

視体積交差におけるカメラ配置の最適化 Optimization of Camera Alignment for Volume Intersection

海老澤 一生† 東海林 健二 外山 史† 森 博志†
Kazui Ebisawa Kenji Shoji Fubito Toyama Hiroshi Mori

1. まえがき

多視点画像を利用した 3 次元形状復元の手法では、視体積交差法やステレオ法が用いられている。ステレオ法は、異なる視点から撮影された 2 次元画像上で物体表面上の点の対応付けを行い、三角測量の要領で対象までの距離を求める手法である。それに対し、視体積交差法では複数視点から撮影された物体のシルエットを使用し、各視点を頂点、シルエットを断面とする錐体の共通部分を求める手法であり、対応付けを行わない。このため誤対応が生じず、安定した形状復元が行えるため様々な分野において利用されている[1][2]。

視体積交差法では、一般に、カメラ台数を多くすると精度の高い復元が可能となる一方、撮影コストが増加する。それでは、復元精度をさらに高くするために 1 台のカメラを追加するとしたら、それをどこに配置すればよいのか、あるいは、撮影コストを抑えるためにカメラ 1 台を削除するとしたら、どのカメラを削除すればよいのか、今のところこれらの問題への明確な解はない。本研究では、視体積交差において適切なカメラ配置を与える手法を提案することを目指し、本論文では、人体形状を復元対象として、少ないカメラ台数 (7 台) での最適なカメラ配置を求めるシミュレーション実験の結果を報告する。実験結果から、最適カメラ配置の傾向、選択されたシルエット画像の特徴などが分かった。今後の課題としては、シルエット画像の特徴を利用して、視体積交差せずにシルエット画像のみから最適配置の探索を可能にすることが挙げられる。

2. 3 次元形状復元

2.1 視体積交差法

2 次元画像から 3 次元形状を復元する手法の一つとして視体積交差法が挙げられる。視体積交差法とは、同時刻にカメラで撮影した複数枚の 2 次元シルエットを用いて、カメラの位置を頂点としてシルエットが断面となるような錐体 (視体積) を作り、シルエットを 3 次元空間に逆投影し、その交差部分 (共通部分) として 3 次元形状を復元する手法である。図 1 に視体積交差法での復元方法を示す。

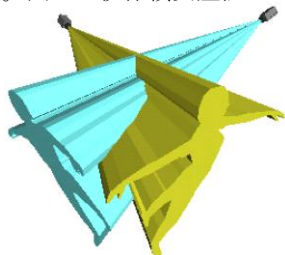


図 1 視体積交差法での復元方法

2.2 カメラキャリブレーション

一般に、カメラで撮影した画像から 3 次元形状を復元するためには、カメラキャリブレーションを行い、カメラの内部パラメータと外部パラメータを求める必要がある。シミュレーション実験では内部パラメータ、外部パラメータを任意に設定して用いることができる。本論文で述べるシミュレーション実験では、以下に挙げるカメラの内部、および外部パラメータはすべて既知の情報として扱う。

(1) 内部パラメータ

- レンズの焦点距離: 700 画素
- 画像中心座標 (光軸): 画像の中央 (320, 240)
- 画像サイズ: 640 × 480 画素
- レンズ歪み係数: レンズ歪みなし

(2) 外部パラメータ

- 世界座標におけるカメラの座標位置
- 世界座標系におけるカメラの向き

2.3 ボクセル表現

復元結果は、ボクセルの集合で表現する。ボクセルを小さくするほど精度の高い 3 次元形状表現が可能となるが、実行時間が長くなってしまいう問題点がある。図 2 に復元対象物体例を、図 3 に復元結果例を示す。



図 2 復元対象物体例



図 3 復元結果例

3. 最適カメラ配置の探索方法

本研究では、視体積交差法により、少ないカメラ台数で3次元形状復元を行った際に、どのようなカメラ配置が最適かを検討するため、姿勢が異なる複数の人体形状モデルを用いてシミュレーション実験を行った。以下、粗密解析の考え方で3.1と3.2の処理を順番に行って求められたカメラ配置を、最適なカメラ配置として決定する。

3.1 37か所からの最適カメラ配置（粗探索）

(1) 問題設定

粗探索では、復元対象モデルの周囲のカメラ配置空間を37分割し、37か所から7か所を選んでカメラを置くこととし、カメラの置き方 ${}_{37}C_7$ 通りの中から最適な配置を求める。本研究では、真の形状と復元形状の差の体積を復元誤差とみなし、復元誤差が最小となるカメラ配置を最適カメラ配置とする。粗探索における真の形状は、復元対象モデルを全37か所に置いた37台のカメラで撮影し、得られた37枚のシルエット画像から復元した形状とする。37台のカメラで撮影して得た真の形状も、7台のカメラによる復元形状もボクセル表現として得るため、両者の差の体積である復元誤差はボクセル数で得る。

(2) カメラ配置

カメラを配置する37か所は、復元対象モデルの中心を原点とした半球面上に設定する。各位置は、円周上に等間隔に9か所に配置し、それぞれについて原点から各位置を見上げた時の仰角を0度から90度まで22.5度ずつ増やしていくことで、計37か所とする。半球面上に設定した37か所のカメラ位置を真上から見た様子を図4に示す。

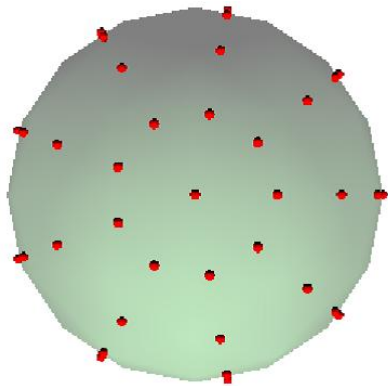


図4 真上から見た37か所のカメラ位置

(3) 手順

視体積交差法により3次元形状復元を行うとき、37か所のうち、どの7か所に置いたカメラを用いるのが最適かを求める最適カメラ配置決定の手順を以下に述べる。

37か所のそれぞれの位置にカメラを置くとき、レンズ光軸は原点を通るようにカメラの外部パラメータを設定する。カメラ内部パラメータは2.2に記載の通りとする。

復元対象モデルを全37か所に置いた37台のカメラで撮影したとする。そのとき得られた37枚のシルエット画像からの視体積交差を完全視体積交差と呼ぶ。完全視体積交差の結果を真の形状と考える。また、37か所から7か所を選択してカメラを置いて復元対象モデルを撮影したとする。このとき得られた7枚のシルエット画像からの視体積交差を部分視体積交差と呼ぶ。視体積交差法では、

視体積の共通部分を求めるためカメラ台数が多いほど復元結果の体積は小さくなっていく。よって、完全視体積交差結果が最も体積が小さく、

部分視体積交差結果 $\supset$ 完全視体積交差結果という包含関係が成り立ち、部分視体積交差結果の体積は完全視体積交差結果の体積と等しい、または大きくなる。これより、粗探索における最適カメラ配置は、37か所から7か所を選んでカメラを置くときの置き方 ${}_{37}C_7$ 通りの中から部分視体積交差結果の体積が最小となる組み合わせを全探索で求めることにより決定する。その際、完全視体積交差結果は復元誤差の大きさを見るためには必要であるが、最適なカメラ配置の探索ではこれを参照する必要はない。

3.2 近傍探索による最適カメラ配置（密探索）

(1) 問題設定

密探索では、3.1の粗探索で求めた7台のカメラ配置を初期値として、その近傍を探索し、さらに良い（部分視体積交差結果の体積が小さい）カメラ配置を探索する。

(2) カメラ配置

カメラを配置し得る位置を半球面上に901か所設置する。各箇所は、円周上に等間隔に45か所設置し、それぞれについて原点から各位置を見上げた時の仰角を0度から90度まで4.5度ずつ増やしていくことで、計901か所とする。半球面上に設定した901か所のカメラ位置を真上から見た様子を図5に示す。

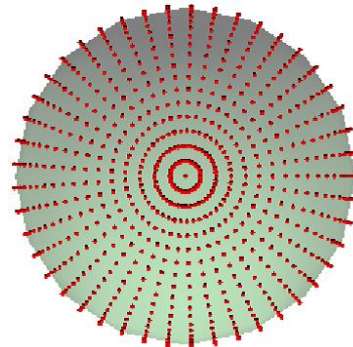


図5 真上から見た901か所のカメラ位置

(3) 手順

3.1の粗探索で求めた7台のカメラ配置を初期値として、最適解を探索する手順を以下に述べる。

現在の7か所のカメラ配置から単純な局所探索を行う。すなわち、全ての近傍のうちで最も良いものを近傍解とし、現在の解よりも近傍解がよければ解を入れ替える方法である。解の良さは、3.1と同様、部分視体積交差結果の体積の小ささで評価する。近傍は、7台のカメラのうち1台のカメラの位置を図5において方位角および仰角で1ステップ動かす範囲とする。すなわち、図5に示す半球を真横から見た図6に示された9か所の点のうち、中心の点が現在のカメラの位置とすると、その周囲8か所の点を近傍とする。すると、現在の7台のカメラ配置の近傍は、56通りとなる。この56通りの近傍解から部分視体積交差結果の体積が最も小さくなる局所最適な近傍解を求め、それが現在の解よりも体積が小さければ解を入れ替える処理を行うことを繰り返す。この解の入れ替え操作の必要がなくなったときの現在の解を最適なカメラ配置とする。

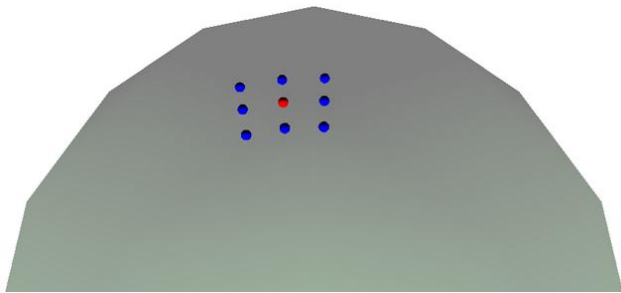


図 6 1 台のカメラ位置の近傍

4. 実験

4.1 方法

人体姿勢編集ソフトウェア Poser により異なる 13 姿勢の人体形状モデルを作成した。この人体形状モデルを用いて、各姿勢において視体積交差に用いる 7 台のカメラの最適配置を求めるシミュレーション実験を行った。画像サイズは 640×480 ピクセルである。カメラの内部および外部パラメータは全て既知である。また、本手法の有効性を確認するために、図 7 に示すように 7 台のカメラを仰角 0 度で円周上に均等に配置し、その均等カメラ配置から復元した結果を比較した。

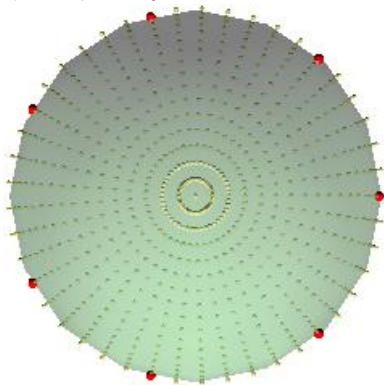


図 7 均等に配置したカメラの位置

4.2 実験結果

4.2.1 カメラ配置と復元結果

7 台のカメラの最適配置を探索した結果を以下に示す。また、均等な配置と最適配置との復元誤差の結果を表 1 に示す。3.1 での真の形状との誤差は姿勢によって違いはあるが、全て 20%以内となり、平均値は 11.1%となった。復元結果は比較的真的形状に近いものができたが、誤差が 15%前後の復元結果には人体形状にない大きな凹凸が見られる場合もあった。また、均等に配置して同様に復元を行った場合は、誤差の平均が 26.7%となり、どのような姿勢においても、本手法を用いた結果の方が誤差が十分に小さくなっているため、最適なカメラ配置を探索することは意義があると考えられる。13 姿勢の実験結果のうち、最適カメラ配置での復元誤差が比較的小さい結果の最適カメラ配置と復元結果を図 8 と図 9 に、比較的復元誤差が大きい結果の最適カメラ配置と復元結果を図 10 と図 11 に示す。カメラ配置については、ほとんどが広範囲に配置されているが、図 11 の姿勢 3 のように、カメラ同士が近距離に配置されるような結果になったものもあった。カメラ配置は真上から見た図である。

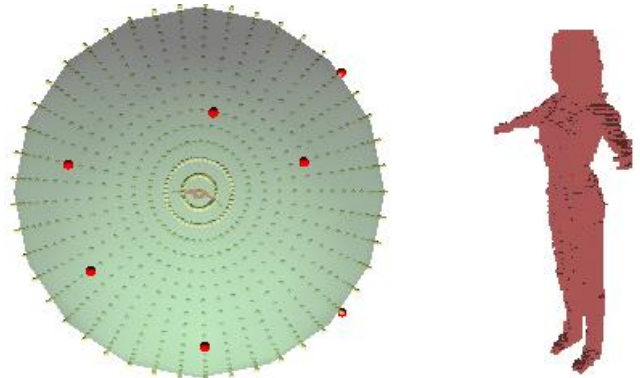


図 8 最適カメラ配置と復元結果 (姿勢 2、誤差 7.6%)

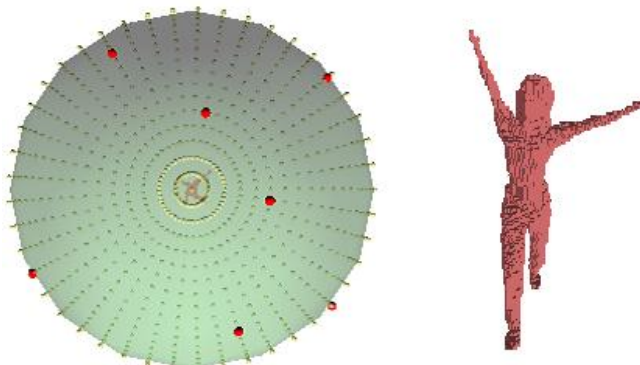


図 9 最適カメラ配置と復元結果 (姿勢 4、誤差 8.2%)

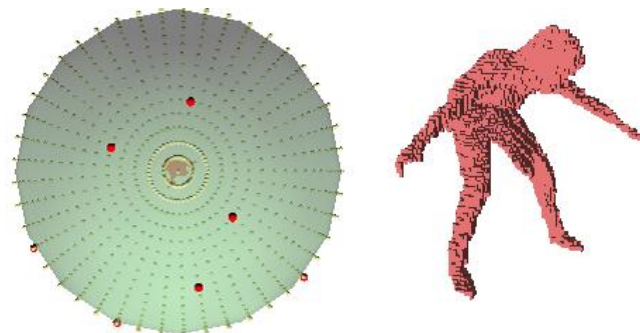


図 10 最適カメラ配置と復元結果 (姿勢 6、誤差 17.1%)

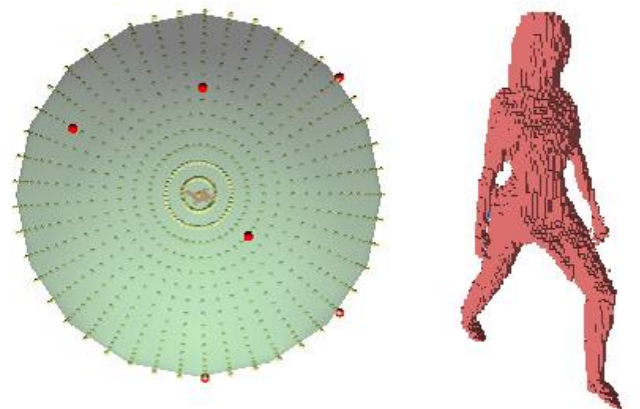


図 11 最適カメラ配置と復元結果 (姿勢 3、誤差 14.4%)

表 1 均等な配置と最適配置との復元誤差

	復元誤差(%)	
	均等カメラ配置	最適カメラ配置
姿勢 1	18.5%	11.2%
姿勢 2	33.2%	7.6%
姿勢 3	19.5%	14.4%
姿勢 4	21.9%	8.2%
姿勢 5	21.2%	11%
姿勢 6	35.8%	17.1%
姿勢 7	22.5%	14.5%
姿勢 8	30.4%	14.4%
姿勢 9	29%	8.8%
姿勢 10	27.7%	11.8%
姿勢 11	33%	13.2%
姿勢 12	28%	12.6%
姿勢 13	26.1%	13.6%

4.2.2 最適カメラ配置でのシルエット

最適カメラ配置の結果より、復元に用いられたシルエットは、比較的人体の形状が分かるようなシルエットが選ばれている。しかし、姿勢 3 のように同じようなシルエットが選ばれてしまっている場合もあった。図 8 から図 11 での復元に用いられたシルエットを図 12 から図 15 に示す。



図 12 姿勢 2 の復元に用いられたシルエット画像



図 13 姿勢 4 の復元に用いられたシルエット画像



図 14 姿勢 6 の復元の用いられたシルエット画像



図 15 姿勢 3 の復元に用いられたシルエット画像

5. 考察

5.1 カメラ配置

最適カメラ配置の大半は方位角が同じ位置は選択されにくいという結果になった。しかし、図 10 のような身体

を曲げている姿勢については方位角が同じ位置も選択されている。これは人体形状モデルの姿勢が棒立ちの状態の場合、方位角の移動には変化が大きく、仰角による移動にはあまりシルエットに変化が見られないためだと考えられる。また、仰角により下方向と上方向からとで分けてカメラ配置を見たとき、上方向のカメラ位置も多く選択されていることが分かった。この結果から、3 次元復元をする際は、あらゆる角度から撮影したシルエットを用いた方が精度の高い復元ができると考えられる。

5.2 復元結果

復元結果は、形状が単純な姿勢に関しては誤差を 10% 未満に抑えることができ、3 次元形状表示をしても真の形状にかなり近い復元ができています。四肢が異なる方向を向いているような複雑な姿勢に関しては誤差が 15% 前後となってしまう、手先や足先、関節で目立った凹凸が見られる場合もあった。

5.3 シルエット画像

シルエット画像については、似たようなシルエットはほとんど選ばれていないことが分かる。似たようなシルエットが選ばれてしまったものについては、そのカメラのみ違う箇所に動かして再探索を行うなど、最適解の妥当性の検討が課題とされる。選ばれたシルエットに関しては、腕や足など姿勢の特徴的な部分が分かりやすいシルエットが選択されている。姿勢の特徴的な部分が分かるシルエットは形状が複雑になっているため、そのようなシルエットが精度の高い 3 次元形状復元に貢献していると考えられる。

6. 結び

本論文では、決められた少ないカメラ台数によって視体積交差をする際の最適なカメラ配置を求めることで、どのようなカメラ配置が有効であるか、また、最適カメラ配置でのシルエット画像にはどのような特徴があるのかを検討した。実験の結果から、特に復元対象物体が棒立ちになっている場合は、カメラの位置は円周上の角度が等しい個所を選ばないことが有効で、シルエット画像は、その形状が複雑になるようなカメラ配置が選ばれていることが分かった。シルエット画像については、似たようなシルエットが選ばれてしまった原因の検討が課題とされる。今後の課題としては、今回分かったシルエット画像の特徴から、最適配置の探索を視体積交差をせずにシルエット画像のみで行うことを可能にすることが挙げられる。また、今回の実験では 1 つの人体形状モデルしか用いずに、姿勢のみを変えて実験を行ったため、体型の種類を増やして検討することも課題として挙げられる。

参考文献

- [1] M.Li, M.Magnor, H.P.Seidel."Hardware-Accelerate Visual Full Rendering", The 8th Fall Workshop on Vision, and Visualization 2003(VMV 2003), 151-158, 2003.
- [2] J.M.Hasenfatz, M.Lapierre, J.-D.Gascuel, and, E.Boyer.gReal-time Culture, Reconstruction and Insertion into Virtual World of Human Actors, hVision, Video, and Graphics 2003(VVG f03):49.56, 2003.