## Fast Level Set Method を用いた複数移動物体の 実時間計測システム

† 九州大学大学院システム情報科学研究院 =812-8581 福岡県福岡市東区箱崎 6-10-1 †† 九州大学大学院芸術工学研究院 =815-8540 福岡県福岡市南区塩原 4-9-1

E-mail: †{yumi,kurazume,tsuji,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, ††hara@design.kyushu-u.ac.jp

あらまし 移動体追跡や 3 次元幾何モデリングで用いられる Level Set Method は , 曲面の分裂や結合など位相変化への対応が容易であるという , Snakes などの従来の動的輪郭モデルと比較して優れた特徴を有する . しかし , この手法は初期化や更新時の計算コストが高く , 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 . これに対し , 我々はこれまでに高速で安定な Level Set Method の実現方法として Fast Level Set Method を提案し , ビデオ画像上での複数移動物体の実時間追跡実験や , ステレオカメラを用いた 3 次元モーションスキャナシステムを構築している . 本報告では , Fast Level Set Method の計算を PC クラスタを用いた並列計算により高速化することで , これまでに構築した試作機に比べて対象物体のより詳細な 3 次元形状をより高速に復元できるモーションスキャナの第 2 次試作機を紹介し , 開発したシステムを用いた人体概形の実時間追跡実験の様子を示す . キーワード Level Set Method , 3 次元モデリング、モーションキャプチャ , PC クラスタ

## Realtime Tracking of Multiple Objects using Fast Level Set Method

Yumi IWASHITA<sup>†</sup>, Ryo KURAZUME<sup>†</sup>, Tokuo TSUJI<sup>†</sup>, Kenji HARA<sup>††</sup>, and

### Tsutomu HASEGAWA<sup>†</sup>

- † Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University Hakozaki 6–10–1, Higashi-ku, Fukuoka, 812–8581 Japan
- †† Graduate School of Design, Kyushu University Shiobaru 4–9–1, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540 JAPAN E-mail: †{yumi,kurazume,tsuji,hasegawa}@irvs.is.kyushu-u.ac.jp, ††hara@design.kyushu-u.ac.jp

Abstract The level set method (LSM) has been widely used for various applications such as motion tracking and 3D geometrical modeling. However, the calculation cost of reinitialization and updating of the implicit function is considerably expensive as compared with conventional active contour models such as "Snakes". To tackle this problem, we have proposed an efficient algorithm of the LSM named the Fast Level Set Method(FLSM). We have developed a real-time contour detection and tracking system of moving objects in video images, and a prototype system of a 3D motion tracking system of multiple targets in stereo range images using the FLSM. This paper introduces implementation of the system on a PC-cluster and some experiments based on the PC-cluster.

**Key words** Level set method, 3d shape reconstruction, motion capture, pc cluster

### 1. はじめに

2次元,3次元空間での移動体追跡や幾何モデリングの分野において,Snakes [1] や Deformable surface [2] に代表される動的輪郭モデル (Active Contour Model) は,対象物体を内包する閉曲面を安定に抽出するための手法として広く利用されている.しかし,従来の動的輪郭モデルに共通して,閉曲面の分

離や閉曲面同士の結合など,位相変化への対応が困難であることが問題とされていた.

これに対し,90年代前半に本質的に位相変化が可能な動的輪郭モデルとして Level Set Method (LSM) [3] が提案され,移動体追跡 [4] や 3 次元幾何モデリング [5] などの応用例が報告されている.しかし,初期化処理や閉曲面更新時の計算コストが非常に高く,計算の高速化が大きな課題であった.

この問題に対し、我々はこれまでに高速で安定な Level Set Method の解法として、拡張成長速度場の利用と高速な拡張成長速度場の構築を特徴とする新たな Fast Level Set Method (FLSM)を提案した [13].またビデオ画像上での複数移動物体の実時間追跡実験や、複数ステレオカメラを用いて 3 次元人体概形の実時間追跡を行う 3 次元モーションスキャナの試作機を開発している [14].今回、我々は Fast Level Set Method の計算を PC クラスタを用いた並列計算により高速化し、これまでに構築した試作機に比べて対象物体のより詳細な 3 次元形状をより高速に復元できるモーションスキャナの第 2 次試作機を構築した、本報告では、これまでに開発した Fast Level Set Method を概説し、ビデオ画像上での複数移動物体の実時間追跡実験や、新たに開発したシステムを用いた人体概形の実時間追跡実験の様子を示す。

### 2. Level Set Method とその高速化手法

#### 2.1 Level Set Method

Level Set Method は,Osher,Sethian ら [3] によって提案された位相変化が可能な動的輪郭モデルである.例として,3次元 xyz 空間内での LSM を用いた境界追跡法について説明する.まず,時刻 t での境界位置を C(p,t) とする.ただし $p=(p_x,p_y,p_z)$  である.この境界に含まれる点 p は,移動速度  $F(\kappa)$  で法線方向 N に移動していると考える.ここで  $\kappa$  はその点での境界の曲率であり,F を成長速度という.

次に,時刻 t における補助関数  $z=\Psi(x,y,z,t)$  を導入し,境界位置 C(p,t) はその関数の一部,すなわち  $z=\Psi(x,y,z,t)=0$  を満たす  $\Psi$  で表されると考える.ここで,点 p(t) が境界 C(p,t) 上の点であると仮定すると,これが常に  $\Psi(x,y,z,t)$  のゼロ等高面である条件は, $\Psi(p(t),t)=0$  で表される.これを時間で偏微分すると,

$$\Psi_t + \nabla \Psi(p(t), t) p_t = 0 \tag{1}$$

となり, さらに式(1)は以下のように変換される.

$$\Psi_t = -F(\kappa) \mid \nabla \Psi \mid \tag{2}$$

$$\Psi(C_0(p), 0) = 0 \tag{3}$$

このように境界 C(p,t) を直接的に移動する代わりに,補助関数  $\Psi(x,y,z,t)$  を更新し, $\Psi(x,y,z,t)=0$  として境界を求めることで,トポロジーの変化に対応した領域追跡が可能となる.実際に空間上の点 i,j,k において補助関数  $\Psi_{ijk}$  を更新するには,以下のいわゆる Upwind Scheme が使われることが多い.

$$\psi_{ijk}^{n+1} = \psi_{ijk}^{n} - F(i,j,k) |\nabla \psi_{ijk}^{n}| \Delta t \tag{4}$$

ただし, $\Delta t$  は積分間隔である.

3 次元距離画像における領域追跡の具体的な実現法を考える.例えば空間上の点 (x,y,z) における時刻 t での  $\Psi(x,y,z,t)$  の値を,その時刻における境界  $\Psi(x,y,z,t)=0$  からの符号付距離(境界の内側が負,外側が正)とし,また成長速度  $F(\kappa)$  を

$$F(\kappa) = k_I(a - b\kappa) \tag{5}$$

で与えることにする.ただし  $k_I$  は距離データ点の密度勾配に関する項, $\kappa$  はその点での境界の曲率, $a,b \geq 0$  は定数とする.

さて、拡張成長速度場 [3] [13] を用いた Level Set Method では、各ボクセルの成長速度を決定するために、まず zero level set (補助関数値が 0 のボクセル) 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,Upwind Scheme により補助関数を更新する場合,更新とともに積分誤差も積算されるため,安定な解を得るには一定回数更新後に各ボクセルごとに補助関数の値(一般には現在の 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」の処理が必要である.

しかし,上記の成長速度場の構築処理や再初期化処理において,コピー元の zero level set を決定したり各ボクセルで現在の zero level set からの距離を得るには,各ボクセルからの最近傍 zero level set の探索処理を行わなければならない.この計算コストは非常に高く,これが Level Set Method の大きな問題となっている.

#### 2.2 Narrow Band Method

Level Set Method の計算コストを削減するために,これまでに様々な高速化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 [6]. 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,この手法ではゼロ等高面に近い領域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。さらにこの手法では計算コスト削減のために,ゼロ等高面がNarrow Band 領域の境界に近付いたときのみ,Narrow Band 領域内で再初期化処理を行う.

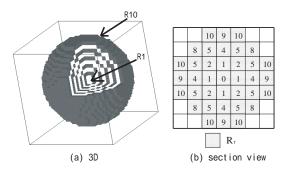
### 3. Fast Level Set Method の提案

NB は Level Set Method に比べると高速な手法であるが,依然として計算コストは高い.そこで,我々は i) 最近傍点探索処理を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,高速に成長速度場を構築する Fast Narrow Band Method (FNB)[5] と,ii) 補助関数の再初期化処理の高速化と頻繁な再初期化を特徴とする,高速で安定な Level Set Method である Fast Level Set Method を提案した [13].以下,これらの手法を紹介する.

## 3.1 高速な拡張成長速度場の構築法 (Fast Narrow Band Method)

ここでは 3 次元空間での実装法について説明する.まず,断面図が図 1(b) のように表される球形の参照マップ球図 1(a) をあらかじめ作成する.これは,原点周辺にあるボクセルを原点からの距離に応じて分類したものである.つまり,原点からの 2 乗距離がr であるボクセルの集合を $R_r$  とし, $r=0\sim\delta(\delta+1)$  に対するリスト  $R_0,R_1,\cdots,R_{\delta(\delta+1)}$  をそれぞれ作成する.なお,ここで距離にはボクセル中心間のユークリッド距離を用いることとし,また  $\delta>0$  は Narrow Band のバンド幅である.また,バンド幅  $\delta$  の Narrow Band 領域は,各 zero level set からの距離を小数点以下で四捨五入した整数値が $\delta$  以下になるようなグリッドの

集合と定義する.これは, $\delta(\delta+1)<(\delta+0.5)^2<\delta(\delta+1)+1$  が常に成り立つことから,zero level set からの 2 乗距離が  $\delta(\delta+1)$  以下のボクセルの集合ともみなせる.一例として図 1 に,バンド幅  $\delta=3$  における参照マップ球( $R_0\sim R_{12}$ )の断面を示す.グリッドに書き込まれている数字(r)は,属しているリスト( $R_r$ )を示す.



☑ 1 An example of reference map.

次に,作成した参照マップ球を用いて拡張成長速度場を構築 する.ただし, zero level set での成長速度は式(5)等により あらかじめ決定されているものとする.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 るようなボクセルを選択し、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ボクセルに仮登録する、この処 理をすべての zero level set に対して行う.次に,添字の値を 1 小さくして同じ処理を行い,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,各ボクセルには最も近いzero level set における成長速度の値が登録されている.このように, 参照マップ球内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が構築でき る.以上の手法を Fast Narrow Band Method (FNB)[5] と 呼ぶことにする.

## 3.2 参照マップ球の分割と再初期化処理との統合 (Fast Level Set Method)

前項の FNB は書き込む領域を限定することでさらに効率化できる.例えば,ある zero level set (a) の左側に zero level set (b) が隣接している場合 (a) の左側の領域には (b) よりも (a) に近い点は存在しない.同様に (b) の右側の領域には (b) よりも (a) 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,書き込む領域を限定することができる.

そこでまず,図 2 のように参照マップ球を原点からの方向により,扇形の領域を 12 つ,直方体の領域を 6 つ,球を 8 等分にした領域を 8 つ,合計 26 つの領域に分ける.ただし扇形の領域を A 領域,直方体の領域を B 領域,球を 8 等分にした領域を C 領域と呼ぶことにする.

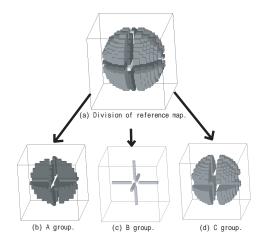
次に各 zero level set に対し,次の手順により拡張成長速度場を構築する.

(1) A 領域において zero level set に隣接するボクセルを

調べ,そこに他の zero level set があればその A 方向を書き込まない領域とする.また同時に,その A 領域に隣接する C 領域も書き込まない領域とする.

- (2) B 領域において zero level set に隣接するボクセルを調べ、そこに他の zero level set の点があるときは、その方向の B 領域を書き込まない領域とする。また同時に、その B 領域に隣接する A 領域、C 領域も書き込まない領域とする。
- (3) C 領域において zero level set に隣接するボクセルを調べ,そこに他の zero level set があればその C 方向を書き込まない領域とする.
- (4) (1),(2),(3) で残った領域に対し,前項と同様にリストを用いて成長速度を書き込み,拡張成長速度場を構築する.

上記の手法を用いると,書き込みのオーバーラップを減らす ことができ,拡張成長速度場を高速に構築できる.



☑ 2 Division of reference map.

さて, Level Set Method により境界を安定に検出するには, 一定回数更新後に各グリッドにおいて, 現在の 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処理が必要となる.

ところが,前項までに提案した拡張成長速度場の構築処理は, 各グリッドで現在の zero level set からの距離に応じて成長速度を上書きする処理であり,その過程で距離も同時に上書きすることで,各グリッドに 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ー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.

拡張成長速度場の計算は各更新時ごとに行われるので再初期 化の処理もほとんど計算量を増やすことなく,最大で各更新時 ごとに行うことができる.

# 4. ビデオ画像上の移動物体のリアルタイム検出と追跡

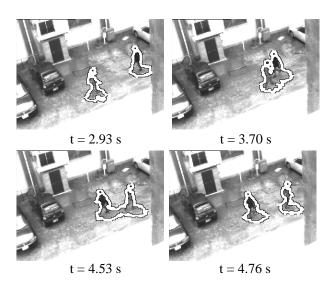
次に実際のビデオ画像に対して提案した Fast Level Set Method を適用し、移動物体の検出とリアルタイム追跡実験について述べる.使用した画像のサイズ、入力速度はそれぞれ320x240pixel、30Hz、使用した計算機は Pentium IV、2GHzであり、Fast Level Set Method の処理は約60Hzで実行されている.また成長速度の最大値は1ピクセル、積分時間幅は4

であり, Narrow Band の幅は5ピクセルとした.

実験ではまず背景差分により移動物体の領域を大まかに検出した.検出した移動物体領域の中心から外側へ,Fast Level Set Method により zero level set を進行させて,濃淡値あるいは背景差分値が急激に変化する領域を移動物体の境界として検出,追跡した.すなわち式(5)で用いる輝度勾配項  $k_I$  は,以下の式により濃淡画像 I(x,y) と背景差分画像  $D(x,y)=I(x,y)-I_{org}(x,y)$  の両方から決定した.

$$k_{I} = \frac{1}{1 + \min(|\nabla I(x, y)|, |\nabla D(x, y)|)}$$
(6)

図3に追跡開始から時間ごとの処理結果を示す、これより、移動物体が画面上を約100 [pixel/sec.] で移動している場合でも、正確に移動物体の輪郭を抽出し、遅れなく追跡できていることがわかる、また、当初2つの閉曲線で表されていた移動物体の境界が、移動物体が交差したことで1つの閉曲線に統合され、次の時刻で再度2つの閉曲線に分離しており、境界の位相変化に柔軟に対応できている.



☑ 3 Simultaneous tracking of multiple objects.

### 5. ステレオカメラを用いた人体の3次元リアル タイム追跡

対象物体全周の 3 次元形状をテレビカメラを用いて復元する 手法として,視体積交差法 [9] [10] [12] ,多視点ステレオ [11] な どが挙げられる.視体積交差法は,任意の視点から対象を撮影 し,その時得られる 2 次元シルエットを実空間に投影した錐体 (視体積) を考えると,対象はその錐体中に含まれるという制約 条件に基づいている.従って,対象物体の詳細な形状を求める には多くのカメラを配置する必要があり,またシルエットが正 確に切り出されるように背景も工夫する必要がある.また,凹 物体やオクルージョンがある場合には,原理的に形状を復元で きない.

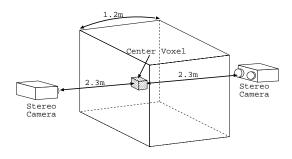
そこで,我々はこれまでにより少数のステレオカメラ (Point-Grey 社製, Bumblebee) を用い,提案した FLSM を適用して 凹物体やオクルージョンがある場合でも人体概形のリアルタイム追跡を行うことができる試作機を構築した [14]. 本報告では,

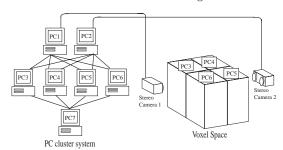
Fast Level Set Method の計算を PC クラスタを用いた並列計算により高速化することで,これまでに構築した試作機に比べて対象物体のより詳細な3次元形状をより高速に復元できるモーションスキャナの第2次試作機を紹介し,開発したシステムを用いた人体概形の実時間追跡実験の様子を示す.

次に,求めたボクセル集合 S を用い,FLSM による人体概形の追跡を行う.まず,ボクセル集合 S の中で OUT が投票されているボクセルに隣接するボクセルを停止領域 (stopping region),その他のボクセルを内部領域 (inner region) と定義する.全ボクセル空間を内包する初期曲面を考え,FLSM を用いて曲面をある速度で収縮させ,停止領域内に zero level set が到達した場合には,成長速度を小さくすることにより人体概形を復元する.

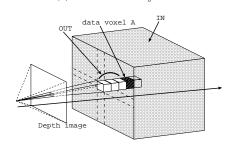
上記の計算は,処理の高速化を図るため,ギガビットイーサネットで相互に接続された7台の計算機(Pentinum  $Xeon \times 2, 3.06 GHz$ )により並列処理される(図5).まずそれぞれステレオカメラが接続された2台の計算機(PC1,PC2)により,同期した2枚のステレオ距離画像を取得する.次に得られた距離画像はFLSM計算用計算機に送られる.ただしここではボクセル空間を4つの領域に均等に分割し,それぞれの空間に1台ずつ計算機を割り当て (PC3-PC6),4台で並列にFLSMの計算を実行した.各FLSM用計算機では,まず複数距離画像の統合を行った後,それぞれの領域に対してFLSMを適用する.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 7(a) にボクセル空間内に複数人体が存在する様子の水平断面図と,その時の停止領域と内部領域の様子を示す.このように両方のカメラから複数人体の全ての表面が観測できれば,FLSM を適用して正確な人体概形の復元が可能である.しかし,人体が移動すると相互オクルージョンが発生し,また腕や足などによってもセルフオクルージョンが生じることがある.これらの場合,例えば停止領域が図 7(b) のようになるため,2 つが結合した概形が復元される.そこで,オクルージョン領域が発生する場合でもそれぞれの形状を分離して復元するために,オクルージョンの領域内では成長速度を小さくし,zero level set





☑ 5 PC cluster system.



☑ 6 Voxel voting.

を進行させないことにする.これにより,分離して観測されていた物体は,オクルージョンが生じても,ある程度元の形状を保ち続けることができる.

本システムの特徴として,次の3つが挙げられる.まず,本 手法では距離データを時空間的に統合するため,距離画像内の ノイズに対して頑強である.次に,本手法はシルエット法に比 べて背景と対象の分離が容易であり,背景差分や特殊なスタジ オは必要ない.また,FLSMにより閉領域境界を追跡するため, 一時的にデータ欠損が生じても滑らかな境界の保存が可能であ る.すなわち,一時的にオクルージョン領域が発生しても,そ の領域では以前の境界を保つことで物体形状の概形を得ること ができ,オクルージョンに強い.

### 5.2 実 験

提案した FLSM を適用して人体の追跡実験を行った.使用した距離画像のサイズは 640x480 pixel である.

図 8 に人間動作の追跡実験の結果を示す.ただし,図 8(a) は実験の様子,図 8(b) は人体形状の追跡結果を示している.この時使用したボクセル空間の解像度は  $100\times100\times100$ (ボクセルの一辺は 1.2cm) であり,ステレオカメラから距離画像を取得した後,複数距離画像の統合処理が 31ms,各計算機間での通信時間は最大 69ms であった.また,表 1 に FLSM の計算のそれぞれの処理時間を示す.PC1 台では,FLSM の計算時間は 220ms であったことから,PC クラスタを用いた並列計算により,対象物体の 3 次元形状をより高速に復元できることが

確認できた.しかし,本システムは 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る.そこで,今後はこの問題の解決策として対象の位置や対象形状の複雑さ(面の数)に応じた対象分割による並列分散処理による計算最適化手法を検討する予定である.

表 1 FLSM 処理の計算時間

	PC クラスタ			PC1 台
	平均	最大	最小	
FLSM の処理時間 [msec.]	67	82	56	220
復元した形状のボクセル数	2535	3336	1710	8905

次に,ボクセル空間の解像度を  $200\times 200\times 200$ (ボクセルの一辺は 0.6cm) にし,人間動作の追跡実験を行った.ただし,FLSM の処理は 1 台の計算機のみで行っている.図 9 に,得られた人体形状に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.詳細に人体形状を復元できているものの,全体の処理時間は 1190ms であった.

次に,複数対象物の追跡を行った結果を図 10 に示す.ただし,図 10(a) は実際の実験の様子,図 10(b) はボクセル空間を上方から示したもので,複数対象物は図 7(c) から図 7(d) に示すように移動する.また,図 10(c) はボクセル空間を斜め上方から示したものである.図 10 より,複数対象物が交差し,相互オクルージョン領域を含む場合でも,人体概形を保存しつつ追跡できていることがわかる.これらの実験より,シーンに人体が複数存在し,お互いが交差するような場合でもそれぞれを分離した 3 次元形状の復元と追跡が可能であることが確認できた.しかし,本システムは単純な閾値処理により複数対象物をそれぞれ分離しているため,オクルージョン時間や物体間の距離によって複数対象物を分離することが困難になる場合がある.そこで,今後はこの問題の解決策として,ラベリングした対象物の概形や体積などの情報を保存し,それらの情報を用いて複数対象物の分離を行う手法を検討する予定である.

### 6. ま と め

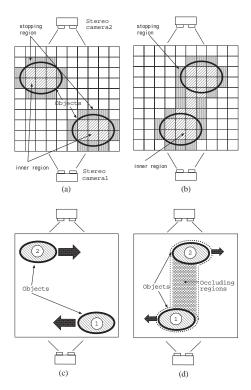
本報告では高速で安定な Level Set Method の解法として,拡張成長速度場の利用と高速な拡張成長速度場の構築を特徴とする Fast Level Set Method の概要を示した.また,Fast Level Set Method の概要を示した.また,Fast Level Set Method の計算を PC クラスタを用いた並列計算により高速化することで,これまでに構築した試作機に比べて対象物体のより詳細な 3 次元形状をより高速に復元できるモーションスキャナの第 2 次試作機を開発した.今後は,ステレオカメラの台数を増やし対象物体の全周に配置し,より詳細な対象物体の 3 次元形状を復元するシステムを開発する.

### 謝辞

本研究の一部は,21世紀 COE プログラム「システム情報科学での社会基盤システム形成」および総務省戦略的情報通信研究開発推進制度の支援を受けた.

### 文 献

- M. Kass, A. Witkin and D. Terzopoulos, "Snakes, Active contour models", Int. J. Computer Vision, Vol.1, No.4, pp.321-331, 1988
- [2] D. Terzopoulos, A. Witkin and M. Kass, "Constraints on



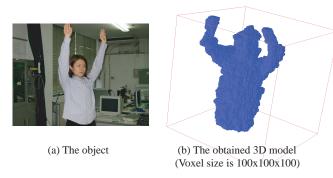
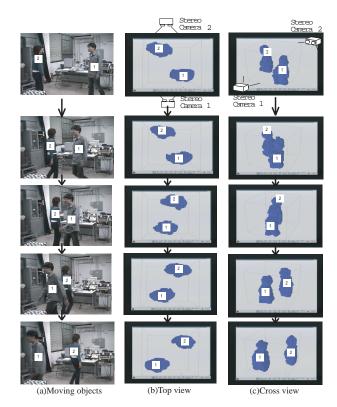


図 8 3D reconstruction of human body.



図 9 3D reconstruction of human body.

- deformable models: Recovering 3D shape and nonrigid motion", Artif. Intell., vol.36, pp.91-123,1988
- [3] S. Osher and J. A. Sethian, "Fronts propagating with curvature dependent speed: Algorithm based on Hamilton-Jacobi formation", J. Computational Physics, Vol.79, pp.12-49, 1988
- [4] N. Paragios and R. Deriche, "Geodesic active contotraurs



 $\boxtimes$  10 3D reconstruction of multiple human bodies.

- and level sets for detection and tracking moving objects", *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.22, pp.266-280, 2000
- [5] S. Yui, K. Hara, H. Zha and T. Hasegawa, "A fast narrow band method and its application in topology-adaptive 3-D modeling", Proc. ICPR02, vol.IV, pp.122-125, Aug, 2002
- [6] D. L. Chopp, "Computing minimal surfaces via level set curving flow", J. Computational Physics, Vol.106, pp.77-91, 1993
- [7] J. A. Sethian, "A fast marching level set method for monotonically advancing fronts", Proc. Nat'l Acad. Sci. USA, Vol.93, pp.1591-1595, 1996
- [8] J. A. Sethian, "Level Set Method and Fast Marching Methods second ed.", Cambridge University Press, UK(1999)
- [9] W. N. Martin and J. K. Aggarwal, "Volumetric description of objects from multiple views", *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.5, No.2, pp.150-158, 1983
- [10] A. Laurentini, "The visual hull concept for silhouette-based image understanding", *IEEE Trans. on PAMI*, Vol.16, No.2, pp.155-162, 1994
- [11] Saito, H., Baba, S., Kimura, M., Vedula, S. and Kanade, T.: Appearance-based virtual view generation of temporallyvarying events from multi-camera images in the 3d Room, In Proceedings of Second International Conference on 3-DDigital Imaging and Modeling (3DIM99), pp. 516–525 (1999).
- [12] ウ 小軍 , 和田 俊和 , 東海 彰吾 , 松山 隆司, "平面間透視投影を用いた並列視体積交差法", 情報処理学会論文誌:コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42 , No.SIG6(CVIM2) , pp.33-43, 2001
- [13] 倉爪 亮,由井 俊太郎,辻 徳生,岩下 友美,原 健二,長谷川 勉, "Fast Level Set Method の提案とビデオ画像の移動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
- [14] 岩下 友美, 倉爪 亮, 辻 徳生,原 健二,長谷川 勉, "Fast Level Set Method を用いた3次元人体形状の実時間計測システムの 構築",情報処理学会コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM)研究会, CVIM-141-18, 2003