

非装着かつ局所的な香り提示手法に関する検討

柳田 康幸[†] 野間 春生[†] 伴野 明^{‡†} 鉄谷 信二[†]

[†] ATR メディア情報科学研究所 〒619-0288 「けいはんな学研都市」光台 2-2-2

[‡] 東海大学電子情報学部情報メディア学科 〒259-1292 平塚市北金目 1117

E-mail: [†] {yanagida, noma, tetsutani}@atr.co.jp, [‡] tomono@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

あらまし バーチャルリアリティにおける感覚提示は従来視覚、聴覚、力・触覚の分野で発達してきたが、その他の感覚も含めた五感を駆使した情報提示へと発展させようとするのは自然な流れである。嗅覚提示の研究は未だ初期段階にあるが、現在までに匂いの強度や匂い物質の混合比率をインタラクティブに制御する試みが見られる。これらの興味の対象は匂いの合成であり視覚提示になぞらえて言えば香りレンダリングとも呼べるものであるが、我々は香り提示装置の側からアプローチを試みる。今回、非装着でかつ体験者ごとの香り空間制御を行うことを目指し、「空気砲」の原理を応用した香り提示手法を考案するとともに、その実現可能性について基礎検討実験を行ったので報告する。

キーワード バーチャルリアリティ、嗅覚、非装着、空気砲

A Study on Unencumbering, Directional Olfactory Display

Yasuyuki YANAGIDA[†] Haruo NOMA[†] Akira TOMONO^{‡†} and Nobuji TETSUTANI[†]

[†] ATR Media Information Science Laboratories

2-2-2 Hikari-dai, "Keihanna Science City", Kyoto, 619-0288 Japan

[‡] School of Information Technology and Electronics, Tokai University

1117 Kitakaname, Hiratsuka, Kanagawa, 259-1292 Japan

E-mail: [†] {yanagida, noma, tetsutani}@atr.co.jp, [‡] tomono@keyaki.cc.u-tokai.ac.jp

Abstract There are several attempts to incorporate an olfactory display in VR systems, and most of them are dedicated to how to capture and synthesize the odor. We focus on spatiotemporal control of odor, rather than synthesizing odor itself. Most of existing olfactory displays for VR simply inject the scented air under the nose through tubes. Here, we propose an unencumbering olfactory display that does not require the user to attach anything on the face, by conveying a clump of scented air from a certain remote place to the user's nose. We also aim at displaying a scent to the restricted space around a specific user's nose, rather than scattering scented air by simply diffusing it into the atmosphere. To implement this concept, we examined to use an "air cannon" that generates toroidal vortices of the scented air.

Keyword virtual reality, scent, olfactory display, air cannon

1. はじめに

我々は五感を通して外界を認識している。バーチャルリアリティ(VR)における感覚提示技術はこれまで視覚、聴覚、力・触覚と発展してきており、五感のうち残りの感覚モダリティ、すなわち嗅覚や味覚へと拡張を行うことは自然な流れであると考えられる。その中でも、嗅覚は物体や液体に明示的に接触せずとも得られる感覚であり、環境の提示に適していると言える。嗅覚はその性質の一面を捉えて原始的な感覚と言われることもあるが、普段思い出さなかったことを想起するきっかけとなるなど、決して無視できない感覚であるには違いない。従来嗅覚の提示は後述するような難しさの理由もあり、どちらかというと未発達のままであったが、近年、次世代情報通信の活用法として五感をフルに利用した情報通信の

あり方が検討され [1, 2]、嗅覚提示が注目を集め始めている。海外においても、嗅覚を VR へ適用するための基礎検討が行われ [3]、匂いを記録し遠隔地において再現する研究が開始されている [4]。我々は、世代、地域、職業、文化、社会の多様性を超えたコミュニケーションを実現するための「体験 Web」構想における入出力インタフェースという位置づけで、「五感メディア」 [5] と銘打った次世代 VR インタフェースの研究開発に取り組んでおり、その一環として嗅覚提示の可能性についての探求を開始したところである。

嗅覚提示の研究を開始するにあたり我々のとった立場は、これまでに VR の研究開発でノウハウを培ってきたデバイス・システム開発の側からアプローチするということである。すなわち、香りの合成はそれ自体非常に奥が深く、我々にと

って一朝一夕に大きなブレイクスルーをもたらすことは難しい。それに対し、香りを人間に提示する際に時空間上で積極的に制御するという領域はまだあまり手がつけられていない状態であり、従来の VR 分野における活動の延長上でも有益な貢献をもたらすことができるのではと考えたためである。

本稿では、嗅覚提示研究の第一歩として、視覚提示の分野における HMD (Head-Mounted Display) に対するメガネなし立体ディスプレイのような位置づけの装置の開発を目指し、そのコンセプトと基礎検討について記述する。

2. 嗅覚提示の現状

従来 VR の分野で嗅覚の提示に関する研究があまり行われて来なかった理由として、以下のような点が考えられる。

- (1) 視・聴・触覚が物理的的刺激により生起される感覚であるのに対して嗅覚は化学的刺激による。
- (2) 匂いを検出する受容体の種類が極めて多く、いわゆる記録・再生が困難である。

上記理由のうち (1) に関しては、味覚にも言えることであるが刺激の強度と物質濃度とを単純に対応させることができず、また濃度変化が知覚の上では刺激の強弱ではなく質の変化をもたらすといった性質をどう扱うかという問題も内包する。さらに (2) に関しては視覚で言うところの「色の三原色」に相当するものが見つかっておらず、情報の圧縮と「バーチャル化」が困難であるという問題に突き当たる。

ここで、「バーチャル化」の概念について触れておきたい。バーチャルという言葉の意味、すなわち「形としてはそのものではないが効果として等価である」からすると、バーチャルリアリティは物理的・化学的にはそのものでなくても、感覚の上で同じ効果をもたらす刺激の存在が拠り所になる[6]。言い換えれば、VR は人間の感覚器が物理的・化学的現象すべてを検出している訳ではないという性質の上に成り立っている。視覚に関しては人間の網膜情報処理の性質に基づく上記の「色の三原色」が該当し、光の連続スペクトル分布をそのまま再現しなくても RGB の3色の混合により感覚上では任意の色を合成できる。触覚に関しても近年 Meissner 小体、Merkel 細胞、Pacini 小体などの機械受容器の特性に着目し、「色原色」を定義して独立に刺激を加えることにより任意の触覚を提示しようという試みが盛んに行われている[7-9]。

翻って、嗅覚の場合も「原臭」を定義しようとする試みは行われてきた[10]。Amoore[11]は当初巧みな分類により7種類の前臭を提唱したが、後に30~40種類程度に増やされた。その後、前臭の数が絞られるどころか、嗅覚の仕組みに関する研究が進むにつれて匂い識別の単位は受容タンパク質であるとする説[12]が有力な候補の一つとなり、その数は少なくとも100種類を超えることが確認され[13]、さらに構造から1000

種類を超えると推定されている[14]。このような事情のため、嗅覚に関しては生理レベルでの証拠を元に有効な情報圧縮あるいはバーチャル化の手がかりを掴みにくいというのが現状である。

香りの研究は空間演出やアロマセラピーなどの分野[15]で長い歴史を持つが、近年ようやく人間の振る舞いに応じてインタラクティブに香りを制御しようという、VR 的観点を持つ研究が行われるようになった。廣瀬ら[16][17]は数種類の匂い源から電磁弁により匂い物質の濃度を制御した空気を生成し、チューブを通して鼻先へ運ぶことにより、体験者の位置に応じて匂いの種類や強度をコントロールするシステムを開発した。重野ら[18]は、数種類程度の匂い源による匂い物質濃度を混合制御して、インタラクティブに香り合成を行うシステムを開発した。中本ら[19]は匂いの記録・再生システムを構築する観点から、センサ系、提示系の双方にまたがる研究開発を進めている。また、米国 DigiScents 社は実際のビジネスを軌道に乗せるには至らなかったものの、複数種類の匂い物質を制御しつつ空間へ拡散する装置を PC の周辺機器として開発した。しかしながら、前述のように「原臭」の定義が困難であることから、人間の感覚上で任意の香りを合成するためには、新たな「香りのバーチャル化」をもたらす仕組みの発見もしくはデバイスの集積化による超多チャンネル化といった大きなブレイクスルーが必要である。それでも、香りを積極的に制御しようとする試みが開始されたことは大きな前進であり、大いに評価される。

以上のような背景をふまえ、我々は香りの提示装置を開発し道具として提供するという立場からアプローチする。すなわち、VR におけるこれまでの感覚提示技術を振り返ると、感覚刺激をどのようにサンプリング・解析するかという技術要素（視覚で言えば撮像系、画像理解）、情報を蓄積し合成する技術要素（モデリング、レンダリング）、およびどのようにして人間に提示するかという技術要素（同じく、HMD や CAVE[20]などの視覚提示系）から成り立っていることがわかる。しかるに、前述のように現在の研究開発は香りの合成、すなわち「香りレンダリング」を主眼に置いたものが多く、香り提示のためのインタフェース装置という観点での開発はほとんど手がつけられていないに等しい。我々のスタンスは、香りのサンプリング・合成手法が未だ確立されていない現段階から、積極的に提示技術の研究を行っておこうというものである。

3. 非装着・局所型香り提示

前述の香り提示研究の中でも、廣瀬らによる提示装置は視覚で言えば HMD に相当するものであり、単に空間中に香りを充満させるディフューザー方式とは一線を画する。これは

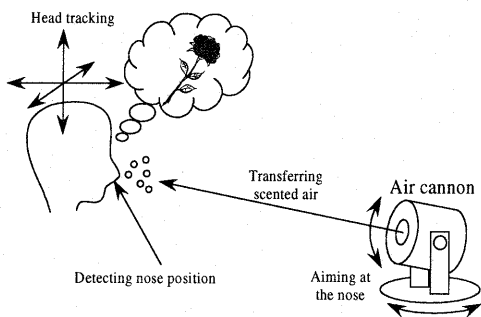


図1: 非装着・局所型香り提示装置のコンセプト。

鼻先へチューブで空気を運ぶ方式であり、個人用デバイスとしては確実な方法であるが、一方でチューブの長さにより移動範囲に限られるか、さもなくば匂い源も含めて装置全体を持ち運ぶ必要があり、煩雑さは免れない。また、顔に何らかの装置を装着すると視覚などの他の情報提示と干渉したり、双方向コミュニケーションを行う際に顔の表情を隠したりするといった制約も存在する。そこで我々は、離れたところにある匂い合成装置から自由空間を通して香りを人間の鼻先へ運ぶことにより、非装着型かつ局所的な香り提示装置の開発を目指す。これは視覚提示の分野で言えばメガネなし立体ディスプレイに相当するものであり、以下のような利点を有する。

- (1) 非装着であること: 体験者にとって顔面にマスクのようなものを装着する、香り伝送のためのチューブを引きずる、あるいは香り合成のための装置と一緒に持ち運ぶといった煩わしさがなく、また、香り提示のために顔面を覆う必要がなく、双方向コミュニケーションなどへの応用の場面で表情が隠れることがない。
- (2) 局所的な香り提示であること: 体験者の行動に応じた香りの制御を行ったり、隣に存在する人間に別々の香りを提示したりすることが可能になる。また、香り物質を空間全体に散逸する方式と比較して、高価な芳香物質の使用量を少なく抑えることができるとともに、特別な排気設備を用意しなくても香り物質がすぐに散逸するため、別途消臭を行う必要がなく時間的な制御が可能になる。

こうした要求を満たすためには、離れた場所から香りのついた空気を人間の鼻先へ運ぶ仕組みが必要である。我々は、これを実現するため、子供のための理科実験教室などで有名な「空気砲」の原理の適用を検討した。以下では、まずシステム全体のイメージについて説明し、その後空気砲の詳細について記述する。

システム全体のコンセプトを図1に示す。システムは、頭

部(顔)トラッカ、空気砲用雲台、空気砲本体、香り合成装置から構成される。まず、香りを提示する人間の鼻の位置を検出する。これを行うには現存する任意の3次元位置検出手法、例えば機械リンク式頭部トラッカや磁気センサ、光学的マーカー検出によるトラッキング装置などが使用できる。しかし、非装着という特色を生かすためには、コンピュータビジョンベースの手法、中でも人間の顔の特徴を手がかりにしてマーカーなどの装着を必要としない手法(例えば[21])が有効であろう。

その上で、空気砲を載せた雲台を制御し空気砲が人間の鼻の位置を狙うようにする。このとき、空気砲の内部を香り物質で満たす必要はなく、空気砲を発射する直前に射出口の付近で噴霧すればよい。このため、毎回の発射ごとに異なる香りを乗せることが可能であり、射出の方向を制御すれば複数の体験者に異なる香りを提示することもできる。併せて、(しばしば高価な)香り物質の消費量は必要最小限で済むという特徴を有する。

以下では、空気砲を用いた自由空間中の香り搬送について記述する。香りの合成手段は嗅覚提示装置を構成する上で極めて重要な技術要素であるが、本稿では香りの搬送のみに焦点を合わせ、香り合成については対象の範囲外とする。

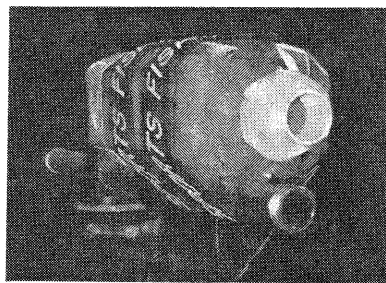


図2: ペットボトルを利用した空気砲。

4. 空気砲による香りの搬送

空気砲は、円形の開口を持ち部分的に変形可能な容器で構成される。子供向けの理科実験デモンストレーションの題材として非常に有名であり、各地で空気砲を作るイベントが開催されている。作成方法としては、段ボール箱に丸い穴を開け他の隙間をテープで塞ぐ方法、もしくはペットボトルの底を切り取りゴム風船から切り出したゴム膜を張る方法(図2)が簡単で一般的である。段ボールタイプの空気砲の側面を勢よく叩くと、箱の大きさにもよるが、数mから十m程度先にあるロウソクの火を消すほどの勢いで、空気砲の塊を目に見えない砲弾のように飛ばすことができる。通常、これらのデモンストレーションでは空気が遠くまで勢よく飛んでいく

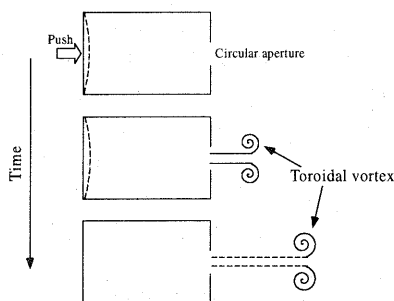


図 3: 空気砲の原理.

ドーナツ状の渦が生成される.

このみが強調されるが、本研究ではこの勢いではなく安定して空気塊を飛ばすことができる原理的な部分に着目する.

空気砲では、開口部から空気が押し出された後、図 3 のようにドーナツ状の空気の渦が形成される. この渦は toroidal vortex と呼ばれるもので、渦の存在により空気の粒子が散逸することなくドーナツ状のまま移動していく. 空気の様子を観察するため空気砲の内部を煙で満たし、箱を勢いよく叩く代わりにそっと押すと、ドーナツ状の煙が発射される(図 4).

ドーナツ状の煙は、形を保持したまま毎秒数十 cm から数 m ぐらいの速度で数 m ほどの距離を移動する(図 5). 箱を勢いよく叩いた場合は瞬発的な風が感じられるが、そっと押した場合は風よりもむしろ空気の塊がフワッと運ばれてくるという感触である. この原理自体は煙草の煙を口に入れて輪を作る方法と同一であり、最近は同じ原理を利用した玩具[22]も市販されている.

ドーナツ状の空気の渦は、空気が容器から押し出される際に開口部の端で流速が遅く、中央部分で速くなることから生じると考えられる. 渦の中央、すなわち環状の部分は圧力が低くなっており、渦を形成する空気の粒子はしばらくの間(1 秒~数秒程度)拡散せず安定したドーナツ形状を保持する. このため、空気を容器から押し出す瞬間に開口部近傍の空気へ香料微粒子を乗せておけば、香料を渦に乗せて離れた場所へ到達させることができる.

5. 適用可能性に関する実験的検討

空気砲を利用して提案する非装着・局所型嗅覚提示装置が実現可能かどうか、実験的に検討を行った. 実験の目的は香りをどの程度(距離および方向に関して)安定して飛ばすことができるか見当をつけること、および提示する香りの局所性、すなわち狙った体験者以外の人間が香りを感知することがないかどうか確認することである.

本検討において、空気砲の形状パラメータは実験的に決定した. 加工しやすく製作の容易なペットボトル型空気砲を数

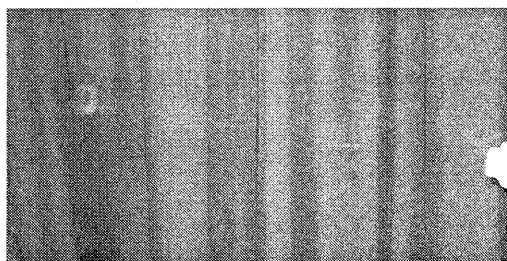


図 4: 空気砲から空気の塊が発射された様子.

ドーナツ状の渦を構成する.



図 5: 空気塊は安定して 2~3m ほど飛行する.

種類製作し、容器の体積と開口径の組み合わせを検討した. まず、体積の異なる複数のペットボトルを用意し、底を切断してゴム膜で覆うとともに、口側も切断して径の異なる筒を複数用意し粘土で固定して、渦の飛距離が稼げる組み合わせを選択した. その結果、体積 2l、開口の内径 2.8cm のもの(図 3)を採択した. この結果に最適性の保証はないが、本実験の目的のためには十分であると判断した. この空気砲により、平均して約 2m、最大 4m ほど渦を飛ばすことが可能であった.

渦の状態を視覚的に確認するとともに香り付けを行うため、ペットボトル内部を線香の煙で満たした. 空気砲の発射は実験者がボトル底面のゴム膜を指で押すことにより行った. 空気砲から発射される空気渦の様子は、図 4、図 5 に示した通りである.

実験の配置を図 6 に示す. 被験者 2 人(A, B とする)は並んで着座し、閉眼のまま待機する. 三脚の上に固定した空気砲を、被験者の顔面から距離 1.2m の位置に射出口が来るよう配置した. 空気砲の狙う先は以下の 5 通りである.

- A: 被験者 A
- B: 被験者 B
- C: 両被験者の間
- L: 両被験者の左側
- R: 両被験者の右側

被験者には空気砲をどこへ向けて発射するかを知らせず、予

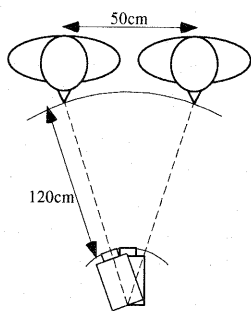


図 6: 香り到達・検出判定実験の配置。

備試行において空気砲の狙いがどこにあるか、閉眼状態の被験者が判別できないことを確認した。それぞれの試行について、煙の到達位置を目視で確認し、挙手結果と併せて記録した。

試行は全部で 59 回行われた。煙の輪が被験者の顔面が並んでいる位置まで到達した、すなわち 1.2m 以上安定して飛んだ回数は 51 回であり、到達距離に関する成功率は 86% であった。残りの 8 回 (14%) は、煙の輪がうまく発生しなかったか途中で消失したことを意味する。到達した 51 回のうち、上記 A, B, C, L, R の領域に「命中」した試行は 48 回 (94%) であり、渦が安定して持続すれば角度方向の誤りは少ない。総試行回数に対する領域命中率は 81% となる。空気砲の命中率を上げるには、機械的に制御を行って安定した条件で射出を行うことが必要となるであろう。

領域に「命中」した試行のうち、被験者 A, B のどちらかの顔面を狙ったものは 39 回 (うち被験者 A 17 回, 被験者 B 22 回) であった。このうち、線香の香りを感じし挙手した試行は被験者 A が 13 回 (76%), 被験者 B が 15 回 (68%), 両者合わせて 28 回 (71%) であった。被験者 A に命中して被験者 B が挙手、あるいは被験者 B に命中して被験者 A が挙手した試行は皆無であった。また、被験者の顔面領域外 (C, L, R) に到達した場合 (8 回) にいずれかの被験者が挙手した試行も皆無であった。以上の結果から、少なくとも人間の顔面の大きさのオーダーで香り搬送を局所的に行うことには成功していると言える。

顔面のどの場所に命中したかに関してももう少し詳しく検討する。顔面を 3 領域 (上・中・下) に分けて集計を行ってみると、顔の中央および下半分 (中・下) に命中して香りを感じした回数は被験者 A が 14 回中 13 回 (93%), 被験者 B が 17 回中 14 回 (82%), 合計 31 回中 27 回 (87%) と検出率が高くなる。逆に、顔の上部 (額・頭部) に命中して香りを感じしたのは 8 回中 1 回のみ (13%) であった。この結果は、鼻が下を向いており鼻の穴が顔面の中央よりは下寄りに位置してい

ることからも当然と考えられるが、空気砲で狙いを定める位置をどこにすべきかについて有益な示唆を与えてくれる。

以上の結果は実験者の手により空気砲を駆動し、命中した領域の判定を実験者の目視によって行っているため、評価実験としての厳密性を主張することはできない。しかしながら、提案する方式による嗅覚ディスプレイを実装していくために有効な設計指針が得られたと考える。

6. むすび

五感を駆使した VR インタフェースの実現へ向けて、体験者の顔面に何も装着せず、かつ空間全体に香りを充満させるのではなく香り空間の局所的制御を行う手法を提案し、基礎実験によりその実現可能性を検討した。その結果、空気砲を用いて 1~2m 程度離れた位置から特定の人間に対して香りを提示できることを確認した。

非装着であるという特性は、体験者に余計な負担をかけないだけでなく、香り提示が他の感覚提示と干渉しにくいという利点を有する。視覚、聴覚、力・触覚を含めた多種感覚の同時提示を行おうとすると、とかく提示装置同士がお互いの邪魔をしがちであるが、本方式はこの観点からも五感の総合提示へ向けた重要なステップになると期待される。

本研究は最初の一步を踏み出したばかりであり、むしろ今後の課題も山積している。顔位置検出のトラッキング装置および現時点で実現可能な香り合成装置と組み合わせてシステム全体を構成してみること、空気砲の設計パラメータを理論的解析およびより精密な実験により決定していくこと、適用環境における空気の流れに対する耐性の検討と評価などが含まれる。今後は、こうした問題を一つずつ解決して提案する嗅覚ディスプレイを具現化していく。

謝辞

本研究は、通信・放送機構の委託研究「超高速ネットワーク社会に向けた新しいインタラクション・メディアの研究開発」により実施したものである。実験に協力いただいた京都工芸繊維大学学生の篠崎哲也氏ならびに同氏の所属研究室を主宰する同大学 宮里 勉 教授に感謝する。

文 献

- [1] 池井 寧 編, “特集「五感情報通信」”, 日本バーチャリアリティ学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 6-39, 2002.
- [2] 広田光一, 廣瀬通孝, “五感情報通信の実現にむけて～触覚および嗅覚情報の伝達～”, 情報処理学会研究報告, 2002-HI-98, pp. 13-18, 2002.
- [3] W. Barfield and E. Danas, “Comments on the Use of Ol-factory Displays for Virtual Environments”, *Presence*, Vol. 5, No. 1, pp. 109-121, 1996.

- [4] F. Davide, M. Holmberg, and I. Lundström, "Virtual olfactory interfaces: electronic noses and olfactory displays", *Communications through Virtual Technology: Identity, Community and Technology in the Internet Age* (G. Riva and F. Davide ed.), Chapter 12, pp. 193–219, IOS Press, Amsterdam, 2001.
- [5] 鉄谷信二, 野間春生, 柳田康幸, 杉原敏明, 内海 章, 川戸慎二郎, 萩田紀博, "体験 Web と五感メディア", 情報処理学会研究報告, 2002-HI-98, pp. 19–24, 2002.
- [6] 舘 暲, "バーチャルリアリティとロボティクス", 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 8–10, 1996.
- [7] N. Asamura, N. Yokoyama, and H. Shinoda, "A Method of Selective Stimulation to Epidermal Skin Receptors for Realistic Touch Feedback", *Proceedings of IEEE Virtual Reality '99*, pp. 274–281, 1999.
- [8] T. Nara, M. Takasaki, T. Maeda, T. Higuchi, S. Ando, and S. Tachi, "Surface Acoustic Wave Tactile Display", *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 21, No. 6, pp. 56–63, 2001.
- [9] 梶本裕之, 川上直樹, 前田太郎, 舘 暲, "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, Vol. J84-D-II, No. 1, pp. 120–128, 2001.
- [10] Karl-Heinz Plattig (小川 尚 訳), 鼻のきく人 舌のこえた人, 学会出版センター, 東京, 1995.
- [11] J. E. Amoore, "Odor Theory and Odor Classification", *Fragrance Chemistry* (E. T. Theimer ed.), pp. 27–76, 1982.
- [12] S. Price, "Receptor proteins in vertebrate olfaction", *Biochemistry of Taste and Olfaction* (T. H. Cagan and M. R. Kare ed.), pp. 69–84, Academic Press, New York, 1981.
- [13] L. Buck and R. Axel, "A novel multigene family may encode odorant receptors: A molecular basis for odor recognition", *Cell*, Vol. 65, pp. 175–187, 1991.
- [14] 外池光雄, "最近の匂い学説", 匂いの応用工学 (栗岡 豊・外池光雄 編), 朝倉書店, 東京, pp. 24–37, 1994.
- [15] 荘司菊雄, においのはなし, 技報堂出版, 東京, 2001.
- [16] 廣瀬通孝, 谷川智洋, 石田健亮, "嗅覚ディスプレイに関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会第2回大会論文集, pp. 155–158, 1997.
- [17] 廣瀬通孝, 谷川智洋, 田中信吾, 崎川修一郎, "嗅覚ディスプレイに関する研究", 日本バーチャルリアリティ学会第5回大会論文集, pp. 193–196, 2000.
- [18] 重野 寛, 本田新九郎, 大澤隆治, 永野 豊, 岡田謙一, 松下 温, "仮想空間における風と香りの表現手法—仮想空間システム Friend Park", 情報処理学会論文誌, Vol. 42, No. 7, pp. 1922–1931, 2001.
- [19] 中本高道, 森泉豊栄, "匂い情報の記録・再生及び通信システムへの展望", 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 11–15, 2002.
- [20] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti, "Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE," *Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH '93)*, pp. 135–142, 1993.
- [21] S. Kawato and N. Tetsutani, "Real-time Detection of Between-the-Eyes with a Circle Frequency Filter", *Proceedings of The 5th Asian Conference on Computer Vision (ACCV2002)*, Vol. II, pp. 442–447, 2002.
- [22] Zero Toys, URL <http://www.zerotoys.com/>