [15] 佐々木大輔, 則次俊郎, 高岩昌弘. 生活支援ロボットのための圧力検出型ソフト触覚センサの開発 (機械力学, 計測, 自動制御). 日本機械学会論文集. C 編, Vol. 70, No. 689, pp. 77–82, 2004.
- [16] 藤子 F・不二雄. ドラえもん最新ひみつ道具大事典 (ビッグ・コロタン). 小学館, 2008 年 9 月.
- [17] 織田武雄. 地図の歴史 世界篇 (講談社現代新書 368). 講談社, 1974 年 10 月.
- [18] 馬場始三. Google map を用いたライフログシステムの実装. 倉敷芸術科学大学紀要, No. 15, pp. 49–59, 2010.
- [19] 井上明, 大滝裕一, 寺田守正, 佐野嘉紀, 奥田晋也, 白井由希子, 村西あい, 竹内一浩, 中村喜輝, 永井智子ほか. ウェブを活用した災害初期対応システム. 情報処理学会第 68 回全国大会, 1E-8, 2006.
- [20] 尾崎洋, 川合康央, 池田岳史, 益岡了. C20 地図を用いた地域文化の web 発信: Google マップ api を用いたウェブコンテンツのデザイン (情報デザインの教育 (情報デザイン研究部会), 第 54 回研究発表大会). デザイン学研究. 研究発表大会概要集, No. 54, pp. 122–123, 2007.
- [21] 星野順至, 正井康之. 音声を用いた歩行者ナビゲーションシステム. 東芝レビュー, Vol. 59, No. 4, pp. 36–39, 2004.

- [22] 中村和弘, 青野嘉幸, 田所嘉昭. 視覚障害者用誘導型歩行支援システム. 電子情報通信学会論文誌. D-II, 情報・システム, II-情報処理, Vol. 79, No. 9, pp. 1610-1618, 1996.
- [23] サイン計画入門. <http://www.aboc.co.jp/business/sign/plan.html>.
- [24] 和田勉. 街で見かける点字サイン・その問題点. 視覚障害, pp. 1-22, 1999.
- [25] 館すすむ, 小森谷清, 谷江和雄, 大野武房, 阿部稔, 清水知和, 松田啓. ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法. 1980.
- [26] 盲導犬の仕事. http://members3.jcom.home.ne.jp/mt_book/moudouken/sigoto.htm.
- [27] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 館すすむ. バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ. Vol, Vol. 13, pp. 15-23, 2008.
- [28] 家室証, 南澤孝太, 川上直樹, 館すすむ. 1a1-a15 空中で使用可能なペン型ハプティックディスプレイの提案. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2009, , 2009.
- [29] AuxDeco. <http://www.eyepius2.com/>.
- [30] 雨宮智浩, 杉山久. 牽引力錯覚を利用した牽引式羅針盤の開発と視覚障がい者の歩行誘導の評価. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 11, No. 4, pp. 303-310, 2009.
- [31] 太田信夫. 潜在記憶一意識下の情報処理. 認知科学, Vol. 2, No. 3, pp. 3-3, 1995.
- [32] 大島沙也佳, 橋本悠希, 梶本裕之. 2a2-j13 触仮現運動の幅知覚における振動周波数の影響. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol. 2009, , 2009.

- [33] 水上陽介, 内田啓治, 澤田秀之. 触覚呈示デバイスを用いたなぞり感覚の呈示. ヒューマンインタフェース学会研究報告集: human interface, Vol. 8, No. 2, pp. 67–72, 2006.
- [34] 佐々木雅幸. 創造都市への挑戦. 2001 年 (岩波書店), 2001.
- [35] Thomas J. Allen and Gunter W. Henn. 知的創造の現場 - プロジェクトハウスが組織と人を変革する. ダイヤモンド社, 2008 年 3 月.
- [36] 岸本章弘. NEW WORKSCAPE - 仕事を変えるオフィスのデザイン. 弘文堂, 2011 年 3 月.
- [37] 石塚満. Google の破壊的創造力の内側を垣間見る.
- [38] 杉本麻樹, 渡邊淳司, 安藤英由樹, 前田太郎. 前庭感覚刺激による歩行方向の誘導: パラサイトヒューマンの研究第 17 報. 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集 = Proceedings of the Virtual Reality Society of Japan annual conference, 第 8 巻, pp. 339–342. 日本バーチャルリアリティ学会, 2003.