

残像を利用したボールの3次元軌跡の計測

高野橋健太[†] 眞鍋 佳嗣[†] 安室 喜弘[†] 千原 國宏[†]

[†] 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5

E-mail: †{kenta-t,manabe,yasumuro,chiara}@is.naist.jp

あらまし ボールスポーツの本質はボールの行方を観察することである。戦術分析においても、従来から、競技の様子をビデオカメラで撮影し、その映像から計測した時系列のボールの3次元位置データを利用することが行なわれている。一般にボールの3次元位置計測はステレオ法が用いられるが、ボールは高速移動するため、ブレの無い（シャッタースピードが速い）同期の取れた高速レートの多視点映像が必要である。そこで、逆にシャッタースピードを遅くして映像にボールの軌跡を故意に残し、多視点から撮影された軌跡を空間に投影して共通部分を計算することで、3次元軌跡を求める手法を提案する。本手法によりカメラ間の同期を取らなくてもボールの3次元位置が計測可能となるだけでなく、フレーム間のボールの3次元軌跡も決定可能になる。つまりステレオ法では時間的に離散な3次元位置しか計測できなかったが、本手法では連続な3次元軌跡が計測可能である。このようにして求めたボールの3次元軌跡には時間情報が付加されていないが、映像のフレームが切り替わる瞬間のボールの位置から、時間情報を付加することもできる。本稿では、本手法の詳細を説明した後、実際に本手法を卓球に適用した結果を示し、その考察を行なう。

キーワード 3次元軌跡, 非同期ビデオカメラ, シャッタースピード, 視体積交差法

Measurement of 3D Ball Trajectory by Motion Blur

TAKANOHASHI KENTA[†], MANABE YOSHITSUGU[†], YASUMURO YOSHIHIRO[†],
and CHIHARA KUNIHIRO[†]

[†] Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology
8916-5, Takayama, Ikoma, Nara 630-0192 JAPAN

E-mail: †{kenta-t,manabe,yasumuro,chiara}@is.naist.jp

Abstract This paper proposes a new method of measuring a 3D trajectory of ball. Our proposed method does not need high-speed video cameras and synchronized video cameras to measure the 3D ball trajectory, and it enables to measure a continuous trajectory between shutter timings. Our approach is that a 2D ball trajectory appears on each image by slowing down shutter speed of camera, and the 3D ball trajectory can be computed using shape of silhouette method from intersection of inversion projected the images. The estimated 3D trajectory does not have time stamp information. The time stamp information is given according to a correspondence between 3D trajectory and the position of ball in images when video frames are switched. This paper describes details of our method and experimental results applied our method to table tennis.

Key words 3D trajectory, asynchronous video camera, shutter speed, shape from silhouette

1. はじめに

ボールの3次元軌跡の計測は、従来からスポーツ科学の分野で行われてきた。ボールスポーツにおいてボールの行方に注目することは至極当然のことであり、特に戦術分析にはボールの軌跡データは必須である。そこで、ビデオカメラ映像からボールの位置を目視決定した後、三角測量を行なうことでボールの3次元位置データが算出されてきた[1]。この作業をコンピュータビジョン技術を用いて自動化することを考える。

一般的に、ボールの3次元位置はステレオ法で求められる。しかし、ステレオ法は同期の取れた多視点映像が必要である。また、ボールが高速移動する場合は、高速ビデオカメラを用いる必要もある。このように、ステレオ法でボールの3次元位置を計測するためには特殊な機材が必須である。また、映像のシャッタータイミング間にどのようにボールが移動したかを計測することは難しく、何らかの補間を行なって軌跡とみなすことが一般的である。しかし、補間した軌跡と真の軌跡は基本的に一致しない。典型的な例を挙げれば、ボールのバウンド位置を補間で決定することは困難である。

本稿では、ビジョンベースによる高速移動するボールの3次元軌跡の計測手法を提案する。本手法の特徴は、ハイスピードビデオカメラが不要であること、ビデオカメラ間の同期が不要であること、シャッタータイミング間の移動軌跡も計測できること、の3つである。

本提案手法の概要を説明する。まず、ビデオカメラのシャッタースピードおよびフレームレートを調整することで、映像にボールの軌跡を残像として残す。その軌跡に対して視体積交差法 (Shape from silhouette) [2] を適用し、3次元軌跡を求める。この3次元軌跡には時刻情報が付加されていないため、時刻とボール位置との対応は未知である。そこで、フレームが切り替わる瞬間のボール位置を特定することで、ボールの3次元軌跡に時刻情報を付加できる。

本稿では、提案手法の詳細を説明し、実際に卓球の映像に対して本提案手法を適用した実験結果を紹介する。

2. 関連研究

ボールの3次元軌跡の計測は、既にテレビ向けコンテンツの分野で実用化されている。Lucent Vision [3] は、テニスの試合のビデオ映像を解析することで、サービスのリプレイをCGで表示したり、簡単な試合の分析結果を提示することが可能なシステムである。6台のビデオカメラを利用し、その映像からボールを色分析により抽出し、ステレオ法でボールの位置を求めている。実際にテニスのテレビ中継で用いられており、その実用性は高く評価されている。ただし、あくまでテレビコンテンツ向けのシステムであり、ボールの計測精度については重

要視されていない。例えば、ボールの軌跡は単純な線形補間で求められており不正確である。また、カメラは同期のとれた60fpsで撮影可能なものを利用しており、特殊な機材が必須であるといえる。

一方、清水らはカメラの同期を取らずに移動物体の位置を推定する研究を行なっている[4]。これは、同期の取れていない画像に対して、フレーム補間処理を行なった後にステレオ計測を行なうものである。補間処理は、線形補間だけでなく、運動軌跡に近似した曲面を生成しそれを基に補間する方法も提案されている。ただし、例えば、ボールが床にバウンドした場合など運動軌跡が特異点を持つときには、計測誤差が大きくなる。

3. 提案手法

本稿で提案するボールの3次元軌跡の計測手法の特徴は以下の通りである。

- 連続した3次元軌跡の計測が可能
- ハイスピードカメラが不必要
- ビデオカメラ間の同期が不必要

ステレオ法はシャッタータイミングごとに三角測量を行なうため、シャッタータイミング間にボールがどこに存在したかは原理的に決定できない。本提案手法はシャッタータイミングによらず、時間的、空間的に連続した3次元軌跡を計測する。

また、ステレオ法を用いた高速移動物体の計測では、ハイスピードカメラを用いてシャッタースピードを高速にし、三角測量の回数を増やすことで移動経路を明らかにする必要があった。先述したように、本提案手法では連続した3次元軌跡が計測可能なため、ハイスピードカメラを用いる必要はない。

さらに、ステレオ法で移動物体を撮影する際に必須であったビデオカメラ間の同期をとる必要もない。同期をとるには特殊なビデオカメラが必要であったが、本手法を用いれば一般的なビデオカメラを利用することができる。

本提案手法は2つのステップから成る。

- (1) 3次元軌跡の計測
- (2) 時刻情報の付加

ここでの時刻情報とは、ボールの3次元位置と時刻の対応関係である。

3.1 3次元軌跡の計測

3次元軌跡の計測は2つのステップで行なう。

まず、複数台のシャッタースピードの設定が可能なビデオカメラを、ボールが移動する範囲を取り囲むように設置し、内部パラメータおよび外部パラメータを算出しておく。ビデオカメラのシャッタースピードはフレームレートと同一に設定する。例えば、フレームレートが30fpsならばシャッタースピードは1/30secに設定する。この設定により、図1のように、映像中にボール軌跡の残像が撮影される。この残像は、前後フレームで空間的に連続

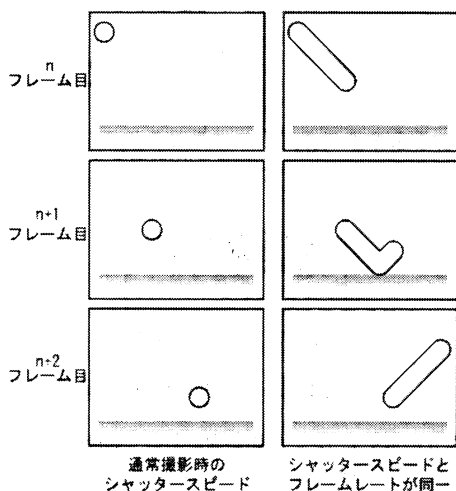


図1 シャッタースピードと撮影画像の関係

する。一般的な撮影では、移動物体がブレないようにフレームレートよりシャッタースピードを速く設定するが、そのような設定では残像が前後フレームで連続しない。

次に残像をシルエット化し視体積交差法で3次元復元する。視体積交差法とは、多視点から撮影された対象物体のシルエットを3次元空間中に投影し、それらの共通部分を求めることで物体の3次元形状を復元する手法である。軌跡をシルエット化し視体積交差法を適用すると、軌跡の形状が3次元復元される。

本手法で撮影されたボール軌跡の特徴として、軌跡が全体に薄いことが挙げられる。シャッタースピード（フレームレート）が遅ければ遅いほど、背景が露光する時間が長くなるため、背景と比べてボール軌跡は相対的に薄くなる。このため、理論上シャッタースピード（フレームレート）をできる限り早く設定するのが望ましい。ただし、5.で述べるように、通常のビデオカメラのフレームレートである1/30secでも、本提案手法は安定した計測が可能である。

ビデオカメラの同期を取らなくても連続した3次元軌跡が求められる原理を説明する。視体積交差法は、複数のシルエットからその共通部分のみを残す手法である。図2に示すように、左から右へ移動するボールを同期が取れていないカメラAとカメラBで撮影したとする。同期が取れていないため、ボールは異なるタイミングで撮影される。図2では、カメラBはカメラAより撮影タイミングが遅くなっている。しかし、タイミングは異なっても同期のずれが1フレーム以内の画像同士であれば、シルエットの共通部分は存在する。視体積交差法を適用すると、その共通部分が3次元軌跡として現われる。この3次元軌跡の続きの部分は、カメラBのフレームはそのまま、タイミングが早いカメラAのフレームを1フレーム進め、視体積交差法を適用することで求められる。こ

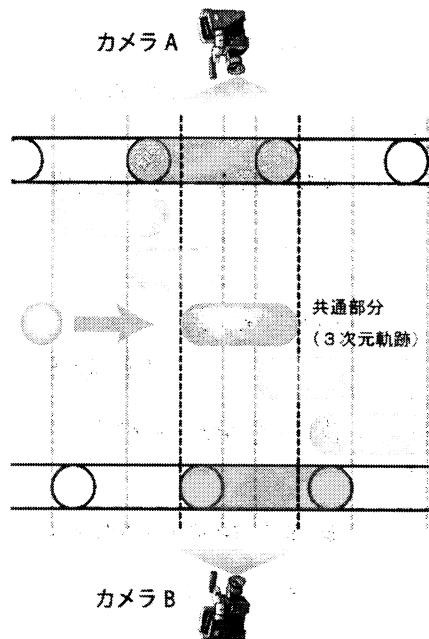


図2 同期が必要ない理由

のことから、カメラの同期が1フレーム以内でずれいても、3次元の軌跡が算出可能なことがわかる。

また、図3のように残像として残したボール軌跡は中心部分に比べて周辺部分が薄いという特徴がある。これは、ボールの中心が通過した撮像素子が、周辺部分が通過した素子に比べてボールが露光した時間が長いためである。そのため、二値化処理で軌跡を抽出すると、本来の軌跡より一回り小さいシルエットとなる。このことから、前後フレームで軌跡が重ならない可能性がある。この現象は、ボールが高速に移動し、かつボールが比較的小さく撮影されているときに顕著に現われる。シルエット画像において前後フレームで軌跡が重なると、視体積交差法で軌跡を3次元復元したときに、軌跡が寸断されてしまう。この問題は、図4のように、前後フレームの撮影画像をピクセル加算してから二値化することで解決できる。本手法ではシャッタースピードとフレームレートを同一に設定するため、ボールは前後フレームの時間内で撮像素子に常時露光していたことになる。よって、前後フレームをピクセル加算すれば、その時間内の軌跡が完全に連続して現われる。

実際に視体積交差法に適用するシルエット画像は、図5のように2次元画像上で合成したものを利用することにした。図2で説明したように、原理的には、同期のずれが1フレーム以内の画像に対して視体積交差法を適用すれば、軌跡の計測は可能である。ただし、同期がずれ、かつ複数の視点で撮影された画像群から、同期

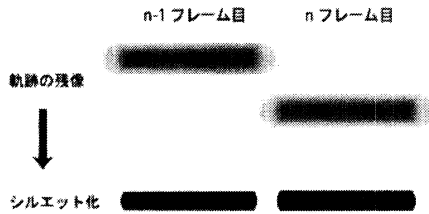


図3 ボール軌跡の濃淡

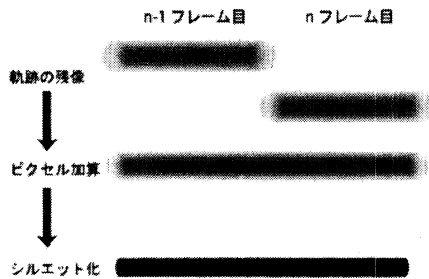


図4 ピクセル加算

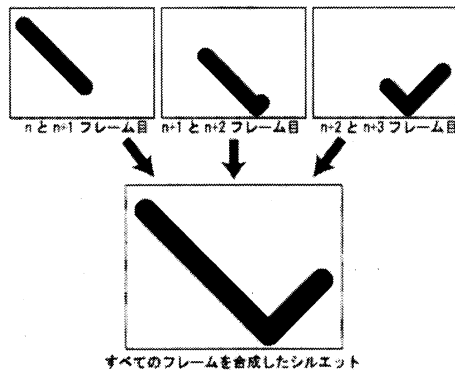


図5 合成したシルエット

のずれが1フレーム以内の画像を見つけ出すことは困難である。そこで、本実装では2次元画像上ですべての時刻のフレームを合成し、視体積交差法を適用することにした。

3.2 時刻情報の付加

視体積交差法で求めたボールの3次元軌跡には時刻情報が付加されていない。3次元軌跡に対して時刻の情報を付加する手順を以下に示す。

- (1) 前後のフレームで軌跡が重なる領域を求め、重心を計算する
- (2) 重心を3次元空間中に投影し、3次元軌跡と交差する位置を求める

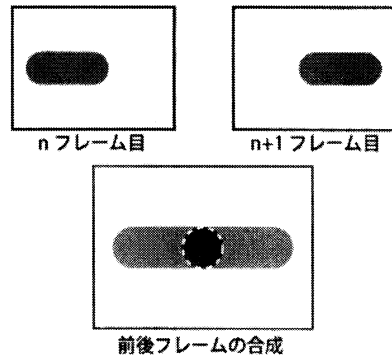


図6 前後フレームで軌跡が重なる領域

図6に示すように、撮影画像において前後のフレームの軌跡が重なる領域は、フレームが切り替わる瞬間にボールが存在していた位置であり、このときの時刻はビデオカメラのフレームレートから自明である。この領域の重心をボール中心とみなし、3次元空間中に投影し3次元軌跡と交差する点を求めれば、時刻情報を3次元軌跡に付加できる。

4. 実装

3.で述べた計測原理に基づき、プログラムの実装を行った。

4.1 3次元軌跡の計測

3次元軌跡の計測の実装では、軌跡の残像のシルエット化が重要である。軌跡のシルエット化は、以下のような流れで実装した。

- (1) 背景差分で軌跡を抽出する
- (2) 前後フレームをピクセル加算して軌跡を繋ぐ
- (3) 二値化処理でシルエット化する
- (4) ノイズ処理

ただし、3.1で述べたように、撮影されたボール軌跡は一般的に薄い。そのため、ノイズに影響されることなくボール軌跡のみをシルエット化することは難しい。ボール軌跡を綺麗にシルエット化するには厳密な閾値設定が必須である。

しかし、本提案手法では最終的に視体積交差法で軌跡の3次元形状を求めている。よって、抽出した軌跡画像に多少のノイズが載っていても、そのノイズは視体積交差の共通部分とはならないことが多いため消えてしまう。ボール軌跡を抽出しシルエット化するときには、それほど厳しい閾値設定をする必要はない。

視体積交差法の実装はさまざまな方法[6]が提案されているが、本研究では最も単純な方法をとった。3次元空間中に仮定したすべてのボクセルを、カメラの射影行列によって2次元画像に投影し、シルエットの中から外かを判定することで、ボクセルを削るかどうかが判断する。

4.2 時刻情報の付加

時刻情報の付加は以下のような流れで実装した。

- (1) 背景差分を行なう
- (2) 前後のフレームのピクセル積をとる
- (3) 二値化し重心を計算する
- (4) 重心を3次元空間中に投影する

前後フレームのピクセル積をとり、フレーム間で軌跡が重なる領域を抽出した。これは、軌跡の共通部分をとることと同義である。ただし、残像として撮影された軌跡は薄いため、ピクセル値の算術積をとり軌跡が重なる部分を強調することで、二値化し易くした。

軌跡が重なる領域を抽出する場合、軌跡を二値化した後に前後フレームの共通部分をとるのが自然である。しかし、4.1で説明したように、二値化後では前後フレームで軌跡が重ならない可能性がある。本実装方法をとることで、非常に薄い軌跡の端部が重なる領域も安定して抽出することができる。

5. 実験

本提案手法が実際のスポーツの環境で実現可能かどうか確認するために実験を行なった。

5.1 実験環境

実験はビデオカメラを7台設置行なった。配置図を図7に示す。

用いたビデオカメラはすべて Sony Handycam シリーズである。7台のうち5台は卓球台を取り囲むように配置し、残りの2台は天井から見下ろす形で取り付けた。すべてのビデオカメラのシャッタースピードは 1/30sec、フレームレートは 30fps に設定した。映像は DV フォーマット (720 × 480 ピクセル) で保存した。

ビデオカメラの内部パラメータおよび外部パラメータは Tsai の手法 [5] を用いて求めた。

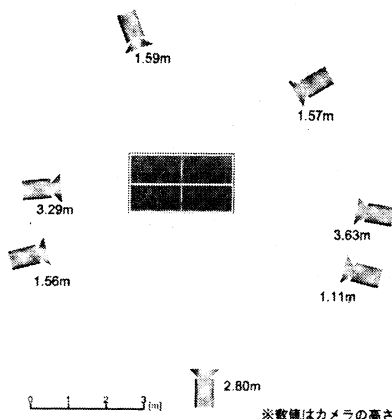


図7 カメラ配置

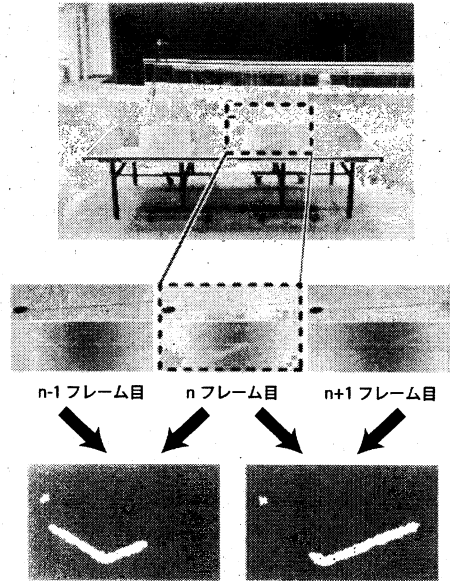


図8 撮影画像とシルエット化

5.2 実験概要

実験に用いた映像は、ラケットで打球されたボールが、バウンドして卓球台を縦断する様子を映したものである。

5.3 実験結果

図8に撮影された画像およびシルエット化後の画像を示す。ボールの軌跡は薄いですが、確実に映像に残っていることが確認できる。シルエットは4.1で示したように前後2フレーム分の軌跡である。撮影画像と比較すると、ノイズは残っているものの、ボール軌跡が正しくシルエット化されていることが確認できる。

図9に軌跡を2次元画像上で合成した画像を示す。

視体積交差法を適用し、ボールの3次元軌跡を算出した結果を、図10に示す。従来法では決定できなかったボールのバウンド地点が決定可能なことがわかる。シルエットにはノイズが残っていたが、計測結果にノイズの影響は見受けられなかった。

次にフレームが切り替わる瞬間のボール位置を求めた結果を図11に示す。V字型に横切っている線は11フレーム分重ね合わせたボールの2次元軌跡であり、×印は求めた重心、つまりフレームが切り替わる瞬間にボールが存在していた位置を示している。

3次元軌跡に対して、求めた重心を投影した結果を図12に示す。重心を投影した線と軌跡との交点が、フレームが切り替わった瞬間にボールが存在していた3次元位置である。カメラのシャッタースピードは 1/30sec であるから、1/30sec 単位でボールがどこに存在していたか決定できた。

実験結果より、本提案手法が卓球のようにボールが高速移動するスポーツでも有効であることを確認した。

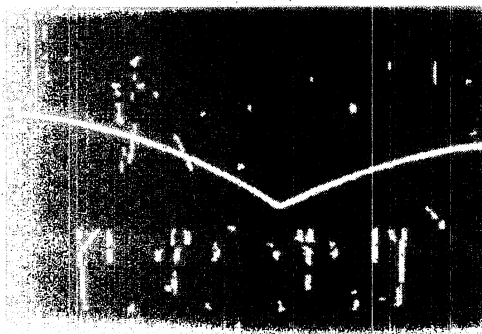


図 9 2次元合成されたシルエット

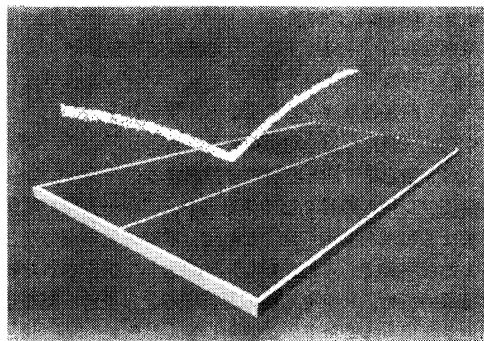


図 10 視体積交差法で求めた3次元軌跡

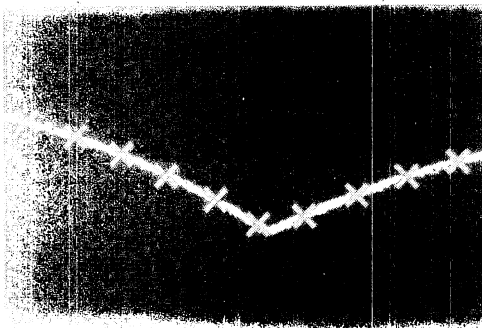


図 11 フレームが切り替わる瞬間のボール位置

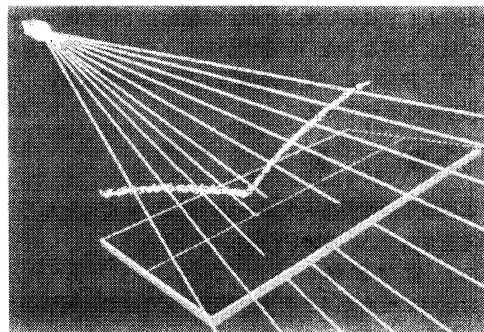


図 12 重心の投影

6. ま と め

本稿では、ボールスポーツの戦術分析のための、ボールの3次元軌跡の計測法を提案した。これは、シャッタースピードとフレームレートを同一に設定することで、映像中にボールを軌跡として残し、その軌跡のシルエットに視体積交差法を適用するものである。本提案手法では、ハイスピードカメラを用いる必要がなく、同期を取る必要もない、一方、シャッタータイミング間の軌跡までも計測可能であるといった特徴がある。また、フレームが切り替わる瞬間のボール位置から、軌跡に時刻情報を付加する手法も提案した。実験では、実際の卓球の環境下でもボール軌跡が計測可能であることが確認できた。

文 献

- [1] 葛西順一ほか, “一流卓球選手の戦術分析”, 昭和63年度日本体育協会スポーツ医科学研究報告 No.II 競技種目別競技力向上に関する研究-第12報-, pp. 117-121, 1989.
- [2] 松山 隆司, 高井 勇志, ウ 小軍, 延原 章平, “3次元ビデオの撮影・編集・表示”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol.7, No.4, pp. 521-532, 2002.
- [3] Gopal Sarma Pingali, and Yves Jean ad Ingrid Carlbom, “Real Time Tracking for Enhanced Tennis Broadcasts”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 260-265, 1998.
- [4] 清水 彰一, 藤吉 弘巨, “カメラ間のシャッタータイミングのズレを利用した高速3次元位置推定”, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2005), pp. I-428-I-433, 2004.
- [5] Roger Y. Tsai, “An Efficient and Accurate Camera Calibration Technique for 3D Machine Vision”, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 364-374, 1986.
- [6] Wojciech Matusik, Chris Buehler, Ramesh Raskar, Steven J. Gortler, and Leonard McMillan, “Image-Based Visual Hulls”, Proc. Siggraph 2000 Computer Graphics, pp. 369-374, 2000.