This article is a technical report without peer review, and its polished and/or extended version may be published elsewhere.

第 26 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集（2021 年 9 月）

球体姿勢に対応した回転相殺テクスチャの高速投影の残像効果による一軸回転可視化法の提案

三河 祐梨 [1)]，末石 智大 [1)]，石川 正俊 [1)]
Yuri MIKAWA, Sueishi TOMOHIRO, and Masatoshi ISHIKAWA

1) 東京大学 （〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, yuri_mikawa@ipc.i.u-tokyo.ac.jp）

概要: 近年，空間型拡張現実ディスプレイにより運動情報を空間的かつリアルタイムに提示し，人間への直感的なスポーツ教示を試みる研究が活発である．しかし，回転情報のリアルタイム提示にあたって，推定の精度と速度のトレードオフの問題があった．そこで本研究は，回転相殺テクスチャの姿勢変化対応の高速投影の残像効果による，球体の１軸回転の図形的な可視化手法を提案する．実機投影による評価により本提案の妥当性が確認された．

キーワード: 高速プロジェクションマッピング，回転可視化，残像ディスプレイ，拡張現実感，スポーツ支援

1. はじめに

近年プロジェクションマッピングや空中像等の空間型拡張現実ディスプレイが発展する中で，その空間提示性やリアルタイム性に着目し，スポーツ等のダイナミックな状況下におけるリアルタイムな運動情報提示に利用する動きが高まっている．たとえば，シースルー型ヘッドマウントディスプレイを通して，飛び跳ねるボールの予測軌道を可視化する手法 [1] や，ゴルフスウィングの軌道を床面上にプロジェクションマッピングにより可視化する手法が提案された [2, 3]．これらは，従来の運動の計測情報の重畳結果を平面モニタに映す，タブレット端末に見に行く等といった非空間的かつ非同期的な情報享受と比較して，空間的表現により直感的に情報を受け取り，リアルタイムな自身挙動と比較しながら情報を理解できる点で有用だと考えられる．

先述の例は三次元的な軌道，すなわち並進情報の可視化である一方で，本研究では回転情報の可視化について考える．そして対象物体には，特にバスケットボール，バレーボール，野球，卓球など，多くのスポーツで使われる物体である球体に着目する．球体の回転可視化の試みはかねてから行われているが，回転速度とは相対的な情報，すなわちは常に前時刻フレームにおける対象物体の姿勢に対する相対姿勢から計算されるため，リアルタイム性と推定精度はトレードオフの関係にある．投球後に蓄積した時系列データから運動情報を高精度に推定する民製品が現れているが，投球後に逐一タブレット端末に確認しに行くなど，非同期性による利用の煩雑さが問題になる [4]．他方で，高い時間分解能の姿勢情報の時系列データからの簡易的な推定は，リアルタイム性を損ねない一方で，ノイズの多い推定となる [5]．また，マーカレスに高速・高精度な回転推定を行う手法は，特定の状況を仮定するものであり，ダイナミックな状況に不向きである [6]．

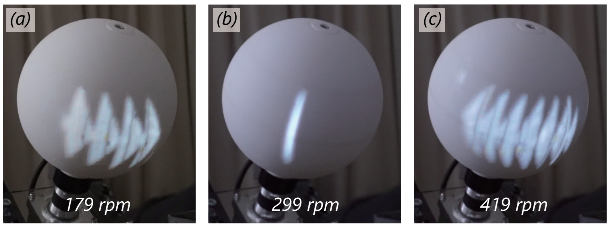

図 1: 提案する回転相殺テクスチャの高速投影の残像効果による回転可視化の様子．テクスチャ設計に用いた目的の回転数を R_{target}，実際の球体の回転数を R_{real} とすると，(a) $R_{real} < R_{target}$，(b) $R_{real} = R_{target}$，(c) $R_{real} > R_{target}$ の場合を示している．

そこで本研究は，計算機側で回転速度の推定処理を必要とせず，物体の姿勢を高速にトラッキングしながら即座に高速投影をするだけで，テクスチャの残像により回転可視化を実現するような手法を提案する．具体的には，回転相殺を意図したテクスチャの高速投影により，目的の回転数と実際のそれがずれて回転相殺がしきれなかった場合に，差分量が図形的に表現される手法である．投影テクスチャは，特定の回転数で回転相殺がなされるように，提示時刻毎に僅かにずらした位置に縦棒を描画したものとする．

たとえば，球体の実際の回転数が目的の回転数と一致する場合は，図 1 (b) に示すように，縦棒がすべて重なる一方で，異なる場合は，図 1 (a) や (c) に示すように，差分量に応じて大きさや向きの変化する図形が現れ，目的の回転速度からの差分を図形的に表現できる．図 1 では単純な三角形の大きさ・向きでの表現だが，本提案の回転相殺テクスチャの設計に関する原則さえ守れば，テクスチャは自由にデザイン可能である．

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会

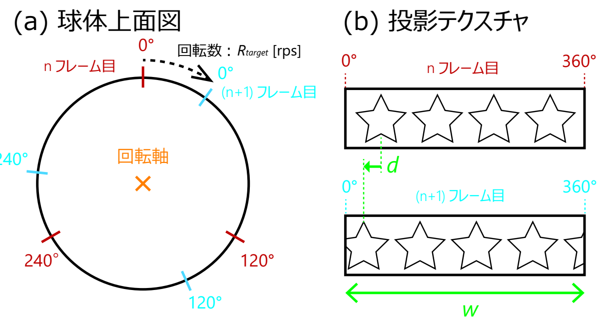

図 2: 回転相殺テクスチャの基本原理の概要.

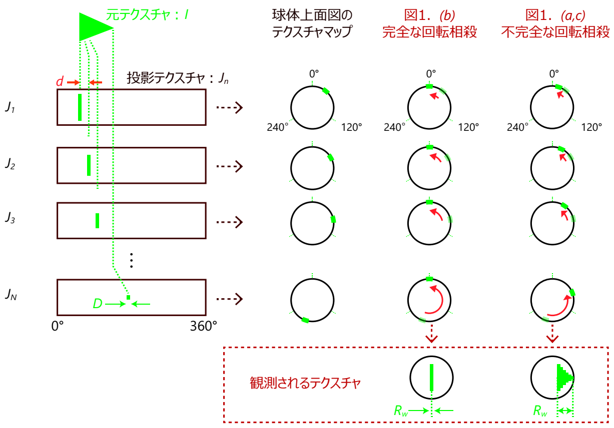

図 3: 本提案の高速投影の残像により回転可視化を行う回転相殺テクスチャの設計手法の概要.

本研究では，このような手法を試みる第一段階として，回転軸はある 1 軸で既知とする．本手法は，カーリングやフリスビー等，1 軸回転を前提とするスポーツへの応用が期待される．

2. 先行研究

本研究と同様に回転を分かりやすく見せる一般的な手法に，物体を実際の回転速度よりも低頻度で照らし，回転を遅く見せるストロボ効果がある．これは物体自身のテクスチャを積極的に利用する一方で，本研究は投影パターンを利用する点で異なる．

また，本研究と同様に高速プロジェクタを利用し，並進移動の速度をキャンセルするような残像ディスプレイが Ikeda らにより提案された [7] が，本研究は回転速度をキャンセルする点でこれとは異なる．

3. 回転相殺テクスチャの基本原理

まず，本提案手法を遂行するにあたって，基礎となる回転相殺テクスチャ，すなわちある回転数で静止して見えるといった，回転を相殺するような投影テクスチャの基本原理を，図 2 を参照しながら確認する．なお，3. 節，4. 節で述べる回転数の単位はすべて [rps] とする．

回転対称体に対し，回転数 A で回転して提示されるテクスチャを投影しながら，それが逆方向に回転数 B で回転するとき，観測されるテクスチャの回転数は $A - B$ となる．

そして，目的の回転数を R_{target} [rps]，投影のフレームレートを f [fps]，物体の回転軸周りに全周囲に貼る画像の回転方向の画素数を w [px] とすると，回転相殺に必要なテクスチャの移動画素数 d [px] は以下のように表される．

$$d = -\frac{wR_{target}}{f} \quad (1)$$

目的の回転数 R_{target} に対してこの数式を用いて任意のテクスチャを設計し，投影することで，その回転数近傍で回転する物体で当該テクスチャが観測可能である．より詳細には，図 2 (a) に示すように，球体の回転姿勢に対応しながら，(b) フレーム毎に d ずらしたテクスチャを投影することで，物体自身の回転が相殺されるようにテクスチャが観測される．実際の物体の回転数を R_{real} とすると，$R_{real} = R_{target}$ の場合はテクスチャが静止し，$R_{real} \neq R_{target}$ の場合は投影テクスチャが流れていく．ここで，本研究の目的である R_{real} が R_{target} に対しどの程度離れているかの認識は，テクスチャの流れる速度という時間の兼ね合いからのみ可能だが，人の目で時間依存の観測から正確にそれを理解することは難しいと考えられる．

4. 提案手法：残像による回転可視化

4.1 原理

ただの回転相殺テクスチャでは目的の回転数からの差分の認識が難しい問題に対して，本節では，テクスチャの高速投影により残像を引き起こすことでそれを図形として表現し，理解を容易くすることを考える．

具体的な手法としては，図 3 に示すように，n 番目の投影テクスチャ J_n に対し，元のテクスチャ画像 I から，横方向に n 画素目の縦長画像（以下縦棒と呼ぶ）を切り出し，フレーム毎に d [px] ずつずらして提示する．具体的には，以下のように立式される．

$$J_n(x, y) = \begin{cases} I(n\%N, y) & if \ |x - \frac{mw}{M} - nd| < \frac{D}{2}, \\ & m \in [0, M-1) \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

D は投影テクスチャに描画する縦棒の横幅を表す．横幅を持たせることで，観測される残像の輝度を向上できるほか，回転数差により残像が広がった場合に，残像の領域がとびとびになるのを防ぐ．他方で横幅が大きすぎると，意図したテクスチャとやや異なる投影結果が見込まれる．

N は残像をもたらすための連続投影テクスチャのフレーム数であり，元テクスチャ I のサンプリング数でもある．人間が残像を観測可能な時間を T [ms] とすると，$N = fT$ と試算される．これは，投影フレームレート f が高いほどより密なサンプリングが可能であるといえる．たとえば，$T = 20[ms]$ としたときに，1000fps では $N = 20$，500fps では $N = 10$ 等，高い投影フレームレートであるほど高いサンプリング数が可能である．他方で，60fps では $N = 1.2$，すなわち投影枚数は 1 枚に限定されるというように，遅い

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会

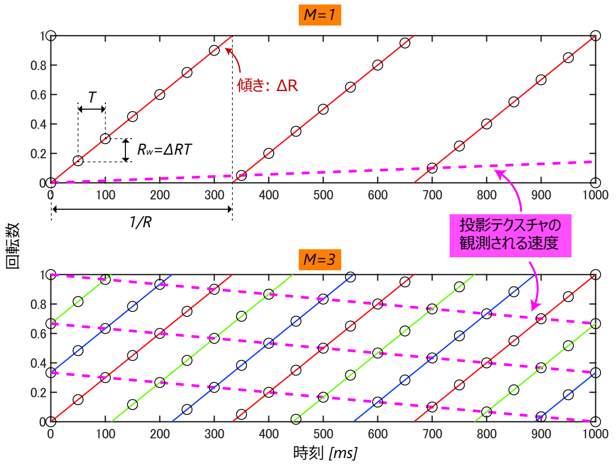

図 4: テクスチャの繰り返し数 $M = 1, 3$ の場合の，投影テクスチャの観測される速度の違いを表す時間遷移のグラフ．◯ のデータ点は連続投影されるテクスチャの初頭の位置を示す．

フレームレートではサンプリング数が足りず，回転速度の変化に伴う図形的変化が実現不可能である．

M は投影画像内での元テクスチャの繰り返し数であり，$m \in [0, M)$ は繰り返し番号を示す．次節で説明するように，これは投影テクスチャの明るさや流れる速度に影響する．

4.2　残像の見え方の考察

目的の回転数 R_{target} と実際のそれ R_{real} が不一致の場合に，投影テクスチャは相殺しきれず，元のテクスチャを表すように広がった形で残像が観測される上に，$\Delta R = R_{real} - R_{target}$ の回転数で，球体上を回転方向に流れるように移動する．これらのパラメータには先述のテクスチャの繰り返し数 M も寄与する．

本節では，図 4 に示すテクスチャの時間遷移グラフの例を参照しながら，本提案の残像の特性を考察する．

4.2.1　残像の大きさ

図 4 に示すように，１つのテクスチャを表す残像の横幅を回転数で示したもの R_w は，ΔR を利用して以下のように計算される．

$$R_w = \Delta RT \tag{3}$$

この式から，目的の回転数と実際のそれとの差は図形的に観測できることがわかる．

4.2.2　残像の流れる速度

投影テクスチャの遷移する速度自体は ΔR であるが，実際に残像として人間に知覚される速度はやや異なる解釈が必要である．図 4 に示すように，ΔR が数 rps 程度であれば，１回の回転時間は残像の知覚時間 T の数倍から十数倍である．つまり，数個から数十個分の元のテクスチャが球体の全周囲に横並びに，$1/R$ [s] の時間間隔で繰り返して現れることになり，複数個のテクスチャが点滅しながら静止する，あるいは少しずつ移動するようなテクスチャが想定される．また，その速度はテクスチャの繰り返し数 M にも影響を受ける．たとえば，図 4 に示すように，$M = 1$ の場合と $M = 3$ の場合とで知覚される速度は異なると考えられる．

残像の知覚は個人差があり，テクスチャの実際の移動速度は正確には求まらないが，せいぜい数 rps 程度未満と考えられる．というのも，図 4 により移動速度はたかだか $M\Delta R/2$ 程度と考えられる一方で，ΔR や M が大きいと残像の移動速度が高速になり，かえってそれが残像として観測されるため，人間にとっては高速移動と知覚されなくなるからである．

4.2.3　残像の明るさ

ΔR が比較的小さいときは，先述のように残像は点滅して観測される．他方で，テクスチャの繰り返し数 M や ΔR が大きな値を取り，それらが重なって残像として知覚されたときは，重なる回数に比例して残像は明るくなる．実際の明るさは残像継続時間 T にによって決まり，個人差がある．

5.　評価実験

5.1　実験装置

本実験の投影装置には，プロジェクタ，カメラ，赤外光の光軸をビームスプリッタやホットミラーで同軸化する投影システムを用いた．高速プロジェクタには東京エレクトロンデバイス社の DynaFlash（1,000 fps, 最小遅延 3 ms, 1024×768 px），高速カメラは Photron 社の IDP Express R2000 (500 fps, 512×512 px, モノクロ）赤外照明はレイマック（旧イマック）社のコリメート光（IBF-LXS30AIR-850，波長 850nm）を用いた．カメラレンズは，Computer 社の M2514-MP2（焦点距離 25 mm）を用いた．計算機には Dell Precision 7910 (Windows 10, 64 bit, CPU: Intel Xeon Gold 5118, 32 GB memory）を用いた．評価用カメラには SONY α6000 (60 fps) を用いた．

球体はナイロン製で，直径 150mm であり，マーカには再帰性反射材を用いた．ドットマーカは直径 3.5mm の円形で，球体に内接する正二十面体の頂点および各面の中心，合計 32 点に貼り付けを行った．これは単一カメラからの半球面で最低 6 個が観測される配置であり，Perspective-n-Points 問題 [8] を解いて姿勢推定を行うのに十分な数である．球体の回転モータにはオリエンタルモーター社の NX620AA-2 を用い，治具を用いてモータと球体の回転軸が合致するように固定した．球体はシステム前方から約 1.45 m 離して設置した．

5.2　残像投影による図形変化の評価

本実験では，提案した残像投影テクスチャにより回転数に応じて異なる図形が現れる様子を確認する．なお，テクスチャの意図する回転数は 300 rpm (5 rps) としたが，実際に静止して観測される球体の実際の回転数 R_c は 299 [rpm] から 300 [rpm] の間にあった．これは，計算機の制御精度や同期ずれに起因して起こるものであり，図形的変化は回転数に対する差分の回転数，すなわち相対値に起因するため問題ないと考える．回転軸は，5,000 ms，すなわち 2,500 点の姿勢情報の時系列データにより事前に推定された．

球体を $299 \pm 0, 120 = 179, 299, 419$ [rpm] の回転数で，

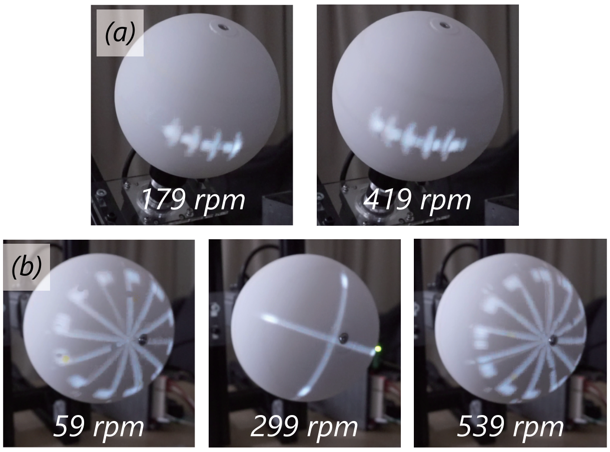

図 5: 本提案のデモンストレーション．(a) 原理に沿ってテクスチャ設計することで，自由なテクスチャを提示可能であり，その例として，回転方向によって矢印の方向が異なる様子．(b) 回転軸方向に投影し，１軸回転面で回転可視化を行う様子．

球体上面から見て時計回りに回転させ，$M = 3$ の繰り返し数でテクスチャを提示した様子を 60fps で撮影し，その映像を 5~6 枚重ね合わせたものを図 1 に示す．実際の回転数が 299 rpm と等しい場合は (b) のように重ね合わさる様子が観測された一方で，異なる場合は (a),(c) のように，異なる方向を向く三角形のテクスチャが現れる様子が観測された．(a),(c) は回転数の差が等しい一方で，(a) より (c) の方がテクスチャの幅がやや短いのは，(a) よりも (c) の方が 300 rpm に近く，回転相殺の量が大きいためと考えられる．また，(a),(c) でところどころ縦線の空白箇所が現れる，(b) で時折縦線が左方向に移動するといった場合が見受けられたが，これは投影システムの同期やクロックの精度に依存するものと考えられる．これらの考察から総合して，式 (3) の妥当性が概ね確認された一方で，投影システムの改善が必要だと考えられる．

6. デモンストレーション

本提案によるデモンストレーションを図 5 に示す．(a) は，式 (2) に則って，サンプリング数 N の制約下で自由にテクスチャを設計できる一例として，矢印で提示したものである．(b) は，本研究の１軸回転の可視化がカーリング等の床面で回転する物体のスポーツに応用できる例として，球体でそれを模した様子を示している．

7. 結論と今後の展望

本研究では，1 軸回転する球体に対し，回転相殺テクスチャの球体姿勢に合わせた高速投影を用いて，残像効果により目的の回転数からのずれを図形的に可視化する手法を提案した．そして，実際に投影した様子から本提案の妥当性を確認した．今後は，ハードウェアの同期やクロック精度の改良による精細な映像提示や，被験者実験による本提案テクスチャの理解の容易さの妥当性の評価，複数軸回転の可視化の可能なテクスチャの考案を試みる．

参考文献

[1] Yuta Itoh, Jason Orlosky, Kiyoshi Kiyokawa, and Gudrun Klinker. Laplacian Vision: Augmenting Motion Prediction via Optical See-Through Head-Mounted Displays. In *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference 2016*, p. 16. ACM, 2016.

[2] Atsuki Ikeda, Yuka Tanaka, Dong-Hyun Hwang, Homare Kon, and Hideki Koike. Golf training system using sonification and virtual shadow. In *ACM SIGGRAPH 2019 Emerging Technologies*, pp. 1–2, 2019.

[3] Tomohiro Sueishi, Chikara Miyaji, Masataka Narumiya, Yuji Yamakawa, and Masatoshi Ishikawa. High-speed projection method of swing plane for golf training. In *Proceedings of the Augmented Humans International Conference*, pp. 1–3, 2020.

[4] Robert J Leach, Stephanie E Forrester, AC Mears, and Jonathan R Roberts. How valid and accurate are measurements of golf impact parameters obtained using commercially available radar and stereoscopic optical launch monitors? *Measurement*, Vol. 112, pp. 125–136, 2017.

[5] Yuri Mikawa, Tomohiro Sueishi, Yoshihiro Watanabe, and Masatoshi Ishikawa. Projection mapping system to a widely dynamic sphere with circumferential markers. In *2020 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, pp. 1–6. IEEE, 2020.

[6] Yuta Imai, Shingo Kagami, and Koichi Hashimoto. Estimation of a large relative rotation between two images of a fast spinning marker-less golf ball. In *2016 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, pp. 556–561. IEEE, 2016.

[7] Haruka Ikeda, Tomohiko Hayakawa, and Masatoshi Ishikawa. Bilateral motion display: Strategy to provide multiple visual perception using afterimage effects for specific motion. In *25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, pp. 1–5, 2019.

[8] Richard Hartley and Andrew Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge university press, 2003.

© 2021 日本バーチャルリアリティ学会