

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 2 日現在

機関番号：12608
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2012～2014
課題番号：24650052
研究課題名(和文) パーティクル型立体ディスプレイに関する研究

研究課題名(英文) A study on volumetric particle display

研究代表者

小池 英樹 (Koike, Hideki)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：70234664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：3次元空間を浮遊する複数の小粒子を高速度カメラによって1個1個実時間追跡し、それぞれに異なる映像を投影するシステムを開発した。カメラとしては6台のモーショントラッキング用カメラ(250fps)を用いることで、隠れに強い3次元追跡を実現した。粒子の速度が大きい場合、単純な追跡と投影では投影の遅れが生じる。そこで、カルマンフィルタによる予測モデルを導入し、粒子の位置を予測し投影することでこの問題の解決を行った。

研究成果の概要(英文)：We developed a system which tracks multiple flying objects in 3D space in real-time and projects particular information onto each object. Six motion capture cameras (250fps) were used to track objects with less occlusion problem. When speed of the object is fast, the projection is delayed. We introduced a prediction model with Kalman filter and succeeded to minimize this issue.

研究分野：vision-based HCI

キーワード：立体ディスプレイ パーティクル

1. 研究開始当初の背景

これまで様々な3次元ディスプレイが開発されてきた。偏光メガネ方式、裸眼立体視方式、Integral Photography方式などは両眼視差を利用して立体感を与える。しかし、投影面は2次元平面であり、横や後ろなど任意の方向から立体映像を見ることはできない。回転スクリーン方式は立体映像を空間的に表示できる。しかし、スクリーンが高速に回転しているため、立体映像に触れることはできない。Fog Screenは空中に霧の層を発生させ、プロジェクタからその層に映像を投影することで映像を結像させている。Barnumらの”A multi-layered display with water drops”は水滴の落下とプロジェクタからの映像を同期させるディスプレイである。しかし、正確には3次元ではなく、複数レイヤの2次元映像のディスプレイである。

2. 研究の目的

本研究課題では、空間に浮遊する微小粒子(パーティクル)を高速度カメラで実時間追跡し、各粒子の3次元位置に応じたピクセル値をレーザー・プロジェクタで投影することで、物体の「真の」立体投影を可能とするパーティクル型立体ディスプレイに関する研究を行うことを目的とした。

本研究では、任意の方向から観察可能でかつ触れることが可能な、空間に浮かび上がる立体ディスプレイに関する基礎研究を行う。基本原理は次のとおりである。

- (1) 微小粒子を3次的に空間的に浮遊させ、
- (2) 浮遊する微小粒子の位置を高速に実時間追跡し、
- (3) 次の時刻の微小粒子位置を予測し、
- (4) 予測された位置に対応するピクセル値を表示する。

3. 研究の方法

(1) システム構成

実装したシステム構成を図1に示す。投影対象となるボール、そのボールを動かす空間を囲むように配置した6台のモーショキャプチャカメラ(NaturalPoint OptiTrack S250e)、ボールの位置の計測・追跡を行うソフトウェア(NaturalPoint TrackingTools Ver. 2.5)、プログラムなどの処理をするPC(Lenovo ThinkPad T530, Intel Core i7 2.9GHz, 8GB RAM, Windows7 Service Pack 1)、映像を投影するプロジェクタ(BenQ W1070, 60Hz, 1280 x 720pixel)で構成される。カメラ、PC、ソフトウェア、プログラム間のデータ転送はUDP通信で行われる。カメラとプロジェクタは事前にプロジェクションマトリクス(座標変換行列)を求めることで、投影対象に映像を投影することができる。

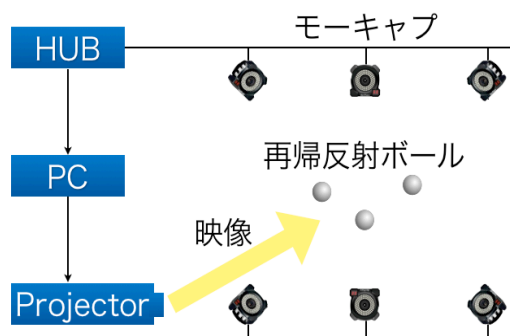


図1: システム構成

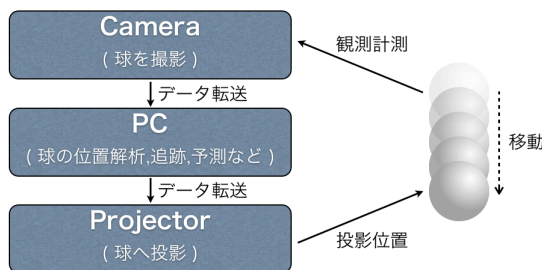


図2: 遅延問題

(2) 位置推定と運動モデルによる軌道予測

システムはボールを検出してからそれに投影するまでの間、装置の処理時間やデータの転送時間などの遅延が発生する(図2)。そこで、追跡しているボールの状態から軌道を予測することで遅延の対策をする。また、ボールの状態はノイズの影響を減少させるためにカルマンフィルタを用いる。カルマンフィルタは、次々と得られるボールの座標データを用いてボールの状態(位置, 速度, 加速度)を統計的に推定することができる。

kフレーム目の物体の状態を3次元の位置, 速度, 加速度ベクトルで表すと、状態ベクトルは以下の式となる。

$$\mathbf{x}_k = (\mathbf{p}_k^T, \dot{\mathbf{p}}_k^T, \ddot{\mathbf{p}}_k^T)^T$$

ボールの運動を等加速度運動と仮定した時、状態モデルは以下の式ようになる(wはシステムノイズ, Iは3x3の単位行列, Δtはデータの取得周期)。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{p}_k \\ \dot{\mathbf{p}}_k \\ \ddot{\mathbf{p}}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \Delta t \mathbf{I} & \frac{1}{2}(\Delta t)^2 \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} & \Delta t \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{k-1} \\ \dot{\mathbf{p}}_{k-1} \\ \ddot{\mathbf{p}}_{k-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix}$$

観測マトリクスHは以下の式とし、物体の位置のみを観測する。

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I} \ \mathbf{0} \ \mathbf{0}]$$

これらの式を用いて予測と修正のフェーズを繰り返すことで、ボールの状態を推定する。

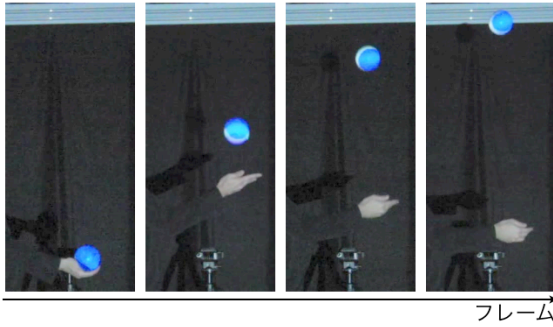


図 3 : 投影の様子

推定した値はシステム全体の遅延時間を ΔT として、以下の式の運動モデルに状態を代入することで軌道の予測をする。

$$p_{k+1} = \frac{1}{2}\ddot{p}_k\Delta T^2 + \dot{p}_k\Delta T + p_k$$

4. 研究成果

図 3 に実装結果を示す。投げ上げているボールに合わせて青色の映像が投影されている。ここで、ボールにどの程度の映像が正確に投影されているかを、システム外部のカメラ (CASIO EXILIM EX-FC150) を用いて評価する。評価の尺度として、カメラからみたボール全体の面積 (半球) に対する、投影部分の面積の割合を投影精度と定義する。例えば、投影された面積がボール全体ならば投影精度は 100%, 全く投影されていないならば 0% である。

評価方法は、ボールを投げ上げてからつかむまでの一連の運動を 120FPS で撮影し、後から画像処理をすることで投影精度を算出する。システム全体の遅延時間は 56ms と任意に設定し、直近の 3 フレームから状態を算出し単に運動モデルを適用した場合と、カルマンフィルタと運動モデルを組み合わせた場合の軌道予測を比較する。

それらを比較した結果を図 4 に示す。横軸がフレーム数 [frame], 縦軸が投影精度 [%] である。グラフ全体を通してカルマンフィルタを適用したほうが投影精度が高い。

結果の様子を肉眼で見ると、ボールの速度が速くなるにつれて、投影映像のちらつきを感じる。これは、ボールの運動が連続的であるのに対し、プロジェクタのリフレッシュレートが 60 Hz と不連続であるためである。評価ではカメラの設定を 120FPS で撮影したので、カメラからみると投影映像は 2frame に 1 度更新される。これにより、図 4 の一部で投影精度が振動している。本システムは 3 個程度のボールであれば安定して投影できるが、更にボールの数が増えると、その分だけ各ボールへの投影映像が不安定になることがこのような問題を解決するために、柔軟な状態推定のできるパーティクルフィルタの導入や複数のボールデータから全体をシミュレーションするような工夫が必要である。ただし、実際にパーティクルフィルタを実装したと

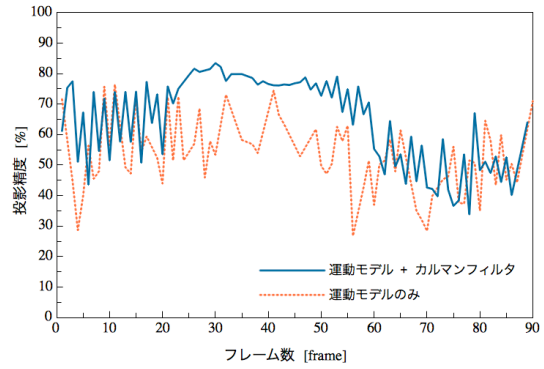


図 4 : 投影の精度



図 5 : 複数物体への投影

ころ、十分な推定値を実時間的に算出することができなかつたので高速化が必要である。

本研究の最終目的はパーティクル型ディスプレイの開発であるが、本研究で開発した実時間追跡・予測・投影システムは他の分野へも応用が可能である。図 5 はジャグリングへの応用で、空中に投げられたボールにグラフィックスがアニメーションとしてほぼ正確に投影されている。

なお、本研究結果は国内外の学会で発表され、特に 6th Augmented Human International Conference (AH' 15) では Best short paper award を受賞した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 0 件)

[学会発表] (計 2 件)

Hiroaki Yamaguchi and Hideki Koike: LumoSpheres: Real-time tracking of flying objects and image projection for a volumetric display, Proc. on 6th Augmented Human International Conference (AH'15), 2015/3/10-12, 「Marina Bay Sands Expo and Convention Center, Singapore (Singapore)」, 査読有, ACM, 93-96, 2015. DOI [10.1145/2735711.2735824](https://doi.org/10.1145/2735711.2735824), **Best Short Paper Award**

山口裕明, 小池英樹: LumoSpheres: 複数浮遊物体の実時間追跡にもとづく映像投影, 日本ソフトウェア科学会 WISS 2013, 2013 年 12 月 5 日, ザクラウンパレス新阪急高知 (高知県高知市) 査読有, 2013.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

○取得状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小池英樹 (KOIKE, Hideki)

東京工業大学・大学院情報理工学研究科・
教授

研究者番号：70234664

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：