

# 適切なオプティカルフローを実現する 視覚提示法の研究 (第1報)

## - HMD 装着時の頭部回転運動に伴う遅延の補償手法 -

Study on Visual Display with Consistent Optical Flow (1st report)  
- A Method to Compensate Delay Caused by Head Rotation for Use with HMD -

柳田 康幸, 稲見 昌彦, 舘 暁

Yasuyuki YANAGIDA, Masahiko INAMI and Susumu TACHI

東京大学 大学院工学系研究科

(〒113 東京都文京区本郷 7-3-1, {yanagida, minami, tachi}@star.t.u-tokyo.ac.jp)

**Abstract:** A concept to improve the temporal quality of visual display by providing consistent optical flow of the displayed image is proposed. Based on this concept, a method to locally compensate the time delay of the image displayed through HMDs for the operator's rotational head motion is proposed, by using signals obtained by additional sensors.

**Key words:** optical flow, frame rate, time delay, head mounted display

### 1 はじめに

VRシステムにおける視覚提示の品質を向上させるには、フォトリアリスティックな画像の生成などの空間的な品質と、リアルタイム性の追求などの時間的な品質の双方から探求を行うことが重要である。しかし、現在の多くのシステムでは、仮想環境画像提示の時間的な品質は必ずしも十分とは言えないレベルに留まっている。

時間的な品質の制約となる一つの要因として、ダブルバッファによるフレームレートの問題が存在する。現在のVRシステムでは、多くの場合10Hz~20Hzのフレームレートで画像更新が行われている。このレートは、人間にとって世界が時間的に連続であると感じられるために十分な値ではない。グラフィックスシステムの性能が向上しても、より複雑な環境の提示が行われるため、フレームレートは必ずしも高速化されず、ほぼ一定にとどまる傾向が見受けられる。もう一つの要因として、操作者の運動や操作から視覚情報提示までの遅延時間の問題が挙げられる。VRシステムにおいては、計測デバイスの特性やグラフィックス画像生成、さらにはVRシステムを構成する要素間の通信のため、必ず遅延が発生する。低いフレームレートや大きな時間遅延は、HMDや全天周型スクリーンを利用する場合など、没入感の高い視覚提示を行う場合には操作者に対してストレスを感じさせる要因になっていると考えられる。

そこで本研究では、グラフィックス画像生成速度の向上とは独立に、等価的にフレームレートの向上と遅延時間の低減を行う手法を提案する。すなわち、提示される画像のオプティカルフローに着目し、離散的にのみ入手可能な画

像と補助的なセンサ情報を元に、操作者の頭部運動や仮想視点の移動速度などに対応して適切なオプティカルフローを持つ画像をリアルタイムで操作者に提示するという手法を提案する。現在までに、ハードウェア性能の限界に起因するフレームレートの問題への対策として Frameless Rendering の研究[1]が行われているが、これは画面上のピクセルをランダムに選択し逐次更新する手法であり、画面全体のオプティカルフローを正確に再現することはできない。

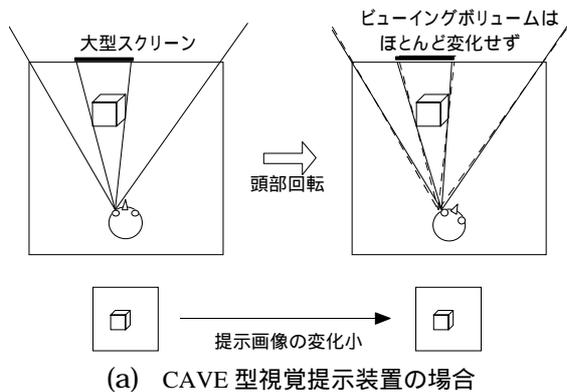
オプティカルフローを適切に提示することは、操作者の頭部運動感覚と視覚との融合を高いレベルで実現し、操作者の負担軽減をもたらすことが期待される。また、本手法は低速回線を経由するテレグジスタンス作業など、入手できる環境画像の高速な更新が不可能な場合にも適用可能である。本論文ではその第一段階として、HMD装着時の頭部回転運動に起因する均一なオプティカルフローに関して、高速なセンサ情報を用いて適切に補正を行い提示する手法を提案する。

### 2 HMDを用いる視覚提示の時間的問題点

HMDのスクリーンは頭部に対して固定されているため、操作者の頭部運動、特に回転運動に対応してリアルタイムに提示画像を更新することが必要である。この画像更新が真の意味でリアルタイムならば問題は生じないが、低いフレームレートや大きな時間遅延は頭部運動感覚との矛盾を生じ、臨場感を損なったり疲労を引き起こす原因となっている。

この問題を明確にするため、大型マルチスクリーンを

使用した CAVE[2]、CABIN[3]などの視覚提示システム(以下代表して CAVE と記す)との比較を行う。CAVE は非常に大規模なシステムであるが、その視覚提示効果は極めて良好であるという評価が定着しつつある。HMD に対する CAVE の優位な点としては、まず視野角の違いが決定的であり、これに関しては現在の HMD では到底太刀打ちできない。しかし、この他にも操作者の頭部運動に対する応答特性の違いが重要であると考えられる。



(a) CAVE 型視覚提示装置の場合

(b) HMD の場合

図1 操作者の頭部回転運動に対する画像更新

すなわち、CAVE ではスクリーンが操作者の頭部に対してではなく周囲の空間に対して固定されているため、スクリーンに投影するグラフィックス画像の生成に必要な情報はスクリーンに対する視点の位置のみである。従って、CAVE による視覚提示では操作者の頭部回転運動を検出しそれを反映したグラフィックス画像を生成する必要がなく、回転運動への対応は実際の空間がまさにリアルタイムに行っていると解釈される(図 1(a))。

これに対し、HMD の場合はスクリーンが空間に対してではなく操作者の頭部に対して固定されているため、操作者の頭部回転によりビューイングボリュームの位置が大幅に変化し、その結果画像が大きく流れることになる(図 1(b))。操作者の運動から画像提示までの遅延が存在すると、HMD では網膜上の像の流れが操作者の頭部運動による内部感覚と矛盾する状況が発生し、これが操作者の感覚へ悪影響を及ぼしていると考えられる。低フレームレート画像は世界が離散的に動いたり振動しているような感覚を生じ、遅延の存在するシステムでは世界全体が遅れてついでくるような印象を与える。

### 3 回転運動に関する HMD 提示画像の補正手法

#### 3.1 基本原理

上記のような問題に対処するためには、グラフィックスハードウェアを高速化して画像生成に伴う遅延を少なくするというアプローチも当然考えられるが、前述のようにグラフィックスシステムの高速度は必ずしもフレームレートの向上につながっていない。加えて、グラフィックスハードウェアのみを高速化しても、動作計測やその他の原因による遅延は解消されず、結局は一定の遅延が残ってしまうことになる。

本研究では、操作者の頭部回転運動に起因する提示画像の遅れをキャンセルする機構を導入することにより、HMD による視覚提示方式の弱点の一部を解消する手法を提案する。すなわち、操作者の頭部回転運動を検出する高速なセンサを用い、ローカルに画像遅れをキャンセルする。本手法は頭部回転運動により発生する画像全体の均一なオプティカルフローを的確に提示するものであり、人間の前庭動眼反射 (VOR) のメカニズムに適合する視覚提示を行うことも狙っている。

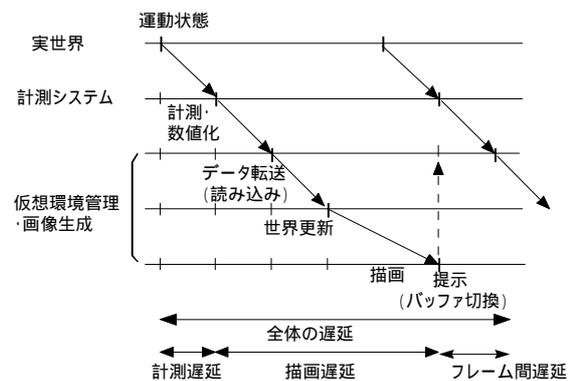


図2 VR システムにおける提示画像の遅延

#### 3.2 提示画像の遅延の分析

操作者に提示される画像は操作者の運動状態を反映しているが、操作者に提示が行われるまでの間に様々な遅延要素を含むため、画像が提示された時点では既に過去の状態を反映している。また、1枚のグラフィックス画像が提示されてから次の画像に更新されるまでの間はさらに遅れが重なることとなる。この様子を図 2 に示す。

動作発生から提示画像までの遅延をその性質により分類し、以下のように呼ぶことにする。

- 描画遅延: グラフィックスシステムでのループ時間。データ読み込み、世界計算、グラフィックス生成を含む。
- 計測遅延: 計測システムがデータを用意するまでの時間など、画像生成に使用される状態の時間から画像生成ループが始まるまでの時間の合計。
- フレーム間遅延: 最新の画像が提示されてから現在までの間の経過時間。

現在操作者に提示されている画像の遅延は、上記の 3 種類の遅延の合計となる。

### 3.3 回転角補正量の算出法

頭部回転運動の検出には、高速なジャイロを用いることを想定する。ジャイロは角速度センサであり、角度の絶対値を求めるには積分演算が必要である。このとき、ドリフトや積分誤差による誤差が蓄積するため、ジャイロによる計測データを積分した絶対角度情報として利用することは不利である。そこで、ジャイロの高速性を生かしつつ誤差の蓄積を回避するため、ジャイロが出力する角速度の短時間積分値のみを用い、画像が更新された時点で過去の積分値を破棄する手法を考案した。角度の絶対値に関する情報は通常の頭部位置・姿勢センサにより計測されており、ある遅延時間を伴ってグラフィックス画像に反映されるので、ここでは短時間の角度変化分のみを補償すればよい。

図3に頭部回転角の補正量算出の方法を示す。全補正量は、現在表示されている画像の計測遅延分、描画遅延分、およびフレーム間遅延分の合計である。これらのうち、計測遅延分と描画遅延分は一枚の画像が提示されている間は定数であり、フレーム間遅延分は現在の頭部回転角速度の積分値により実時間で変化する。

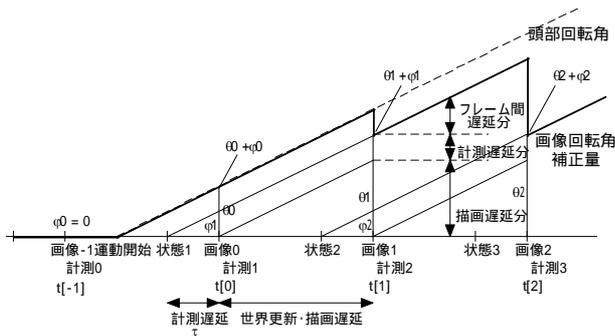


図3 頭部回転角補償量

### 3.4 実装手法の検討

画像提示の遅延を補償するため、グラフィックスハードウェアが生成した画像を、回転角の差を補正して画像生成の際に参照した頭部姿勢に対して正しい位置に提示する。これを行うための手段としては、以下のような選択肢が考えられる。

- (a) 2次元画像のシフトと回転による実装：単純な実装であり、ローカルなハードウェアでの処理に適する。グラフィックス生成に使用された運動状態の時点(運動時点と呼ぶ)と提示時点のビューイングボリュームの形が異なるので、特に周辺部において画像の歪みを伴う。しかしながら、ローカルハードウェア指向と処理の単純化により画像更新を高速に行うことが可能であると考えられる。
- (b) 2次元画像のシフト・回転+伸縮による実装：周辺部の画像歪みを低減するため、単純なシフトおよび回転に加えて、画像全体の伸縮を行う。画像全体を均一に拡大・縮小した場合はやはり画像歪みが生じるが、視野周辺部の誤差を小さく抑えることが

できる。非均一の拡大・縮小は、正確に行うと次のテキストチャマッピングと等価になる。

- (c) テキスチャマッピングによる実装：運動時点と現在の頭部方向・視点位置を比較し、現在の視点位置から見てスクリーンが運動時点のそれと一致するような三次元空間位置に提示を行う。この手法では原理的に画像の歪みは存在せず CAVE 型提示装置と同様の条件となる。これを行うにはテキストチャマッピングが有効であるが、テキストチャマッピングは高価なグラフィックスハードウェアを必要とし、かつリアルタイムでビデオ画像を取り込みテキストチャメモリへ転送するハードウェアが必要になる。また、処理をグラフィックスコンピュータで行うことになり、計測情報をコンピュータに読み込むための変換/通信オーバーヘッドが伴う。

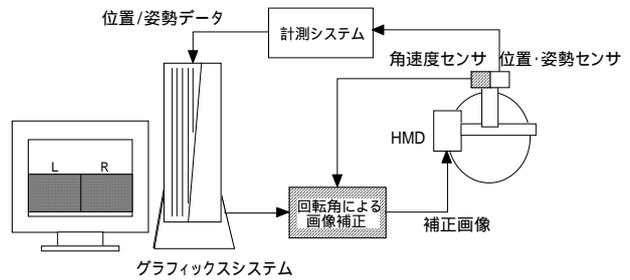


図4 回転角補正型 HMD システムの概念

手法(a)の場合はグラフィックスシステムによる画像生成部分には手を加えず、HMD 本体あるいはコンピュータとHMDの間に処理装置を挿入するという実装形態が可能になる。そのようなシステムを概念を図4に示す。この場合、さらに画像処理の方式に関して以下のような実装の選択肢が考えられる。その際、ビデオカメラの手ぶれ補正方式と対比させると興味深い。

- デジタル/電子的実装：画像を一旦メモリに取り込み、DSPなどで電子的処理を行う。A/D, D/Aの手間が増え、ビデオレートオーダーで遅延を挿入することになる(遅延量に加えておくことにより、補正は可能)が、自由度は最も高い。手ぶれ補正では「イメージエリア方式」に対応する。
- アナログ/電気的実装：走査線の原点調整などの手段により、画像提示デバイス上の画像位置を制御する。この手法では画像の回転には対応できず、yaw および pitch 方向のみの補正となる。
- アナログ/光学的+機械的実装：HMD スクリーン像の眼球に対する位置と方向を光学的に制御する。家庭用ビデオではジャイロとアクティブプリズムにより手ぶれ補正を行っており、「光学式(アクティブプリズム方式)」に対応する。

本研究では、できる限りローカルな処理が可能な実装方法を模索するため、以下では単純画像シフトによる手法の解析を行う。

#### 4 画像歪みの見積

単純画像シフトにより提示画像遅延を補正した場合、理想の場合(テキスチャマッピングによる実装)と比べてビューイングボリュームの形状が変形するので、画像上の点の位置誤差が発生する。

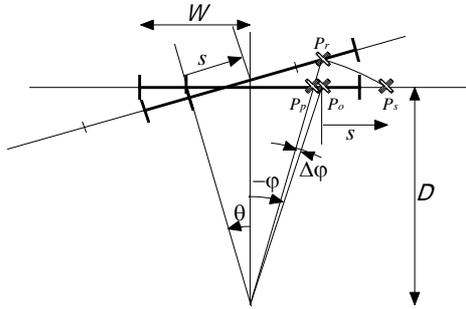


図5 画像シフトによる提示画像の歪み(角度誤差)

頭部が $\theta$ 回転した場合の画像シフトは、画像中心が元の位置に一致するように行うものとする。 $P_o$ は元の画像上の点の位置、 $P_s$ はそれを画像シフト量 $s$ だけシフトさせた点、 $P_r$ は視点を中心として $P_s$ を角度 $\theta$ 回転させた点、 $P_p$ は $P_r$ をスクリーン上へ投影した点である。 $P_o$ の座標を

$$P_o = \begin{bmatrix} x \\ D \end{bmatrix} \quad (1)$$

と定め、この点の視野中心からの見込み角を $\varphi$ とする。画像中心を一致させるためのシフト量 $s$ は

$$s = D \tan \theta \quad (2)$$

である。

提示画像の角度誤差を図5に示す。正しい位置の画像の振れ角を $\varphi$ とすると、この点の $x$ 座標は

$$x = -D \tan \varphi \quad (3)$$

であるから、シフトした点 $P_s$ の $x$ 座標、振れ角は

$$x_s = x + s = -D \tan \varphi + D \tan \theta \quad (4)$$

$$\varphi_s = -\tan^{-1} \frac{x_s}{D} = \tan^{-1} [\tan \varphi - \tan \theta] \quad (5)$$

である。これを回転させた画像上の点 $P_r$ は

$$\varphi_r = \varphi_s + \theta = \tan^{-1} [\tan \varphi - \tan \theta] + \theta \quad (6)$$

となる。よって画像歪みの角度は

$$\Delta \varphi = \varphi_r - \varphi = \tan^{-1} [\tan \varphi - \tan \theta] + \theta - \varphi \quad (7)$$

と計算される。補正なしの場合は一律に

$$\Delta \varphi_n = \theta \quad (8)$$

である。

仮に操作者が $90 \text{ deg/s}$ の速度で頭部を回転させ、グラフィックスシステムが毎秒10フレームで描画を行っているとする、回転角補正量の最大値 $\theta$ は(描画遅延とフレーム間遅延を合わせて)18 deg.である。この場合の角度誤差を図6に示す。図に示すように、この値は回転前のスクリーン中心( $\varphi = 0$ )と回転後のスクリーン中心( $\varphi = \theta$ )

において0となっており、この間の角度誤差が小さく抑えられている。このため、操作者が画像中心付近を注目している場合には有効な補正手法であると考えられる( $\varphi = 9 \text{ deg.}$ において、補正なし 18 deg.に対して補正あり 0.45 deg.)。

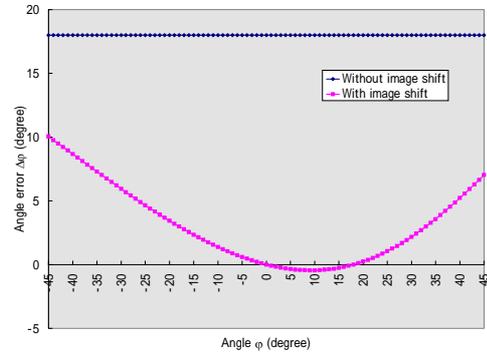


図6 頭部回転運動による画像ずれ角の見積：  
頭部回転速度 90 deg/s, 10 fps

#### 5 実験

本手法の原理を確認するため、グラフィックスワークステーション上でシミュレーションを行った。ビデオレート以上の速度で仮想環境画像の更新が可能なシステム(SGI Indigo2 Maximum IMPACT)を用い、低フレームレート画像の生成は適切な待ち時間を挿入することによりシミュレートした。その結果、画像シフトによる実装では離散的な元画像を用いることによる歪みは存在するものの、画像全体の流れはビデオレートでの画像更新と遜色ない挙動が確認された。

#### 6 むすび

オプティカルフロー提示の考え方に基づき、HMD装着時の頭部回転運動に起因する提示画像遅れを補償する手法を提案した。今後は実際にHMDを含むシステムを構築し、手法の評価を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] G. Bishop et al.: Frameless Rendering: Double Buffering Considered Harmful, Proc. of SIGGRAPH '94 (1994)
- [2] C. Cruz-Neira et al.: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE, Proc. of SIGGRAPH '93, pp.135-142 (1993)
- [3] 廣瀬, 小木, 中井, 山田: 没入型多面ディスプレイ(IMD)上での仮想モデルの生成に関する研究, 日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, Vol.1, pp.147-150 (1996)