

## 境界移動予測に基づく並列 Fast Level Set Method の計算負荷均衡化

岩下 友美<sup>†</sup> 倉爪 亮<sup>†</sup> 原 健二<sup>††</sup> 長谷川 勉<sup>†</sup>

<sup>†</sup>九州大学大学院システム情報科学研究所 福岡市東区箱崎 6-10-1

<sup>††</sup>九州大学大学院芸術工学研究所 福岡市南区塩原 4-9-1

E-mail: †yumi@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

あらまし 人間の動きや形状だけでなく“見え”も計測し復元する、複数カメラを用いたマーカレスなモーションキャプチャシステムの代表的な手法として、視体積交差法と多視点ステレオが提案されている。しかしこれらの手法は、単一物体あるいはオクルージョンが生じない複数物体を対象とした手法であり、シーン内に複数物体が存在し物体間にオクルージョンが生じる場合、それぞれの物体形状を同時かつ分離して復元することは困難である。そこでこれまで我々は、高速な境界追跡手法である Fast Level Set Method を複数ステレオ距離画像に適用し、複数対象物体の 3 次元形状をオクルージョンに頑強に復元するモーションキャプチャシステムを提案している。本報告では、Fast Level Set Method の特性に着目した動物体境界の移動方向推定法を提案し、その応用例として、PC クラスタを用いた並列 Fast Level Set Method のための境界移動方向の予測値に基づく計算負荷の均衡化手法を提案する。さらに、動物体の追跡実験により、従来システムと比較してより高速に 3 次元形状の復元が可能であることを示す。

キーワード Fast level set method, 3 次元形状復元, PC クラスタ, 負荷分散

## Predictive Load Balancing for Parallel Fast Level Set Method

Yumi IWASHITA<sup>†</sup>, Ryo KURAZUME<sup>†</sup>, Kenji HARA<sup>††</sup>, and Tsutomu HASEGAWA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University Hakozaiki 6-10-1, Higashi-ku, Fukuoka

<sup>††</sup> Graduate School of Design, Kyushu University Shiobaru 4-9-1, Minami-ku, Fukuoka

E-mail: †yumi@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

**Abstract** Various markerless motion capture systems using video cameras, which enable to recover not only motion of a target but also its appearance, have been proposed so far. However, in case that there are multiple persons in the scene at the same time, it is quite difficult to reconstruct a precise 3D model of each person separately due to the occlusion between them. To deal with this problem, we have proposed a motion capture system using the Fast Level Set Method for recovering 3D models of multiple persons separately and robustly against occlusion. This paper introduces an estimation method of target's moving direction based on a property of the Fast Level Set Method. As an application of the estimation method, we propose a load balancing method based on predicted moving direction for parallel Fast Level Set Method implemented on a PC cluster. Tracking experiments of a moving target using the proposed system are successfully carried out.

**Key words** Fast level set method, 3D shape reconstruction, Pc-cluster, Load balancing

### 1. はじめに

人間国宝の巧みの技や格闘技の動作など、実際の人間の動きを計測し記録するモーションキャプチャは、高品質な CG 作成、技術の蓄積・継承や歩行ロボット開発などの分野で、多くの需要が見込まれる。しかし現在実用化されているモーションキャプチャには磁気式、光学式、リンク装着式などがあるが、これらは磁気、光学マーカや特殊な計測装置を装着する必要があり、また撮影環境が専用のスタジオに限られるなど、解決すべき課

題が多い。

一方、複数のカメラを周囲に配置して、人間の形状や動きだけではなく“見え”も計測し再現するマーカレスのモーションキャプチャシステムの研究も行われており、このシステムの実現方法の代表的な手法として、視体積交差法と多視点ステレオが提案されている。視体積交差法は、任意の視点から対象を撮影したとき、その対象が 2 次元シルエットを実空間に投影した錐体中（視体積）に含まれるという制約条件に基づいている [1][2]。すなわち、この制約条件により異なる視点の 2 次元

シルエットから複数の視体積を求め、その交差領域を対象物体の3次元形状として復元するものである。そのため、多数台のカメラを用いることにより詳細な3次元形状の復元が可能となるが、一方カメラ台数の増加に伴い計算コストが高くなるという問題がある。これに対し、対象物体の3次元形状を実時間で復元するために、PC クラスタを用いたシステム [3] [4] やハードウェアを用いたシステム [5] が提案されている。

また、凸形状物体のみしか復元できないという視体積交差法固有の問題に対して、Voxel carving 法や物体表面の色情報を用いて凹部分の形状復元を行う手法が提案されている [6] [7]。しかし、いずれの手法も計算コストが高く、実時間での3次元形状復元は実現されていない。

一方、多視点ステレオ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、三角測量の原理により対象物体の3次元形状を復元する手法である。Kanade らは51台のカメラをドーム上に配置して多視点で計測するシステムを開発している [8] [9]。しかし、モデル構築のための計算コストやデータ量が非常に大きく、人間のような複雑形状の実時間計測は困難である。また近年、このシステムと Voxel coloring 法を組み合わせることで、より詳細な3次元形状を復元する手法が提案されている [10]。

さらに、従来提案されている3次元形状復元手法では、そのほとんどが単一物体あるいはオクルージョンの生じない複数物体を対象とした手法であり、シーン内に複数物体が存在し物体間に相互オクルージョンが生じる場合、それぞれの物体形状を同時に復元することは困難である。

そこでこれまでに我々は、シーン内に存在する複数対象物体の3次元形状をオクルージョンに頑強に復元するモーションスキャナシステムを提案している [11]。このシステムでは、移動物体追跡や3次元幾何モデリングなど、様々な分野で用いられる Level Set Method [12] [13] の高速化手法である Fast Level Set Method [14] [15] を、対象物体の周囲に2台配置したステレオカメラから取得したステレオ距離画像に適用することで、複数対象物体の3次元形状をオクルージョンに頑強に復元している。また、7台の計算機からなる PC クラスタへと実装し、Fast Level Set Method 処理の並列計算により、3次元形状の実時間復元を実現している。しかし、従来システムでは並列 Fast Level Set Method 処理に割り当てるボクセル空間を単純に分割しているため、物体の位置や形状、物体数によって特定の計算機に負荷が集中する場合があった。

そこで本報告では、Fast Level Set Method の特性に着目した動物体境界の移動方向推定法を提案し、その応用例として、PC クラスタを用いた並列 Fast Level Set Method のための境界移動方向の予測値に基づく計算負荷の均衡化手法を提案する。本手法ではまず、復元した3次元形状分布に応じてボクセル空間の仮分割面を決定する。次に、推定した動物体の移動方向の予測値とボクセルの仮分割面情報とを組み合わせ、次時刻でのボクセル空間の最適な分割面を予測し決定する。これにより、並列 Fast Level Set Method における計算機間での計算負荷の均衡化を実現し、従来システムと比較してより高速な3次元形状の復

元を可能にする。

本報告では、まず第2章では Osher, Sethian らによって提案された Level Set Method、及びその高速化手法として提案された Fast Level Set Method を紹介する。次に第3章では、これまでに提案されたモーションスキャナシステムについて概説する。また動物体の移動方向推定法を提案し、提案手法を用いた並列 Fast Level Set Method のための負荷分散の最適化について紹介する。第4章では開発したシステムを用いた人体形状の追跡実験の様子を示す。第5章はまとめである。

## 2. Fast Level Set Method

Level Set Method (LSM) [12] [13] は、位相変化が可能な動的輪郭モデルとして Osher, Sethian らによって提案され、移動体追跡や3次元幾何モデルなどの応用分野が報告されている。しかし LSM は多くの計算量を必要とするため、リアルタイム性が要求されるアプリケーションには不向きであると考えられてきた。この問題に対し、精度を低下させることなく LSM を高速に実現できる Fast Level Set Method (FLSM) [14] [15] が提案され、2次元画像上での複数移動物体の実時間同時追跡へと適用されている。以下、これらの手法を簡単に紹介する。

### 2.1 Level Set Method とその高速化手法

2次元  $xy$  平面上での LSM を用いた境界追跡法について説明する。本手法ではまず、平面上の各点  $(x, y)$  において、時刻  $t$  における補助関数  $\psi(x, y, t)$  を導入し、境界位置  $\gamma(x, y, t)$  は  $\psi(x, y, t) = 0$  を満たす  $(x, y)$  で表すこととする。次に、 $\psi$  についての差分方程式を以下のように定義する。

$$\psi_{i,j}^{n+1} = \psi_{i,j}^n - F(i, j) |\nabla \psi_{i,j}^n| \Delta t \quad (1)$$

ここで、 $(i, j)$  は  $xy$  平面上のグリッド座標、 $\Delta t$  は時間ステップ幅である。また、 $F$  は  $\psi$  の成長速度であり、単位時間あたりに  $\psi$  が法線方向に移動する量を示す。補助関数値が0のセル (zero level set)、つまり  $\psi = 0$  として境界を抽出することで、位相変化に対応した境界追跡が可能となる。

式1を更新するには、2次元画像上の全てのセルにおいて成長速度を決定する必要がある。拡張成長速度場 [16] を用いた LSM では、各セルの成長速度を決定するために、まず zero level set での成長速度を決定し、その他のボクセルでは最も近い zero level set のボクセルの成長速度をコピーして成長速度場を構築する。また、補助関数を更新する場合、更新とともに積分誤差も蓄積されるため、安定な解を得るには一定回数更新後に各セル毎に補助関数の値 (一般には zero level set からの距離) を再計算し、以降の計算の初期値として設定する「再初期化」の処理が必要となる。しかし、拡張成長速度場の構築処理や再初期化処理において、各セルで現在の zero level set からの距離を得る際、各セルからの最近傍 zero level set の探索処理を行わずにはならない。この計算コストは非常に高く、これが LSM の大きな問題となっている。

LSM の計算コストを削減するために、これまでに様々な手法が提案されており、その代表的な手法として Narrow Band Method (以下、NB) が挙げられる [17]。一般に境界領域の追跡において、空間全体に対して補助関数を計算する必要はないこ

とから、この手法では zero level set に近い領域 (Narrow Band) だけに処理を限定することで処理の効率化を図っている。

## 2.2 Fast Level Set Method

NB は LSM と比べて高速な手法であるが、依然として計算コストは高い。この問題に対し、LSM の高速化手法として Fast Level Set Method (FLSM) [14] [15] が提案されている。

FLSM は図 1 (a) に示す参照マップを用いて、最近傍探索処理のあるルールに基づく単純な数値の上書き処理に置き換えることで、高速に拡張成長速度場を構築する。この参照マップは、原点周辺にあるセルを原点からの距離に応じて分類したものである。例えば、リスト  $R_r$  は原点からの 2 乗距離が  $r$  であるセルの集合とする。

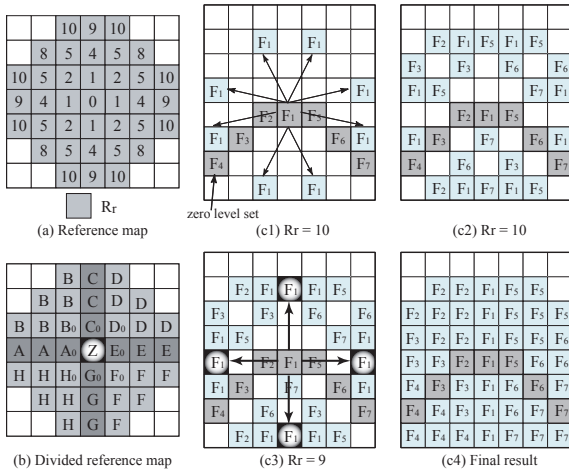


図 1 参照マップと拡張成長速度場の構築

次に、作成した参照マップを用いて拡張成長速度場を構築する。ただし、zero level set での成長速度は予め決定されているとする。まず、リスト  $R_{\delta(\delta+1)}$  を用いて、ある zero level set からの 2 乗距離が  $\delta(\delta+1)$  であるセルを選択し、その zero level set に格納されている成長速度の値を選択されたセルに仮登録する (図 1 (c1))。この処理をすべての zero level set に対して行う (図 1 (c2))。次に、添字の値を 1 小さくして同じ処理を行い (図 1 (c3))、これを添字の値が 0 になるまで繰り返す。ただし、仮登録の際、異なる値がすでに仮登録されていた場合には、新たな値を上書きすることにする。これにより全ての処理が終了した時には、各セルには最も近い zero level set における成長速度の値が登録されている (図 1 (c4))。このように、参照マップ球の距離に応じたリストを利用することで、距離比較を行うことなく代入処理だけで拡張成長速度場を構築する。また、拡張成長速度場の構築処理の過程において、同時に距離も上書きすることで、各セルに zero level set からの距離を簡単に設定できる。この際、追加される処理は単なるメモリアクセスだけであり、全体の計算量はほとんど変化しない。

さらに FLSM では図 1 (b) に示すように分割した参照マップを用いることで、拡張成長速度場の構築処理において書き込む領域を限定し、さらなる効率化を実現している。例えば、ある zero level set  $Z$  の左側に zero level set  $A_0$  が隣接している場合、 $Z$  の左側の領域 ( $A, B, H$ ) には、 $A_0$  よりも  $Z$  に近い点は存

在しない。このように、隣接するグリッドが zero level set かどうかを調べ、その位置関係によって、書き込みのオーバーラップを減らし、拡張成長速度場を高速に構築している。

## 3. 境界の移動方向推定及び並列 Fast Level Set Method のための負荷分散の最適化

本章ではまずこれまでに提案されている、複数対象物体の 3 次元形状をオクルージョンに頑強に復元するモーションスキャナシステムについて概説する [11]。従来、様々なオクルージョンの対応手法が提案されているが、一般に推定される物体形状は既知かつ楕円などで近似された単純な構造であり、自由形状物体のオクルージョン判定には拡張されていない [18]。次に FLSM の特性に着目した動物体境界の移動方向推定手法を提案し、その応用例として、PC クラスタを用いた並列 FLSM のための境界移動方向の予測値に基づく計算負荷の均衡化手法を提案する。

### 3.1 FLSM による人体形状の復元と追跡

FLSM を用いたモーションスキャナシステムの処理の流れを以下に示す。

(1) まず内部パラメータが既知の校正済みステレオカメラ (PointGrey 社製, BumbleBee) を大きさ・形状が既知の静止物体 (例えば立方体) の周囲に設置し、物体の形状モデルとステレオ距離画像を用いて ICP アルゴリズムにより外部パラメータを推定する。

(2) 測定対象を内部に設置し、全てのステレオカメラを用いてステレオ距離画像を取得する。

(3) 複数距離画像を一つの 3 次元ボクセル空間に投影し、距離データを含むボクセルを抽出する。

(4) 取得したステレオ距離画像と前フレームで復元した 3 次元形状情報を用い、オクルージョン領域を推定する。

(5) (3) で抽出されたボクセル領域に対し FLSM を適用し、距離データ点を含む最も外側のボクセル (境界ボクセル, zero level set) を追跡し、複数対象物体の分離した 3 次元形状を復元する。オクルージョン領域内の形状は、前時刻での境界位置を保つことで連続した滑らかな形状を保持する。

(6) (2) から (5) を繰り返す。

上記の計算は、処理の高速化を図るため、ギガビット LAN の一つである Myrinetxp で相互に接続された 7 台の計算機 (Pentium Xeon, 3.06 GHz) により並列処理される (図 2)。まずそれぞれステレオカメラが接続された 2 台の計算機 (PC1, PC2) により、同期した 2 枚のステレオ距離画像を取得する。次に得られた距離画像は FLSM 計算用計算機に送られる。ただしここではボクセル空間を 4 つの領域に均等に分割し、それぞれの空間に 1 台ずつ計算機を割り当て (PC3-PC6)、4 台で並列に FLSM の計算を実行した。各 FLSM 用計算機では、まず複数距離画像の統合を行った後、それぞれの領域に対して FLSM を適用する。ここで、各処理空間内を移動する対象物体の 3 次元形状を安定して復元するために、処理空間が隣接する FLSM 計算機間において、3 次元空間の分割面近傍領域の FLSM 処理結果の情報を共有している。最後に処理結果が表示用計算機 (PC7) に送



られ、ボクセル空間全体の処理結果として統合、表示される。

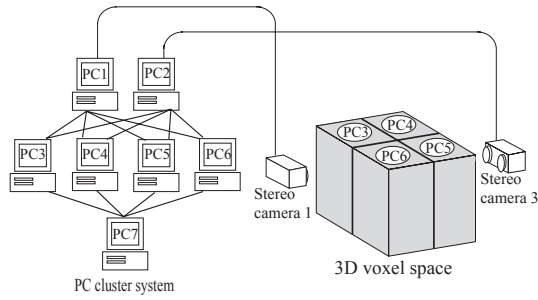


図2 PC クラスタシステム

構築システムを用いた、人間動作の実時間追跡実験におけるFLSM処理時間を表1に示す。この時使用したボクセル空間の解像度は $100 \times 100 \times 100$ 、距離画像のサイズは $640 \times 480$ である。また、一回のステレオ距離画像取得は $37[\text{msec.}]$ であり、PCクラスタを用いた並列FLSM処理の計算時間は最大で $24[\text{msec.}]$ であった。これに対し、一台のコンピュータのみを用いた場合はFLSM処理の計算時間は $77[\text{msec.}]$ であった。次に、複数移動物体の追跡実験結果を図3に示す。図3(a)は実際の実験の様子、図3(b)はボクセル空間を上方から示したもので、図3(c)はボクセル空間を斜め上から示したもので、対象物体は図3中の矢印の向きに移動する。これより、複数対象物が交差し、相互オクルージョンが発生する場合でも、人体概形を保存しつつ追跡できていることがわかる。

表1 FLSMの計算時間の比較

	PC cluster			Single PC
	Average	Max.	Min.	
Calculation time of the FLSM [msec.]	17	24	9	77
Number of the reconstructed 3D voxel	5765	7418	3481	13357

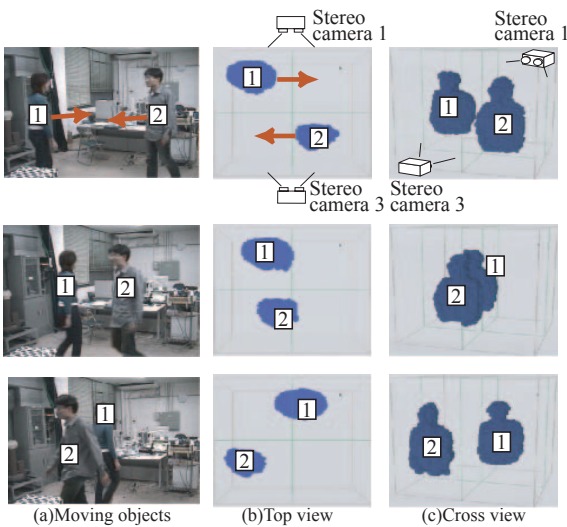


図3 複数対象物体の3次元形状復元

### 3.2 対象物体の移動方向の推定

次に動物体境界の移動方向の推定手法について述べる。まず、時刻 $t - \Delta t$ で構築した3次元モデルの境界ボクセル $Z(t - \Delta t, i)$  ( $0 \leq i < N(t - \Delta t)$ )と時刻 $t$ で構築した3次元モデルの境界ボクセル $Z(t, j)$  ( $0 \leq j < N(t)$ )との対応付けを行う。ここで、 $N(t)$ は時刻 $t$ で復元した3次元モデルの境界ボクセルの総数とする。具体的には、まず時刻 $t - \Delta t$ で復元した境界ボクセル $Z(t - \Delta t, i)$ にラベル $L(t - \Delta t, i)$ を格納し、距離場の構築処理と同様の手順でNarrow Band内のボクセルにラベル $L(t - \Delta t, i)$ をコピーする。全ての境界ボクセルのラベルをNarrow Band内のボクセルにコピーすると、Narrow Band内のボクセルには3次元形状の最近傍境界ボクセルのラベルが格納される(図4(a))。次に、時刻 $t$ で構築した3次元形状の境界ボクセル $Z(t, j)$ に格納されているラベルより、境界ボクセル $Z(t - \Delta t, i)$ と境界ボクセル $Z(t, j)$ との対応付けを行い、相対変位を表すベクトル $Link(t, j) = Z(t, j) - Z(t - \Delta t, i)$ とする。ここで、時刻 $(t - \Delta t) \sim t$ において対象物体の局所的な形状は保持されると仮定すると、 $Link(t, j)$ と境界ボクセル $Z(t, j)$ 近傍の境界面の法線ベクトル $n(t, j)$ との一致度より、対象物体の移動方向を推定することができる(図4(b))。そこで、時刻 $t$ における対象物体の移動方向ベクトル $MD(t)$ は

$$MD(t) = (1.0 - \alpha) \sum_{|Link(t, j) \cdot n(t, j)| > \beta} Link(t, j) + \alpha MD(t - \Delta t) \quad (2)$$

と定義する。ただし、 $\alpha, \beta$ は定数である。

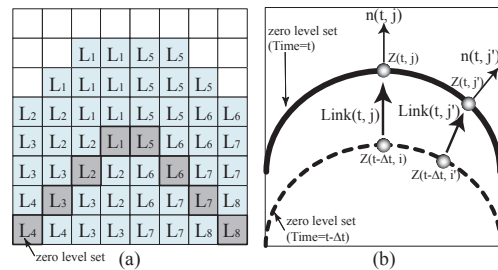


図4 動物体の移動方向の推定

対象物体の移動方向を推定する手法として、例えば復元した3次元形状の重心位置の時系列データを用いることが考えられる。しかし、例えば腕や足などの体の一部のみを動かす場合、全体の重心位置を用いる手法ではその部位のみの移動方向を推定することは困難である。これに対し、提案した移動方向推定法は、境界の局所的な移動方向の推定が可能であり、移動部位の切り出しも期待できる。

例として図5に示す半径0.1mの球体を用いて移動方向推定のシミュレーション実験を行い、その推定性能を評価した。実験条件は、X軸、Y軸、Z軸に沿ってそれぞれ0.01mずつ、合計1.5m動かした場合と、Y軸を回転軸に5度ずつ回転した場合の4通りである。また、軸方向へ移動する場合は $\alpha = 0.0$ 、 $\beta = 0.98$ とし、軸周りで回転する場合は $\alpha = 0.4$ 、 $\beta = 0.98$ とした。表2に推定された移動方向ベクトルと実際の移動方向ベクトルとの角度の差の平均と標準偏差を示す。これより、提案

手法により物体の移動方向の推定が可能であることが確認できる。一方、軸方向への移動と比較し、軸周りの回転の推定結果が悪いことがわかる。これは、3次元形状の境界ボクセルに格納されているラベルを Narrow Band 内にコピーする際、異なるラベルが既に仮登録されている場合には、新たなラベルを上書きするため、正しいラベルが保持されない場合があるためと考えられる。この解決法として、復元した3次元形状のラベルを Narrow Band 内にコピーする際に、3次元形状の法線方向へのコピーを優先することが挙げられる。

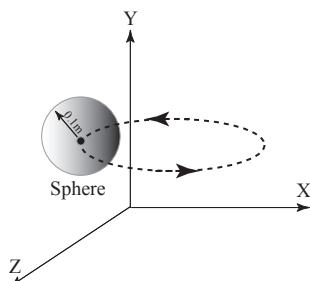


図5 球体の移動方向の推定

表2 推定された動物体の移動方向の精度評価

	Average [deg.]	Standard variation [deg.]
Translation along the x-axis	0.79	1.77
Translation along the y-axis	0.51	1.59
Translation along the z-axis	2.45	2.72
Y-axis rotation	4.67	2.45

### 3.3 並列 FLSM のための負荷分散の最適化

3.1節で示した従来のシステムは、並列 FLSM 処理においてボクセル空間を単純に分割しているため、物体の位置や形状、物体数によって特定の計算機に負荷が集中する場合があった(図6(a))。そこで推定した動物体の移動方向情報を用いた、PC クラスタを用いた並列 FLSM のための計算負荷の均衡化手法を提案する。

まず、対象物体の位置と復元した3次元形状のボクセル数に応じて、ボクセル空間の分割面を決定する。具体的には、まず FLSM 計算機において復元したそれぞれの3次元形状情報を表示用計算機へと送信する。次に表示用計算機において対象物体の形状分布を統合し各領域内の3次元形状のボクセル数が等しくなるようにボクセル空間を4つの領域へと分割し、ボクセル空間の分割面を更新する(図6(b))。最後に、更新したボクセル空間の分割面情報を各 FLSM 計算機へと送信し、FLSM 計算機では更新された分割面に応じて FLSM 処理領域を変更する。しかしこの手法では、並列 FLSM 処理において更新されたボクセル空間の分割面情報は、表示用計算機で更新されるため、実際には前時刻以前で復元した3次元形状分布を用いることになる。このため、各 FLSM 計算機間で復元する3次元形状のボクセル数は正確には均一化されない場合がある。

そこで、3.2節で提案した動物体の移動方向の予測値を利用し、並列 FLSM に割り当てるボクセル空間領域をより最適に決定する。具体的には、物体形状分布を用いて決定した分割点  $D(i, t) =$

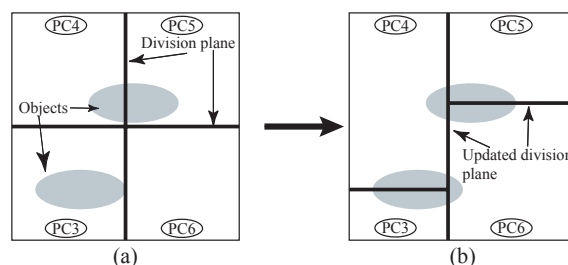


図6 物体形状に応じた適応的なボクセル空間の分割

$(d_x(i, t), d_y(i, t), d_z(i, t))$  ( $0 \leq i < FLSM$  の PC 数) とすると、新たな分割点  $D_{new}(i, t) = (dn_x(i, t), dn_y(i, t), dn_z(i, t))$  を以下のように決定する。

$$D_{new}(i, t) = D(i, t) + \gamma MD(t) / |MD(t)| \quad (3)$$

ただし、 $\gamma$  は定数である。これにより、各計算機で復元する3次元形状のボクセル数はほぼ均一となり、並列 FLSM の負荷分散の最適化が期待される。

## 4. 実験

提案したモーションスキャナシステムを移動する人体へ適用し、境界移動予測値を用いた負荷均衡化手法の有効性を確認する実験を行った。使用したボクセル空間の解像度は  $100 \times 100 \times 100$  (ボクセル空間の一边は  $1.5cm$ ) である。

まず、図7(a)のように腕をあげた状態でシーン内を移動する対象物体の追跡実験を行った。ただし、並列 FLSM に割り当てるボクセル空間領域を単純に4分割した場合 (Exp.A)、形状分布から分割面を決定した場合 (Exp.B)、及び対象物体の移動方向の予測値に基づいてボクセル空間を分割する場合 (Exp.C) について実験を行った。図7(b)に (Exp.A) の結果、図7(c)に (Exp.C) の結果をそれぞれ示す。この結果より、(Exp.A) では特定の計算機に FLSM 計算負荷が集中したため、3次元形状復元のために必要な FLSM 処理の収束計算回数を得られず、腕の一部に欠損が生じている。一方、(Exp.C) では、欠損を生じることなく3次元形状を復元している。また表3に (Exp.A)、(Exp.B)、及び (Exp.C) の計算時間の比較を行った結果を示す。ただし  $\alpha = 0.3$ ,  $\beta = 0.9$ ,  $\gamma = 4$  である。これより、(Exp.C) の物体の移動方向の予測値に基づく FLSM 計算機間の計算負荷の均衡化を行う場合、復元する3次元形状のボクセル数が増加するにも関わらず、より高速に3次元形状の復元が可能であることがわかる。

表3 並列 FLSM の計算時間の比較

Voxel space division	Average calculation time [msec./1voxel]	Total voxel number of the reconstructed 3D model
(Exp.A) Equal division	0.015	7638
(Exp.B) Adaptive division	0.012	9004
(Exp.C) Adaptive division using moving direction	0.010	12019

さらに提案した手法に基づき、ステレオカメラ5台を用いて詳細な人間動作の追跡実験を行った。実験では図8に示すように、ステレオカメラ1~4は側面に、またステレオカメラ5は天井に設置した。図9(a)に対象物体の実際の様子、及び図9(b)

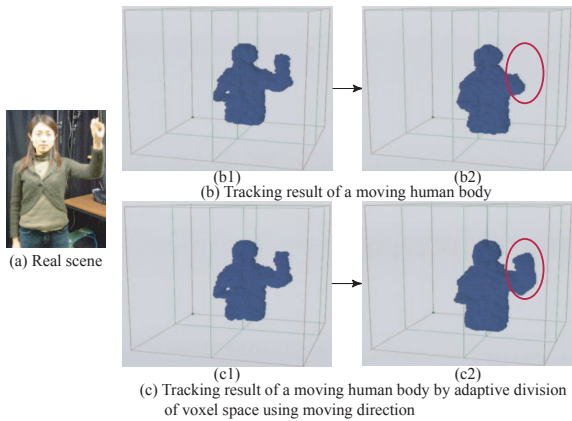


図7 負荷分散の最適化手法を用いた3次元形状復元

に復元した形状を示す。また生成したモデルに対し、マーチングキューブ法を適用し、その後テクスチャマッピングを行った結果を示す(図9(c))。

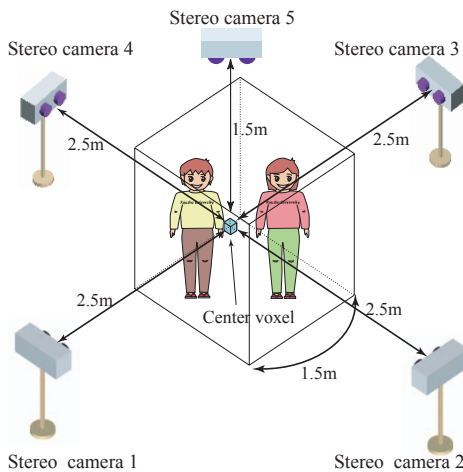


図8 複数ステレオカメラを用いた3次元モーションキャプチャシステム

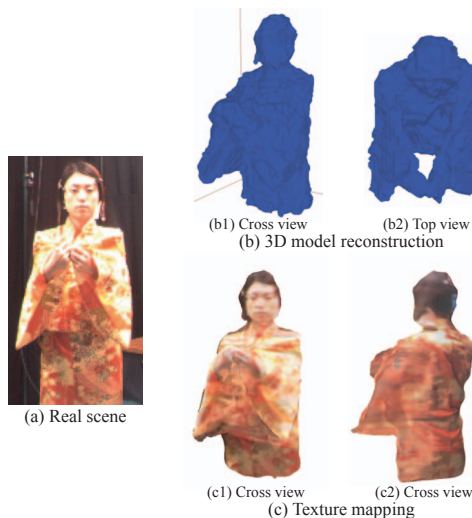


図9 詳細な3次元形状復元

## 5. まとめ

本報告ではシーン内に存在する複数対象物体の3次元形状をオクルージョンに頑強に復元するモーションキャプチャシステム

の概要を示した。また、Fast Level Set Method の特性を用いた動物体の移動方向推定手法を提案し、その応用例として、PC クラスタを用いた並列 Fast Level Set Method のための境界移動方向の予測値に基づく計算負荷の最適化手法を提案した。動物体の追跡実験により従来システムと比較して、より高速な3次元形状の復元が可能であることを示した。今後は増設したステレオカメラを用い、シーン内に存在する複数対象物体の3次元形状をオクルージョンに頑強に実時間で復元するシステムを開発する。

## 文献

- [1] W. Martin and J. Aggarwal, "Volumetric description of objects from multiple views", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.5, No.2, pp.150-158, 1983
- [2] A. Laurentini, "The visual hull concept for silhouette-based image understanding", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol.16, No.2, pp.150-162, 1994
- [3] E. Borovikov and L. Davis, "A Distributed System for Real-time Volume Reconstruction", *IEEE Proc. of CAMP-2000*, 200
- [4] K. Cheung, T. Kanade, J. Bouguet and M. Holler, "A real time system for robust 3D voxel reconstruction of human motions", *Proceedings of the 2000 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol.2, pp.714-720, 2000
- [5] M. Li, M. Magnor and H. Seidel, "Hardwareaccelerated visual hull reconstruction and rendering", *In Proc. of Graphics Interface*, 2003
- [6] K. Kutulakos and S. Seitz, "A theory of shape by space carving", *International Journal of Computer Vision*, vol.38, No.3, pp.199-218, 2000
- [7] S. Nobuhara and T. Matsuyama, "Heterogeneous Deformation Model for 3D Shape and Motion Recovery from Multi-Viewpoint Images", *Proceedings of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp.566-573, 2004
- [8] T. Kanade, P. Rander and P. Narayanan, "Virtualized Reality: Constructing Virtual Worlds from Real Scenes", *IEEE Multimedia, Immersive Telepresence*, vol.4, No.1, pp.34-47, 1997
- [9] P. Narayanan and P. Rander and T. Kanade, "Constructing Virtual Worlds using Dense Stereo", *Proceedings of 6th IEEE International Conference on Computer Vision*, pp.3-10, 1998
- [10] S. Vedula and S. Baker and T. Kanade, "Image-Based Spatio-Temporal Modeling and View Interpolation of Dynamic Events", *ACM Transactions on Graphics*, vol.24, No.2, April, 2005
- [11] 岩下, 倉爪, 辻, 原, 長谷川, "Fast Level Set Method を用いた複数移動物体の3次元追跡", *日本ロボット学会論文誌*, vol.23, No.7, pp.813-820, 2005
- [12] J. Sethian, "A fast marching level set method for monotonically advancing fronts", *Proceedings of the National Academy of Science*, vol.93, pp.1591-1595, 1996
- [13] J. Sethian, *Level Set Methods and Fast Marching Methods*, second edition, Cambridge University Press, UK, 1999
- [14] 倉爪, 由井, 辻, 岩下, 原, 長谷川, "Fast Level Set Method の提案とビデオ画像の移動物体のリアルタイム追跡", *情報処理学会論文誌*, vol.44, No.8, pp.2244-2254, 2003
- [15] Y. Iwashita, R. Kurazume, T. Tsuji, K. Hara and T. Hasegawa, "Fast Implementation of Level Set Method and Its Realtime Applications", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp.6302-6307, 2004
- [16] D. Adalsteinsson and J. Sethian, "The fast construction of extension velocities in level set methods", *J. Computational Physics*, vol.148, pp.2-22, 1999
- [17] D. L. Chopp, "Computing minimal surfaces via level set curving flow", *J. Computational Physics*, vol.106, pp.77-91, 1993
- [18] K. Otsuka and N. Mukawa, "Multiview occlusion analysis for tracking densely populated objects based on 2-D visual angles", *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, vol.1, pp.90-97, 2004