



3次元ディスプレイとハプティックコントローラを用いた 多感覚実在感提示システム

Multisensory Reality Presentation System Using 3D Display and Haptic Controller

加納正規, 半田拓也, 東真希子, 界瑛宏, 水谷沙耶, 小峯一晃

Masanori KANO, Takuya HANDA, Makiko AZUMA, Akihiro SAKAI, Saya MIZUTANI, and Kazuteru KOMINE

日本放送協会 放送技術研究所（〒 157-8510 東京都世田谷区砧 1-10-11, kanou.m-gc@nhk.or.jp）

概要: 物体の実在感を高品質に提示するシステムの実現に期待が高まっている。実在感を提示するには、3次元映像などの視覚・聴覚情報に加えて触覚・嗅覚情報などの提示、実世界との整合性、インタラクティブ性などが重要になると考えられる。我々は、3次元映像、立体音響、振動・温冷覚、香りが提示可能な多感覚実在感提示システムを開発した。本システムは、ハプティックコントローラ上に3次元映像でバーチャル物体を表示し、その振動・温冷覚や香りを提示する。また、ハプティックコントローラによりバーチャル物体をインタラクティブに操作することができる。実物体とバーチャル物体の位置関係の整合性や一般公開イベントでの展示などの評価を通じてシステムの有効性を確認した。

キーワード: 3次元ディスプレイ, 多感覚, インタラクティブ性, 実在感

1. はじめに

物体の実在感を高品質に提示するシステムの実現に期待が高まっている。これは、近年の映像・音響技術などの進歩により、質の高い体験を求めるニーズが高まっているためである。現在、一般的に使用されている2次元ディスプレイとスピーカで構成されるシステムは、視覚と聴覚を通じて効率的に情報を伝達する。そのため、テレビやパソコンなど多くのデバイスに標準的に採用されている。しかし、このようなシステムによる実在感は、視覚と聴覚を中心とした限定的なものであり十分とは言えない。

高い実在感を提示するには様々な要素が必要になると考えられている [1]。まず、視覚・聴覚情報に加えて触覚・嗅覚情報など多感覚情報を提示することが重要である。特に、視覚情報については、平面的な2次元映像ではなく、奥行きのある3次元映像 [2] であるといふ。次に、インタラクティブ性やリアルタイム性なども重要な要素である。さらに、拡張現実においては、実世界とバーチャル物体の位置関係の整合性が重要であるとされている [3]。

我々は、3次元映像、立体音響、振動・温冷覚、香りが提示可能な多感覚実在感提示システムを開発した。本システムは、ハプティックコントローラ（以降、コントローラ）上に3次元映像でバーチャル物体を表示し、その振動・温冷覚や香りを提示する。また、コントローラによりバーチャル物体をインタラクティブに操作することができる。さらに、実物体であるコントローラとバーチャル物体の位置関係の整合性を高めるためのキャリブレーション手法を提案する。実物体であるコントローラとバーチャル物体の位置関係の整合性やシステムのレイテンシ計測、一般公開イベントで

の展示などの評価を通じてシステムの有効性を確認した。

2. 多感覚実在感提示システム

2.1 システム構成

提案する多感覚実在感提示システムの外観を図1に示す。本システムは、3次元ディスプレイ、スピーカ、ハプティックコントローラ、香り提示装置、モーションキャプチャ装置およびコンピュータで構成される。3次元ディスプレイ（Acer社 SpatialLabs View Pro 27）は、画面上部のカメラでユーザの両眼の位置を追跡して、それらに向けた映像を生成し、表示する。これにより、ユーザは両眼視差と運動視差のある3次元映像を観察できる。スピーカ（ADAM Audio社 D3V）は、コンテンツ内の環境音や効果音をバイノーラル再生技術（音源から左右の耳までの音の伝搬特性を模擬することで、任意の方向の音源から音が到来するように知覚させる技術）により立体音響として再生する。ハプティックコントローラ（独自開発品）は、ユーザの手に対して、音声信号を入力とした振動による触覚情報とペルチェ素子による温冷覚情報を提示するユーザインタフェースである。提示する温度の範囲は、安全性を考慮して約28~36℃とする。このコントローラは、ボタンなどによる入力機能はないが、その位置・姿勢によって入力インタフェースとしても機能する。香り提示装置（Aromajoin社 Aroma Shooter 3）は、6種類のアロマカートリッジから独立あるいは混合した香りを提示することができる。モーションキャプチャ装置（NaturalPoint社 OptiTrack）は、ユーザの頭上に設置した赤外線カメラと剛体に取り付けた再帰性反射材のマーカ（3個以上）により、剛体の位置・姿勢をトラッキングする。



図 1: 多感覚実在感提示システムの外観

今回はディスプレイとコントローラの位置・姿勢をリアルタイムでトラッキングする。各機器はコンピュータ（サードウェーブ社 GALLERIA UA9C-R49）に接続される。システムとコンテンツの開発プラットフォームにはゲームエンジンである Unity を使用した。

2.2 ハプティックコントローラ上のバーチャル物体の表示

本システムの特徴は、ハプティックコントローラ上に 3 次元映像でバーチャル物体を表示し、自由に操作して観察できる点である。これには、バーチャル物体がコントローラ上に表示されるように、バーチャル物体の 3 次元モデルを CG シーン内の適切な位置に配置して表示映像をレンダリングする必要がある。そのために、ディスプレイとコントローラの位置・姿勢をモーションキャプチャ装置によりトラッキングする。

ここでは図 2 のように座標系を設定して、バーチャル物体の配置について考える。モーションキャプチャ装置が剛体をトラッキングする際の基準の座標系を世界座標系 Σ_W とし、マーカにより決まる画面中心周辺にディスプレイ座標系 Σ_D 、コントローラの上部中心にコントローラ座標系 Σ_C を設定する。さらに、CG シーンの座標系 Σ_S を画面中心に設定する。ここで、位置・姿勢は並進ベクトルと回転行列と等価であるため、座標系 Σ_W から座標系 Σ_D への座標系の変換を表す剛体変換行列 ${}^D M_W$ は並進ベクトル ${}^D t$ と回転行列 ${}^D R_W$ から次式となる。

$${}^D M_W = \begin{bmatrix} {}^D R_W & {}^D t \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、剛体変換行列と回転行列の右下と左上の添え字は変換される座標系、並進ベクトルの左上の添え字はベクトルの座標系、 T はベクトルの転置を表す。同様に、座標系 Σ_W から座標系 Σ_C への変換を表す剛体変換行列は ${}^C M_W$ 、座標系 Σ_D から座標系 Σ_S への変換を表す剛体変換行列は ${}^S M_D$ となる。この時、座標系 Σ_C から座標系 Σ_S への変換

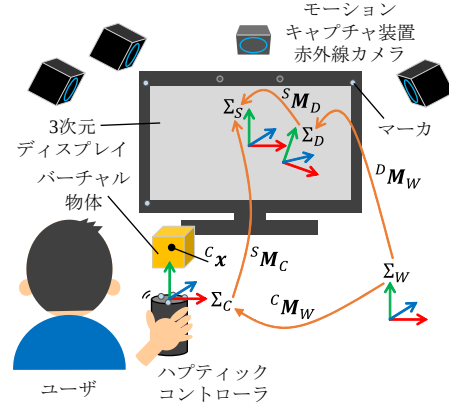


図 2: 座標系と剛体変換行列

を表す剛体変換行列 ${}^S M_C$ は次式で計算される。

$${}^S M_C = {}^S M_D {}^D M_W {}^C M_W^{-1} \quad (2)$$

剛体変換行列を使うことで、3 次元位置の座標系の変換ができる。座標系 Σ_C の位置 ${}^C x$ は、次式により座標系 Σ_S の位置 ${}^S x$ へ座標変換される。

$${}^S \tilde{x} = {}^S M_C {}^C \tilde{x} \quad (3)$$

ここで、位置 x の左上の添え字は座標系を表し、 $x = [x, y, z]^T$ の同次座標を $\tilde{x} = [x, y, z, 1]^T$ とする。本システムでは、モーションキャプチャ装置から ${}^D M_W$ と ${}^C M_W$ は既知となる。さらに、ここではディスプレイの座標系 Σ_D と CG シーンの座標系 Σ_S は一致している (${}^S M_D$ は単位行列) と仮定する。これにより式 (2) より ${}^S M_C$ が計算できる。座標系 Σ_C においてバーチャル物体を表示する位置を決定すれば、式 (3) により座標系 Σ_S での位置が計算できるため、シーン内でのバーチャル物体の配置が決定し、表示映像がレンダリングできる。なお、コントローラもディスプレイもトラッキング可能な範囲内では自由に位置・姿勢を動かしてよい。

2.3 バーチャル物体の表示位置の高精度化

ハプティックコントローラとバーチャル物体の位置関係の整合性を高めるためのキャリブレーション手法について述べる。前節ではディスプレイ座標系 Σ_D とシーン座標系 Σ_S は一致していると仮定したが、実際には位置・姿勢のずれがある。これは、マーカのみでは正確な画面中心は得られず、座標系 Σ_D はその周辺に設定されるためである。この影響により、コントローラ上のバーチャル物体は所望の位置からずれて表示されてしまう。本システムでは、バーチャル物体の実在感を高める一つの要素として、コントローラに対するバーチャル物体の表示位置の精度が重要である。コントローラを動かした際にこれらの位置関係がずれると、違和感を生じて実在感が損なわれる。そこで、座標系 Σ_D から座標系 Σ_S への変換を表す剛体変換行列 ${}^S M_D$ をキャリブレーションにより推定する。表示位置の高い精度を求めない場合はこの処理は不要だが、コントローラをディスプレイ面から手前に大きく動かすほど、座標系間の角度のずれは表示位置に大きく影響を与える。そのため、コントローラを大きく動かすにはキャリブレーションは重要である。

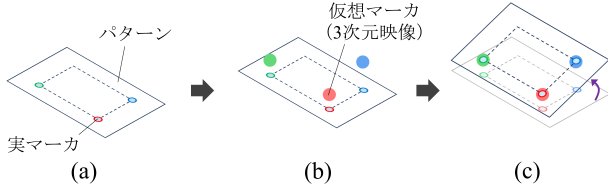


図 3: キャリブレーションでのパターン操作

キャリブレーションでは、コントローラの代わりに図 3(a) のようなキャリブレーション用のパターンを使用する。このパターンは、透明で平らな剛体の板に I 個のマークを取り付けた物である。この実際に取り付けるマークを実マークと呼ぶ。また、この実マークの位置に対して、図 3(b) のように 3 次元映像でマークを表示したものを仮想マークと呼ぶ。実マークの位置 ${}^W\mathbf{p}$ はモーションキャプチャ装置により得られるため、仮想マークの位置 ${}^S\mathbf{q}$ は次式により計算され、仮想マークとしてディスプレイに表示される。

$${}^S\tilde{\mathbf{q}} = {}^S\mathbf{M}_D {}^D\mathbf{M}_W {}^W\tilde{\mathbf{p}} \quad (4)$$

キャリブレーション完了前は、剛体変換行列 ${}^S\mathbf{M}_D$ を単位行列で近似しているため、実マークと仮想マークの位置は一致しないが、これらは近い位置に表示される。

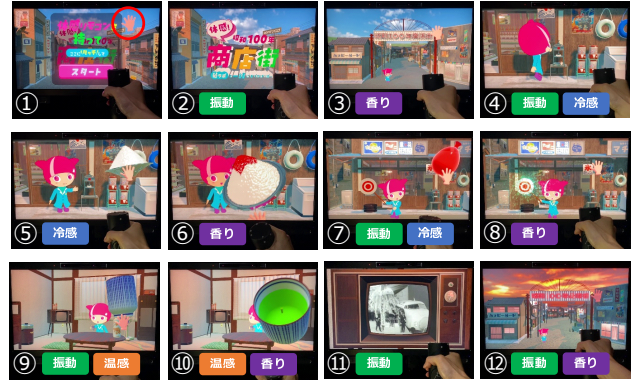
剛体変換行列 ${}^S\mathbf{M}_D$ を推定する手順について説明する。まず、ユーザは図 3(a) のようなパターンを任意の位置・姿勢で 3 次元ディスプレイの前に掲げる。次に、図 3(b) のように実マークに対応する仮想マークを表示する。この時、もしすべての仮想マークが 3 次元ディスプレイの表示可能範囲に入らない場合、入るようにパターンの位置・姿勢を調整する必要がある。続いて、仮想マークの位置を固定化し、その時の仮想マークの座標系 Σ_S での位置 ${}^S\mathbf{q}$ を保存する。最後に、図 3(c) のように、ユーザはパターンの位置・姿勢を調整して各仮想マークの位置に対応する実マークの位置を合わせ、その時の実マークの座標系 Σ_D での位置 ${}^D\mathbf{p}$ (${}^D\tilde{\mathbf{p}} = {}^D\mathbf{M}_W {}^W\tilde{\mathbf{p}}$) を保存する。パターンに透明の板を使用する理由は、このマーク同士の位置合わせをする際に、ユーザから見て板の奥に仮想マークが表示されても観察可能にするためである。上記の操作をパターンの位置・姿勢を変化させて J 回繰り返す。この時、 j 回目の操作での i 番目のマーク位置は ${}^S\mathbf{q}_{ij}$ と ${}^D\mathbf{p}_{ij}$ となり、対応が既知な位置のペアとなる。結果として、 IJ 個の位置のペアの情報が収集される。対応が既知の 3 次元位置のペアから剛体変換行列を推定する問題は以下の式を解けばよい。

$$\min_{{}^S\mathbf{R}_D, {}^S\mathbf{t}} \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \|{}^S\mathbf{q}_{ij} - ({}^S\mathbf{R}_D {}^D\mathbf{p}_{ij} + {}^S\mathbf{t})\|_2^2 \quad (5)$$

これは特異値分解により解かれ [4]、推定された並進ベクトル ${}^S\mathbf{t}$ と回転行列 ${}^S\mathbf{R}_D$ から剛体変換行列 ${}^S\mathbf{M}_D$ が得られる。

3. コンテンツ

本システムの特徴である 3 次元映像や立体音響、振動・温冷覚、香り、インタラクティブ性を生かしたコンテ



- ①コントローラ上に手の形の3次元ポインタ（赤丸）でスタートボタンにタッチする。
- ②コンテンツが開始され、タイトルロゴが飛び出してくる。【地響きのような振動】
- ③ラボちゃんが昭和100年商店街を紹介する。【スモークと醤油の香り】
- ④駄菓子屋に移動し、ラボちゃんがかき氷を作るのを手伝う。【氷をけずる振動、冷感】
- ⑤ラボちゃんからかき氷を渡され、かき氷がコントローラ上に表示される。【冷感】
- ⑥かき氷にシロップがかけられ、その様子を自由に観察できる。【イチゴの香り】
- ⑦水風船がコントローラ上に浮かんで表示される。【水が揺れるような振動、冷感】
- ⑧水風船を投げるのに当たって割れる。【清涼感のある香り】
- ⑨お茶の間に移動し、湯呑みが卓上からコントローラ上に移動する。【お茶の振動、温感】
- ⑩湯呑みを操作し、お茶を上から覗き込むと茶柱が立っている。【温感、お茶風の香り】
- ⑪ブラウン管テレビのチャンネルを切り替える。【ガチャガチャという振動】
- ⑫商店街入口に戻り、コンテンツは終了する。【地響きのような振動、石鹸の香り】

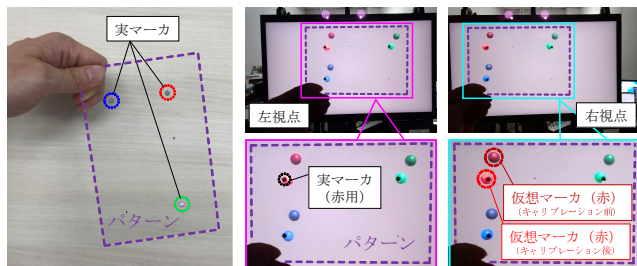
図 4: コンテンツの体験フロー

ンツ「体感！ 昭和 100 年商店街 ～駄ラボと一緒に～」を制作した。これは昭和 100 年を記念して作られたバーチャル昭和の世界を弊所のキャラクターである駄ラボ（ラボちゃん）がリポートするロケ番組をイメージしたコンテンツである。図 4 にコンテンツの体験フローを示す。まず、ユーザにはコントローラを握って、その上部に小さな手の形のポインタが 3 次元映像で浮かんでいることを認識してもらう。その後、ユーザ自身の操作でコンテンツが開始する。体験のハイライトの一つであるかき氷のシーン（図 4④～⑥）では、氷をけずるような振動とともにコントローラが冷たくなり、3 次元映像で飛び出したかき氷を自由に操作しつつ、ラボちゃんがイチゴシロップをかけるとイチゴの香りがする。その後の水風船を振って投げる（⑦⑧）、お茶の茶柱を見る（⑨⑩）、ブラウン管テレビのチャンネルを回す（⑪）などのシーンでは、ラボちゃんの言動に合わせてユーザがコントローラを動かしてくれるようにアニメーションやセリフを工夫した。コンテンツの体験時間は、操作に限らず一定時間とし、約 2 分 20 秒である。

4. 評価と考察

4.1 パーチャル物体の表示位置の精度

キャリブレーションによるバーチャル物体の表示位置の精度の改善を確認した。キャリブレーションでは、図 5(a) に示したマーク数 $I = 3$ のパターンを使用し、繰り返し回数 $J = 10$ とした。一連の処理にかかった時間は 50 秒程度であった。キャリブレーション完了後に、図 5(b) のようにパターンを任意の位置・姿勢にして、実マークの位置に対する仮想マークの表示位置を確認した。仮想マークの赤・緑・青色は各実マークに対応し、暗い色と明るい色はキャリブレーション前と後それぞれの表示位置の結果である。左右両方の視点で実マークと仮想マークの位置が近いほど表示位置の精度が高い。図 5(b) の例を含め、パターンの位置・



(a) 使用したパターン

(b) 精度改善の様子

図 5: キャリブレーションによる精度改善

姿勢を自由に変化させてもキャリブレーション後の方が精度が高かった。つまり、キャリブレーションにより正確な剛体変換行列 ${}^S M_D$ が推定できたとと言える。

4.2 システムのレイテンシ計測

モーションキャプチャ装置によるハプティックコントローラの位置計測開始から映像が表示されるまでの時間をレイテンシとして計測した。これは、コントローラを動かした時、その上にバーチャル物体が表示されるまでの時間が長くリアルタイム性が低いと、実在感を損なうためである。レイテンシの計測には、遅延時間測定ユニット（光パスコミュニケーションズ社 DPN2011B, DTMU）を使用した。この装置は映像撮像・伝送・表示システムで映像遅延時間を正確に測定するための機器である（仕様上の分解能は 1 ms）。可視光の発光ダイオード（LED）の点灯から光検出器（PD）でその光を検出するまでの時間差がレイテンシとなる。

この装置で本システムのレイテンシを計測するため、図 6(a) のように改修し、可視光 LED を赤外線 LED に変更するとともに、赤外線 LED を剛体として認識するように 3 個配置した。赤外線 LED を点灯させると、モーションキャプチャ装置は 3 個の LED を 3 個のマーカとして検出することで、1 つの剛体として認識する。剛体が認識されると、Unity により画面の表示を黒から橙色に変化をさせて、それを PD で検出する。以上によりレイテンシが計測できる。

図 6(b) のように、レイテンシ計測を 10 回行った結果、その平均は 15 ms であった。この計測では、コンテンツは使用せず、最小のレンダリング時間（1 ms 以下）となる別のプログラムを用いた。なお、コンテンツの映像のフレームレートは約 160 fps、ディスプレイのリフレッシュレートは 160 Hz であった。また、実際のコンテンツを使用して、著者らで体感としてのレイテンシを確認したが、意図的にコントローラを高速に動かさない限りは大きなレイテンシは感じなかった。

4.3 一般公開イベントでの展示

本システムを一般公開イベントである技研公開 2025 において展示した。今回使用した 3 次元ディスプレイは、6 歳未満の子供は 3 次元映像モードでは使用できない。また、香りについては敏感な方や苦手な方もいる。その中で、できるだけ多くの来場者に体験してもらうため、2 次元映像モードや香りの提示なしを選択できるようにした。結果として、5 日間において延べ 2357 名の来場者に体験していただいた。

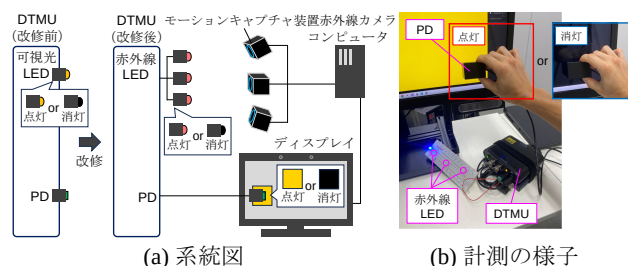


図 6: システムのレイテンシ計測

来場者からは「おもしろい」など好意的な意見が多かった一方で、「香りが残るのが気になる」などの意見もあった。

4.4 考察

筆者らでシステムとコンテンツに関する考察を行った。

まず、バーチャル物体の実在感を提示するために、本システムのようにハプティックコントローラ上に 3 次元映像でバーチャル物体を表示し、その振動・温冷覚や香りを提示するのは有効であると感じた。特に、実在感を提示する上で、ユーザが 3 次元映像を裸眼で観察できるという点は大きい。実際、2 次元映像に変更して同様の体験すると、実在感大きく低下した。また、映像について、実物体であるコントローラとバーチャル物体の位置関係の整合性の高さ、コントローラを動かした際のレイテンシが小ささは、実在感の提示において重要だと感じた。

次に、視覚・聴覚情報に加えて触覚や嗅覚などの多感覚情報を提示したことによる実在感の向上を感じた。一方で、同時に複数の感覚の情報を提示することにより、各感覚への注意が散漫になってしまう可能性があると感じた。

さらに、コントローラにボタンなどがなく複雑な操作や習熟が不要であり、位置・姿勢で直感的にバーチャル物体の操作ができる点も実在感の向上に寄与した可能性がある。

5. まとめ

3 次元映像、立体音響、振動・温冷覚、香りが提示可能な多感覚実在感提示システムを開発した。ハプティックコントローラとバーチャル物体の位置関係の整合性や一般公開イベントでの展示などの評価を通じてシステムの有効性を確認した。今後は、主観評価実験などにより、人が感じる実在感についても評価していきたい。

参考文献

- [1] M.Lombard, and D.Theresa : At the Heart of It All: The Concept of Presence, Journal of Computer-Mediated Communication, Vol. 3, No. 2, JCMC321, 1997.
- [2] 高木康博 : 立体映像とフラットパネル型立体表示技術光学, 光学, Vol. 35, No. 8, pp. 400-409, 2006.
- [3] R. T. Azuma : A Survey of Augmented Reality, Presence: Teleoper. Virtual Environ., Vol. 6, No. 4, pp. 355-385, 1997.
- [4] 玉木徹 : 姿勢推定と回転行列, 信学技報, Vol. 109, No. 203, SIS2009-23, pp. 59-64, 2009.