

動物体の 3 次元境界線からの逐次的 3 次元幾何モデリング

恒川 法和[†] 角 保志[‡] 山下 淳[†] 金子 透[†] 富田 文明[‡]

[†]静岡大学工学部機械工学科 [‡]産業技術総合研究所 知能システム研究部門
〒432-8561 静岡県浜松市城北 3-5-1 〒305-8568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第二

あらまし 相対的に移動する物体の境界線をステレオ視することで、実在する fixed edge と曲面の見かけの apparent edge に分類して、その幾何モデルを逐次的に構築する方法を述べる。物体が曲面で構成されている場合、視線方向に不変な特徴を抽出することが難しく、その物体が移動する場合、その対応関係はさらに複雑なものとなる。そこで本論文では、2つの手順からなる手法を用いてこの問題の解決を行う。まず移動する物体を 3次元復元し、境界線のセグメント対を対応単位として逐次的に生成する幾何モデルと位置合わせをする。次に、得られた位置合わせ結果を元に重複する fixed edge を検出し、残りの復元結果から連続して変化する apparent edge を検出する。以上の作業を繰り返し実行し、幾何モデルを生成する。実験結果より本手法の有効性を示す。

キーワード 3次元動物体、セグメントベースステレオビジョン、逐次的モデリング

Incremental 3-D Geometric Modeling from 3-D Boundaries of Moving Objects

Norikazu Tsunekawa[†], Yasushi Sumi[‡], Atsushi Yamashita[†],
Toru Kaneko[†], and Fumiaki Tomita[‡]

[†]Department of Mechanical Engineering, Shizuoka University
3-5-1 Johoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka 432-8561 Japan

[‡]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba Central 2, 1-1-1
Umezono, Tsukuba-shi, Ibaraki 305-8568 Japan

Abstract We propose a new method for incremental modeling of moving objects by classifying boundary lines of objects into fixed edges and apparent edges by segment-based stereo vision. It is difficult to extract features invariant to viewing points, when objects are constructed by curved surfaces. Additionally, it becomes more complex to find correspondence between frames, when the objects move. The proposed approach has two processes. First, 3-D boundary segments of moving objects are reconstructed and are matched with those of sequentially generated model. Next, overlapped fixed edges and continuously changing apparent edges are detected. Experimental results show the effectiveness of the proposed method.

Keywords 3-D moving object, segment-based stereo vision, incremental modeling

1 はじめに

物体の3次元幾何モデルの生成は,コンピュータビジョンやコンピュータグラフィックス,VRシステムに必要な不可欠な技術である.

従来の3次元幾何モデルの生成法としては,CADを用いる方法がある.しかし,CADは人手により入力する必要があり,形状が複雑になればなるほど入力に手間がかかる上に,自由曲面を有する自然物体を表現することは難しい.

センサを用いたモデル生成法には,レーザ光等を物体に投影するレンジファインダを用いる方法[1,2,3,4]がある.レンジファインダは物体の表面上に広がる密な点座標データが得られるため,有効な手法である.

他のセンサとして,複数台のカメラを用いるステレオビジョンがある.ステレオビジョンはレンジファインダに比べ密なデータを得ることが難しく,十分な精度が得られないなどの理由から一部の研究に用いられるのみであった[5,6].しかし最近の技術の進歩によって,ステレオビジョンを用いても十分な精度を得ることがより可能となり,今後,実用的にもその簡便性・融通性・汎用性・安全性等の観点から優位にあると考えられる.

またステレオビジョンは,テクスチャ状の対象を扱う相関法と対象物の境界線を高精度に求めるエッジ検出法に大別される.本稿では,後者のエッジ検出ステレオ法による逐次的物体モデル生成法について述べる.

エッジ検出ステレオ法によるモデル生成の際,最も問題となるのが,画像上に大きく分けて2種類のエッジが存在することである.1つは観測方向によって不変なエッジ(以下 fixed edge)であり,物体の幾何形状を示す.もう1つは,曲面上の観測方向に垂直な部分の点の集合である輪郭生成線が画像上に投影される見かけの輪郭線(以下 apparent edge)である.そこで,apparent edge と fixed edge を分類してモデルを生成することが重要となってくる.見かけの輪郭線を求める方法として,ステレオ視による輪郭生成線の3次元計測のずれを利用する方法[7,8]があるが,観測されるカメラ画像は多くのノイズを含み,3次元計測のずれのみでは見かけの輪郭線を明確に分類できるとはいえない.

そこで本論文では,物体が動く場合の時系列ス

テレオ画像を用いる手法について述べる.対象物体として,(1)剛体で単一の動き,(2)剛体で複数の動き,(3)非剛体で複数の動き,の3種類の場合を扱う.またモデル生成をする上で,エッジを分類する以外に重要となることは最適な位置合わせをすることである.3種類の対象について,最適な位置合わせをする手法も考える.それぞれの対象物体について,実測データより本システムの有効性を示す.

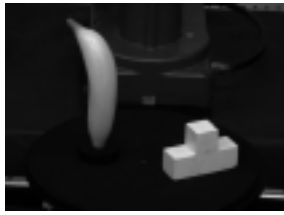
本論文の構成は以下の通りである.まず第2章で本システムの概要を述べ,第3章で位置合わせ手法について述べる.第4章で統合処理について,第5章で実験結果を示す.

2 システム構成

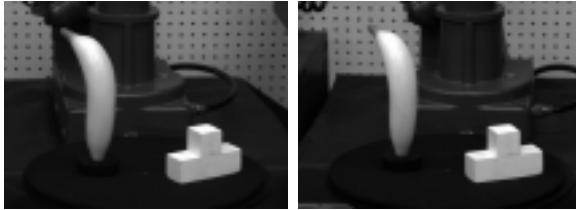
2.1 3次元復元

本システムでは,校正されたステレオカメラより入力される時系列ステレオ画像を用いる.ステレオ画像の入力には3眼ステレオカメラシステム[9]を用いた.入力ステレオ画像例(640×480 pixels, 256 gray-levels)を図1に示す.入力画像から背景を除去した後,観測している環境に存在する物体の境界線を抽出し,境界線を頂点(分岐点,屈曲点,遷移点,変曲点)で分割して,単調な直線セグメントまたは曲線セグメントを得る.このセグメントをステレオの対応単位として,その3次元距離の計測を行い,全セグメントの3次元位置を復元する[10,11,12].図2は3次元復元されたセグメントの3面図である.このセグメントを対応単位として各処理を行う.

但し,ステレオ視による輪郭生成線の3次元計測には,図3に示すような誤差が含まれる.これは異なる方向から観測される輪郭生成線が同一ではないことによる.ステレオ視による計測値と実際の値との誤差 e の大きさは,カメラの基線長 l と対象までの距離 d ,対象曲面の曲率 $1/r$ について, $l \ll d, r \ll d$ ならば, $e \cong rl/2d$ とみなすことができる.多くの場合, e は3次元計測による誤差に比べ十分に小さいと考えることができるので,本論文ではこの計測誤差については考慮しないこととする.



(a) 中央カメラ



(a) 左カメラ (b) 右カメラ

図1 入力ステレオ画像

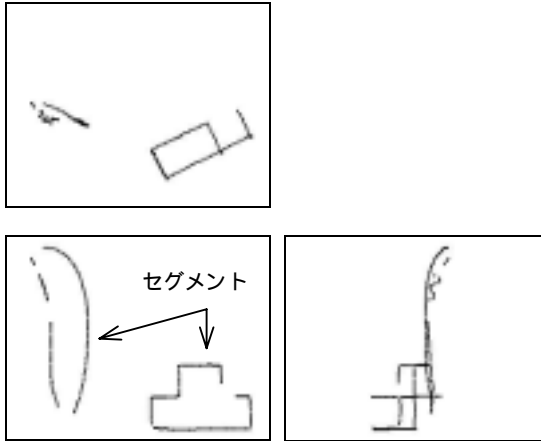


図2 復元された3次元セグメント(3面図)

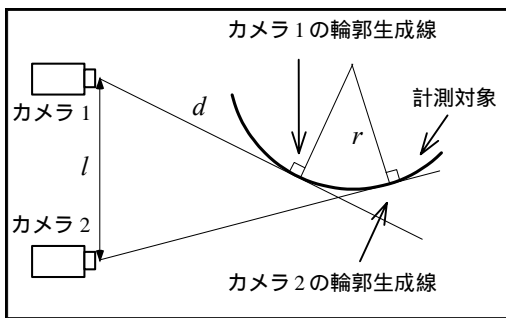


図3 ステレオ視による曲面の計測誤差

2.2 物体モデル

物体モデルは最初の3次元セグメントデータを元に、各フレームから得られる3次元データを組み合わせながら逐次的に生成する。物体モデルは、時系列ステレオ画像から得られる情報を元に

物体に不変の fixed edge と見かけ上観測される apparent edge を分類して構成される。

3 3次元データの位置合わせ

視点の異なる2つの3次元データを統合するためには、まずデータの位置合わせが必要となる。本章では前述の3種類の物体を扱うが、それぞれの場合について最適な位置合わせをする方法を述べる。

3.1 剛体で動きが単一の場合

剛体で物体すべてが同じ動きをする場合、apparent edge を除いたほとんどのセグメントは2つのデータ間で一致する。そこで、apparent edge を除いた残りのセグメントを用いて位置合わせを行う。apparent edge を除く方法は後述するが、位置合わせに必要な移動パラメタとは、3次元物体の位置姿勢の移動量のことであり、 3×3 の回転行列 R 、 3×1 の平行移動ベクトル t によって表すことができる。ここで、

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

とすると、3次元物体の移動量は 4×4 の座標変換行列 T と記述できる。すなわち、位置合わせとは最適な T を算出する処理である。

移動パラメタの推定は、3次元解析の主要な課題であり、様々な手法が提案されている。本研究では、特徴点としてセグメント対が構成する頂点を用い、文献[13]で提案した3次元物体認識手法によって時刻 t と時刻 $t+1$ の2つの3次元データの位置合わせを行う。位置合わせは、時刻 t の3次元座標 $D_n(t)$ と時刻 $t+1$ の対応点の3次元座標 $D_n(t+1)$ から、次式を最小にする T を最小二乗法により求める。

$$\sum_{n=1}^k (TD_n(t+1) - D_n(t))^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

ここで、 k は対応点数である。

3.2 剛体で動きが複数の場合

1つの物体が複数の動きをする場合、物体を同一の動きをするものごとにとりまとめ、それぞれの部分ごとに位置合わせをする必要がある。パーツの

分離はセグメントの移動パラメタより判断する。

各シーンよりパーツを特定する場合にもセグメント対が構成する頂点を使用する。ある頂点から仮の変換行列 T_i を求め、同じ変換を他のセグメントに施してその対応を求める。対応が得られたセグメント群を1つのグループとする。誤差が大きく対応が得られなかったセグメントで再度移動パラメタを求める。上記処理を繰り返すことで、物体を分離し、パーツごとの移動パラメタを得ることができる。

3.3 非剛体の場合

非剛体の場合は、対応する点(セグメント)を正確に求めることはできない。剛体の場合には、逐次的に生成された幾何モデルのデータを使用することができたが、非剛体の場合、フレームごとに形状が異なるため、不変な対応点が存在しない。そこで、常に新しいデータのみを使用して近似的に対応を求める必要がある。

また、対象物体が非剛体の場合、見かけの輪郭線かどうかを判別することは困難である。そこで、エッジを分類せず、物体の形状と動きが常に変化する剛体と考え、処理を行う。

4 逐次的統合とエッジの分類

各セグメントで最適な移動パラメタを推定した後、重複部分を除去し、セグメントを fixed edge と apparent edge に分類する。

4.1 重複部分の除去

重複部分は3次元座標空間中のセグメント S を単位として、セグメント S を構成する3次元データ D を用いた3D-3Dマッチングにより探索する。具体的手順を以下に示す。

- I. 重複部分を特定するため最適な移動パラメタ T を用いて、ある時刻 t で得られた3次元データ $D_n(t)$ と時刻 $t+1$ で得られた3次元データ $D_n(t+1)$ を位置合わせする。

$$D_n(t+1) = TD_n(t) \quad (3)$$

- II. 位置合わせ後、重複部分は時刻 t のセグメント $S_p(t)$ と時刻 $t+1$ のセグメント $S_q(t+1)$ を比較することで、容易に判別することができる。重複部分の除去は図4のように、 $S(t)$ の n 個の

参照点 $P_i(t) (i=1, \dots, n)$ と $S(t+1)$ への垂線の足 F_i の距離が、

$$\sum_{i=1}^n |P_i(t) - F_i| < \alpha \quad (4)$$

を満たすセグメント S について処理する。ここで α は重複除去のための閾値である。

- III. 上記処理を時刻 t における全セグメントについて行い、重複部分を除去する。
- IV. 全セグメントの探索後、重複していない $S_q(t+1)$ を新規セグメントとして物体モデルに追加する。

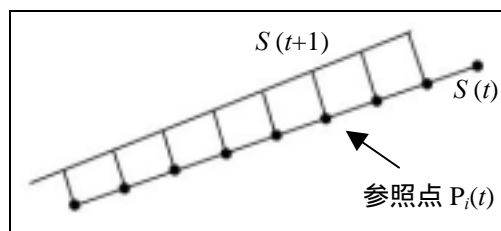


図4 重複部分の探索

4.2 エッジの分類

物体モデルに追加された新規セグメントは、単に追加するだけでなく、種類を分類する必要がある。各シーンから得られるセグメントは図5に示すように3種類存在する。まず最初に分類可能なものが fixed edge で、4.1節の重複部分を探索することによって特定できる。occluded edge は、ある時刻でのシーンから観測可能となり、その後は fixed edge と同様になる。apparent edge は、1つのシーンからは特定できず、フレーム間で繰り返し変化している部分を見つけることで分類することができる。そのほかには、観測時にノイズを多く含んで得られるセグメントがあるが、これらは物体モデルの生成時には取り除く必要がある。

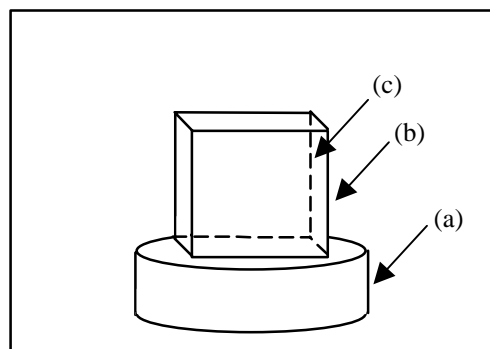


図5 エッジの分類 (a: apparent edge b: fixed edge c: occluded edge)

4.3 曲面の生成

apparent edge は、曲面上の観測方向に垂直な部分の点の集合である。図 6 に示すように、apparent edge を連続して観測することで、曲面を生成することが可能となる。ただし本論文では、隣り合う apparent edge 同士を回転方向に直線で結ぶだけの簡易的な表現のみに留めている。

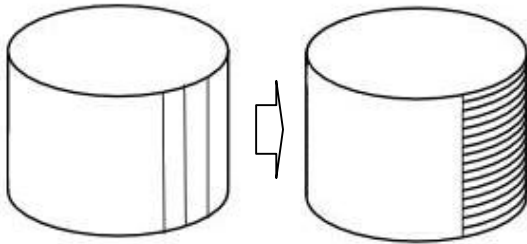


図 6 曲面の生成

5 実験と結果

回転テーブルを用い、移動パラメタが既知の環境を作ると共に、移動パラメタが未知の場合についての検証にも使用する。実験は、剛体で移動パラメタが既知の場合と未知の場合、2つ以上の動きをする場合、非剛体の場合の4種類で行った。実験環境は以下の通りである。

WS: : Sun Ultra2 Model 2400

画像入力ボード: Data Cell Model S2200

ステレオカメラ: Sony XC-7500 ×3台

また、apparent edgeの判定は60度ごとに行った。

5.1 移動パラメタが既知の場合

図 7 に示した fixed edge と apparent edge が混在する物体を用いて幾何モデルを生成した結果を図 8~10 に示す。この例では、回転テーブル上を10度ごとに180度回転させたものである。図中の細線は fixed edge を示し、太線は apparent edge を示す。図 8~10 に示すように、物体が回転することでそれまで見えなかった境界部分の情報を、fixed edge と apparent edge に分類し、それらを追加して幾何モデルが生成されていることが分かる。

5.2 移動パラメタが未知の場合

図 7 に示した物体を回転テーブルのパラメタ

を使わずにモデル生成させた結果を図 11 に示す。この例では、回転テーブルを5度ごとに、90度回転させたものである。物体が移動するごとに移動パラメタをその都度求め、逐次的に幾何モデルを生成することができた。回転角の最大誤差は5.0%で、良好な位置合わせ結果が得られた。また移動パラメタが既知の場合と同様に、エッジを分類して幾何モデルを生成させていることが分かる。

5.3 複数の動きをする場合

複数の動きをする物体として、図 12 に示すような動きが2つ存在するハサミを用いる。ハサミが徐々に開いていく様子を元に、動きを分離して、グループごとにモデルを生成した結果を図 13 に示す。図 13(a)に示すように、丸で囲った部分は誤ってグループ1に分けられた部分であるが、逐次的に動きを分離することでグループ1から分離し、グループ2に組み込み、モデルデータが追加されていることが分かる。

5.4 非剛体の場合

非剛体の対象として、図 14 の腕の動きを用いる。腕を曲げることによって、動きのグループが変化する様子を図 15 に示す。

図中の太線はグループ1を、細線はグループ2を、点線はグループ3を示す。図 15 に示すようにフレーム1・フレーム2では、グループが2つに分かれていたが、フレーム3では、グループ1の間接部分の動きを分離してグループ化している。動きが連続して変化しているためグループ分けは困難であるが、腕を曲げたときに間接部分の動きを分離し、3つのグループに分けることができた。



図 7 fixed edge と apparent edge の混在物体

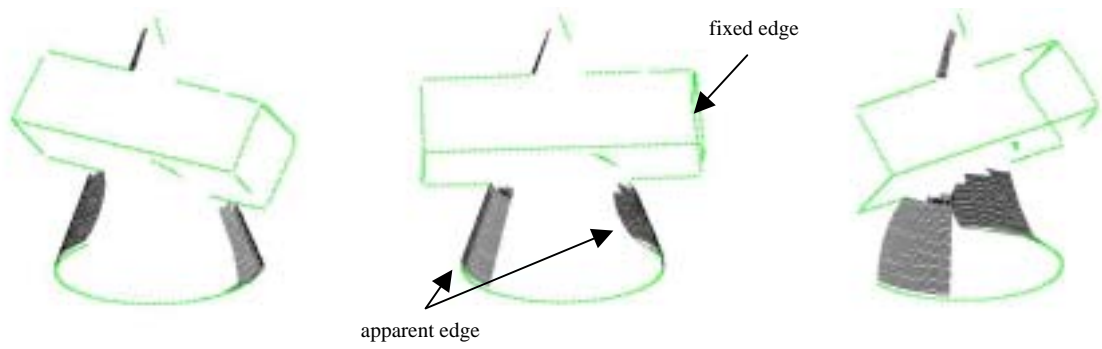


図 8 60度での統合結果(3方向)

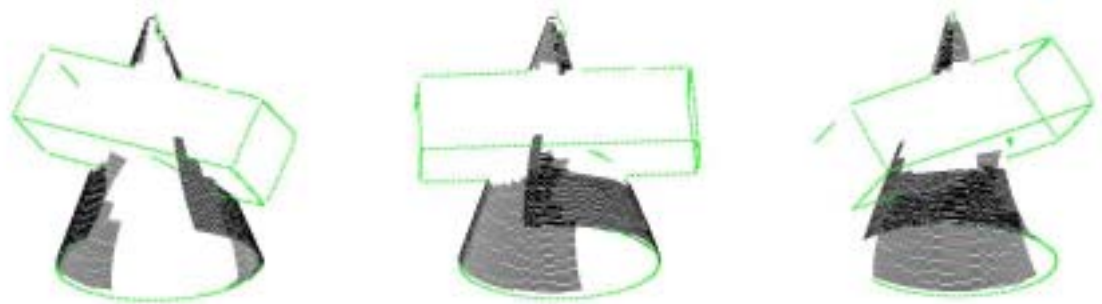


図 9 120度での統合結果(3方向)

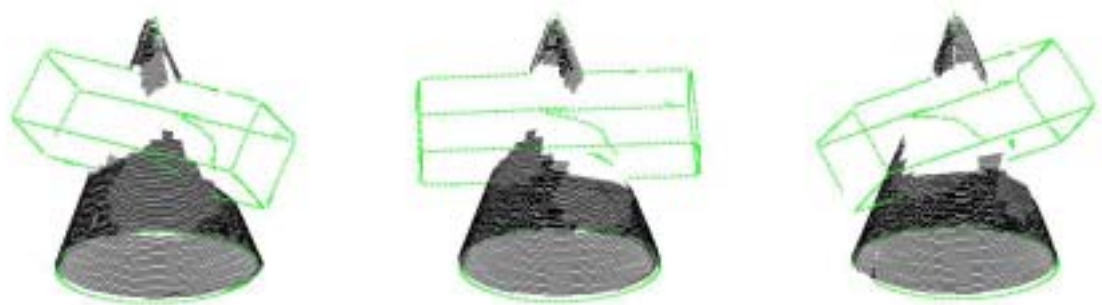


図 10 180度での統合結果(3方向)

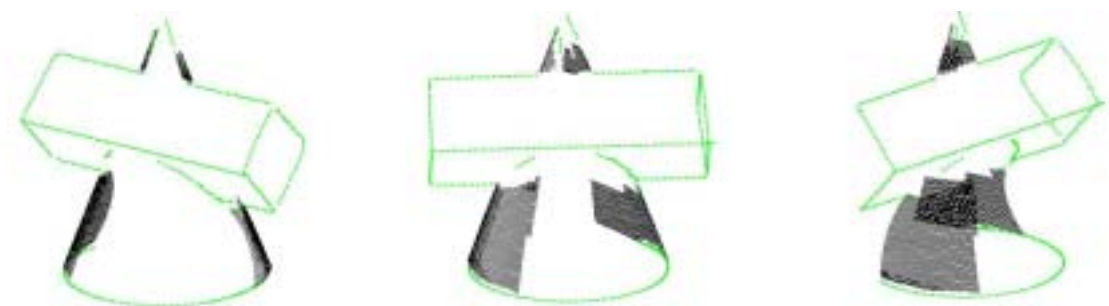


図 11 移動パラメタが未知の場合(3方向)

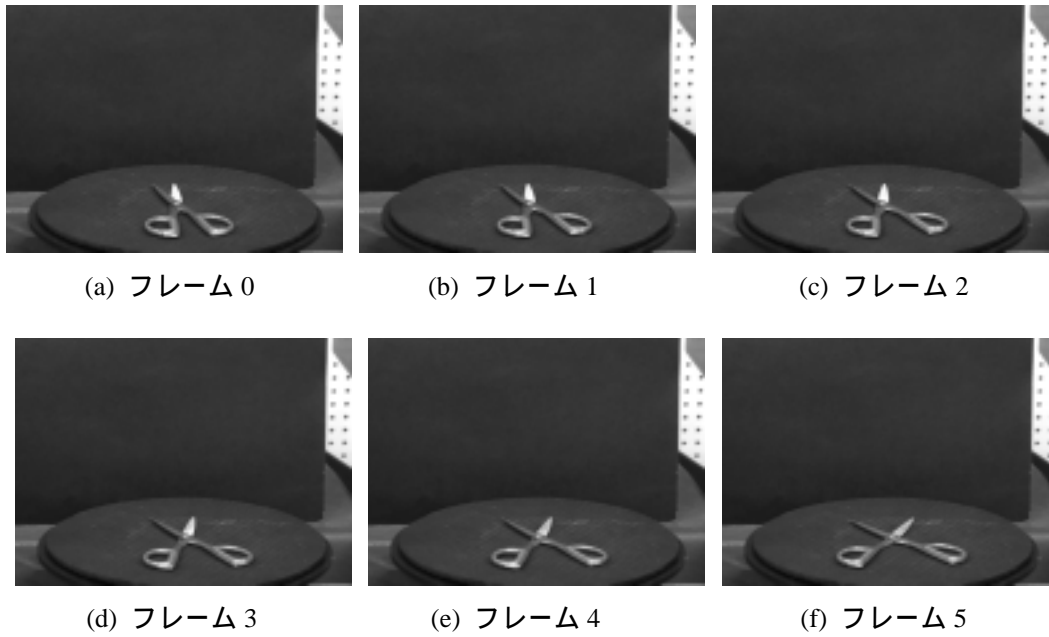


図 12 時系列の原画像 (ハサミ)

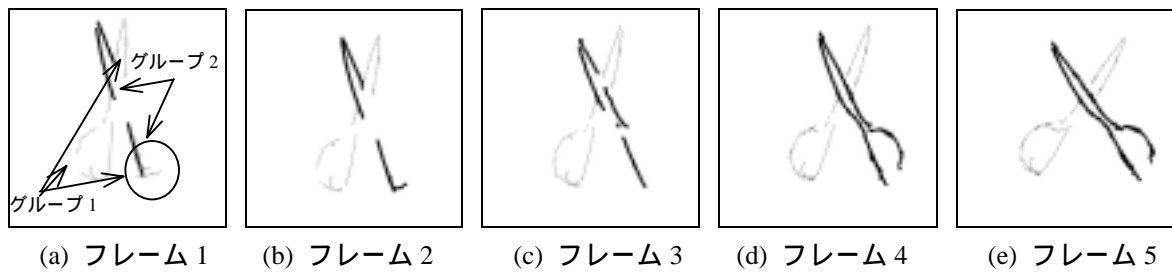


図 13 動きが複数の場合

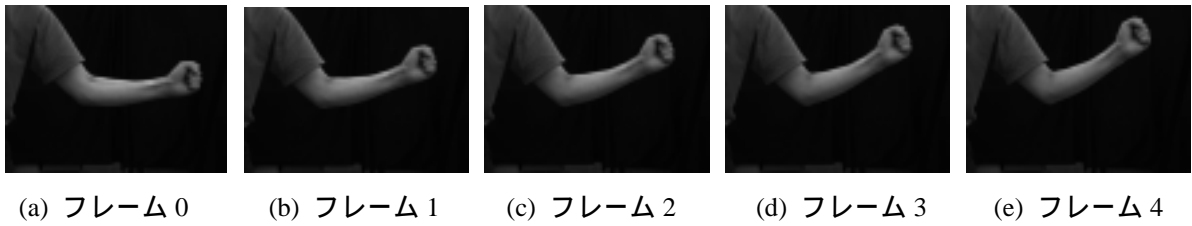


図 14 時系列原画像 (腕)

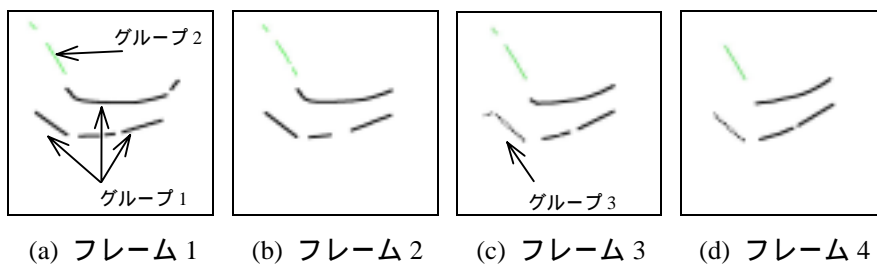


図 15 非剛体の場合

6 おわりに

セグメントベースステレオビジョンを用いて、逐次的に幾何モデルを生成する手法について述べた。本手法では、様々な対象に対して最適な位置合わせを行い、時系列ステレオ画像から物体の境界線を fixed edge と apparent edge に分類して、幾何モデルを生成した。実験の結果、いずれの対象についても逐次的に位置合わせを行い、データを統合することで、幾何モデルを生成することができた。また非剛体の物体に関しては、対応点を追跡しながら運動を分離することができた。

今後の課題として、今回は運動を分離するだけに留めた非剛体の幾何モデル生成が挙げられる。また今回の実験では、あらかじめ剛体と非剛体を区別して処理していたので、運動の分離、境界線の分類から剛体と非剛体も区別できるようにする必要がある。

また本論文では、境界線データのみを使用してモデル生成を行っており、面データは使用していない。これらの特徴も組み合わせることで、より精度を高くモデル生成することができると考えられる。

謝辞 本研究を遂行するにあたり日頃ご討論頂いた産総研知能システム研究部門 3次元視覚システム研究グループの各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] R.Bergevin, M.Soucy, H.Gagnon and D.Laurendeau: "Towards a General Multi-View Registration Technique", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.18, No.5, pp.540-547, 1996.
- [2] G.Blais and M.D.Levine: "Registering Multiview Range Data to Create 3D Computer Objects", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, No.8, pp.820- 824, 1995.
- [3] 樋口和則, M.Hebert, 池内克史: "複数レンジデータからの3次元物体モデル構築", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J79-D-II, No.8, pp.1354-1361, 1996.
- [4] 日浦慎作, 山口証, 佐藤宏介, 井口征士: "動距離画像の計測と生成による任意形状物体の実時間追跡", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.J80-D-II, No.6, pp.1539-1546,1997.
- [5] 角保志, 河井良浩, 石山豊, 富田文明: "ステレオビジョンを用いた複数3次元データの統合と物体モデルの生成", 情報処理学会第57回全国大会, Vol.2, pp.103-104, 1998.
- [6] 保田和隆, 右田剛史, 青山正人, 椋木雅之, 浅田尚紀: "疎な全周囲画像列からの密な3次元形状モデルの生成", 情報処理学会研究報告, 2003-CVIM-138-11, pp.73-80, 2003.
- [7] R.Vaillant and O.D.Faugeras: "Using Extremal Boundaries for 3-D Object Modeling", IEEE Transactions Pattern on Analysis and Machine Intelligence, Vol.14, No.2, pp.157-173, 1992.
- [8] Z.Zhang and O.D.Faugeras: "Three-Dimensional Motion Computation and Object Segmentation in a Long Sequence of Stereo Frames", International Journal of Computer Vision, Vol.7 No.3, pp.211-241, 1992.
- [9] 河井良浩, 石山豊, 植芝俊夫, 角保志, 高橋裕信, 富田文明: "ステレオカメラシステムパタパタ", 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集(MIRU'94), No.II, pp.127-134, 1994.
- [10] 石山豊, 角保志, 河井良浩, 植芝俊夫, 富田文明: "セグメントベースステレオにおける対応候補探索", 映像情報メディア学会誌, Vol.52, No.5, pp.723-728, 1998.
- [11] 河井良浩, 植芝俊夫, 石山豊, 角保志, 富田文明: "セグメントベースステレオにおける連続性に対応評価", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU96-135, 1997.
- [12] 植芝俊夫, 河井良浩, 石山豊, 角保志, 富田文明: "セグメントベースステレオにおける対応パスの探索", 電子情報通信学会技術研究報告, PRMU-96-137, 1997.
- [13] 角保志, 富田文明: "ステレオビジョンによる3次元物体の認識", 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol.80-D-II, No.5, pp.1105-1112, 1997.