ＲＰのための３次元形状再構成

平湯　秀和*　　桜木　博次*

Three-dimensional Shape Reconstruction for Rapid Prototyping

Hidekazu Hirayu* and Hirotsugu Sakuragi*

あらまし　本研究の目的は，３次元計測器から得られた高精度かつ高速に取得可能な形状データから３次元形状を再構成し，CAD データとの統合により，光造形などの形状作成の迅速化（ラピッド化）を図るための手法を確立することである．そこで，今年度は，複数方向から測定したレンジデータを統合してそのモデルを生成するため以下の手法を提案する．各方向から測定したレンジデータをジャンプエッジを利用してセグメンテーションした後，複数方向からのセグメントを重なりのないセグメントグループに統合する．各々のセグメントグループで三角パッチを生成し，グループ間に補間用パッチを生成することで，全体として隙間のない３次元形状の再構成を行う．本手法を用いて，複数方向から取得した実際の直方体モデルのレンジデータから，３次元形状の再構成を行った結果，その有効性を確認した．　また，３次元計測器による計測からモデルの再構成・光造形によるラピッドプロトタイピングという１連の流れを実際に行い，光造形モデルを作成するまでに存在する問題の洗い出しを行った．その際，光造形という手法による精度・形状の制限を認識することができた．

キーワード　ラピッドプロトタイピング，CAD，形状再構成，レンジデータ

１．　まえがき

３次元計測器から得られるレンジデータは離散的な３次元座標を持つデータ点列であるため[1]，形状データの加工，及び CAD 形状データとの統合は困難となっている．そこで，本研究では３次元計測器から得られたレンジデータをもとに物体の３次元形状を再構成し，CAD データとの統合により，形状作成の迅速化（ラピッド化）を図る．形状データの再構成を行う場合，３次元測定器で１つの方向から測定しただけでは，センサーから隠れた部分が測定できない．そのため，物体を複数方向から計測を行い，多方向から得られたレンジデータ間の関係を考慮しながら統合する必要がある．多方向からのレンジデータ統合に関しては，多くの研究機関で研究されており[2]～[5]，主にレンジデータ間の関係やセグメンテーションを利用している．しかし，オクルージョンの表現など多くの問題があり，解決されていない．そこで，本研究の初年度である今年度は，ジャンプエッジを利用して複数方向から測定したレンジデータを統合する手法を提案する．また，その手法を用いて物体の再構成及び，光造形によるラピッドプロトタイピングを行ったので報告する．

*情報システム部
Information System Division

２．　複数方向のレンジデータ統合

本研究では精度良く物体の複数方向のレンジデータを取得するため，マツオ(株)製 SURVEYOR2000（測定精度 25μm）を使用した．また，多方向からのレンジデータの統合に関しては以下の手法を用いた．まず，各方向から取得したレンジデータからジャンプエッジをもとにセグメンテーションする．複数方向から測定する場合，重なって計測する部分が存在する．したがって，その部分が重なりとなって複数のセグメントで重なる部分が存在する．セグメント同士で重なる部分がある場合，重なる部分のレンジデータだけを一方のセグメントに移動させ，セグメント同士が重ならないようにする．そうすることで，複数方向からのセグメントはどれも重ならないようになる．これらのセグメントに関して三角パッチを生成する．するとセグメントとセグメントの間にはもともと境界があるから隙間が生じてしまう．そこで，セグメントとセグメント間を補間するように三角パッチを生成すれば，隙間のない３次元形状が再構成できる（図１）．

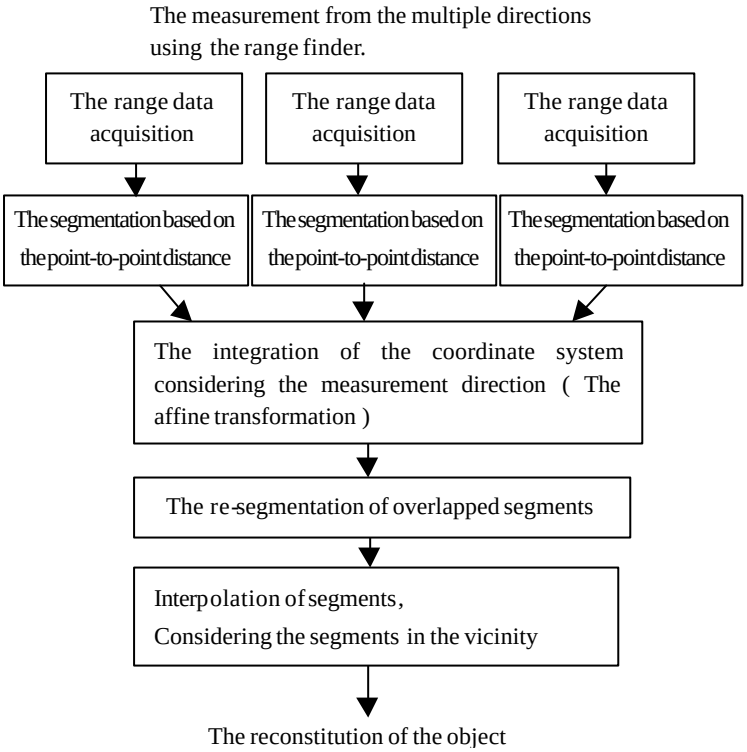


図１　レンジデータ統合の流れ

Fig.1 The flow of range data integration

２．１　点間距離に基づくセグメンテーション

３次元計測器 SURVEYOR は，Ｙ座標の値を一定に保ちながら，Ｘ軸に沿ってあるピッチ間隔 X_{pitch} でＺ軸の値を計測していく．１ラインの計測が終わると，あるピッチ間隔 Y_{pitch} だけ Y 座標を移動し，同様の計測を実施する．取得されたデータは，ラインごとに計測した順で羅列される．本研究では，このデータ構造を利用してセグメンテーションを行う．また，複数の方向から取得したレンジデータは，取得した方向ごとにレンジデータをセグメンテーションし，その後でセグメントの統合を実施する（図２）．

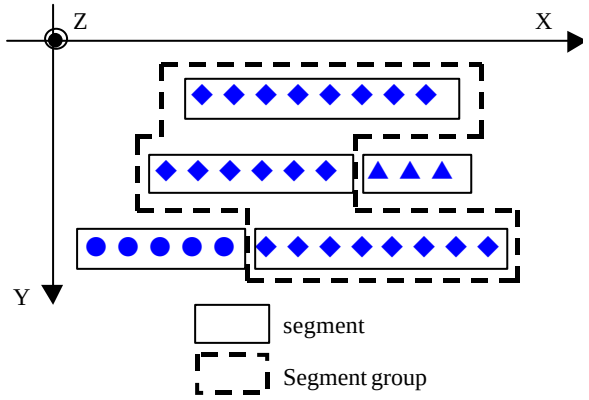


図２　セグメンテーション例

Fig.2 The example of segmentation

最初に１方向より計測したすべての範囲のレンジデータに対して，ラインごとに点列データのセグメンテーションを行う．次にライン間の関係を考慮してセグメントのグループ化を行う．詳細について下記に示す．

１つのライン上に存在する点列データのセグメンテーションは，隣接する２点の点間距離 L が固定値 θ_{thre} で規定される閾値 L_{thre} 以内かどうかの判定で行う．閾値以内であれば同一セグメントとみなし，閾値以上であれば，別のセグメントとする（図３）．ここで，角度θはXY 平面と隣接する２点を結んだ直線の成す角度とする．

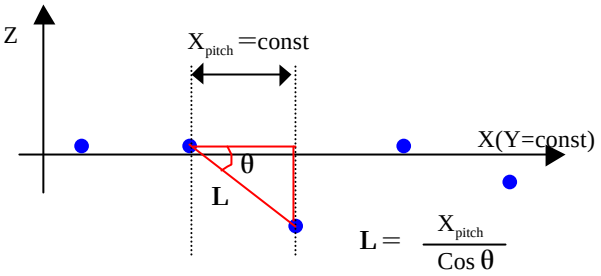
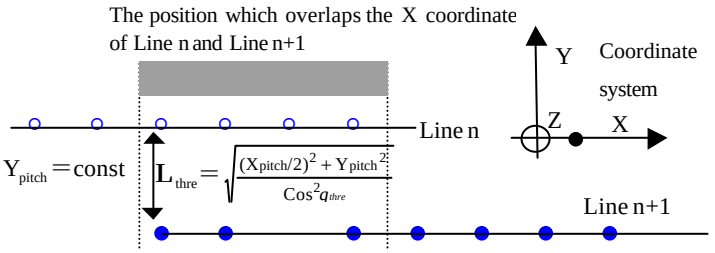


図３　ライン内データのセグメンテーション

Fig.3 The segmentation in a line

１つのライン上に存在するすべての点列データに対してセグメンテーションを行った後，各方向から取得したレンジデータごとのセグメントをグループ化する．Y 座標の値が小さいラインから，隣り合うラインでライン上に存在するセグメントの点列データの点間距離を比較し，セグメントのグループ化を行う．

まず，比較する２つのセグメントでレンジデータの X 座標の値が重なるレンジデータを抽出する．抽出したレンジデータをセグメント間で比較し，ラインを挟んだ点間距離の最短距離を導出する．Y 座標の値が大きい方の抽出データについて，導出したすべての最短距離が閾値以下であれば同一グループとみなす（図４）．



In search of the shortest distance between 3 black rounds in Line n+1 and 4 white rounds in Line n, it is compared with the Threshold

図４　ライン間のセグメンテーション

Fig.4 The segmentation between two lines

点列データは X 軸，Y 軸に対して一定のピッチ間隔で取得される．そのため，隣接する２点間の距離はこの２つのピッチ X_{pitch}・Y_{pitch} と角度θに依存する．したがって，同一ライン内で隣接するデータに対する２点間距離の閾値は，Y 座標の値が一定であるため X 軸方向の計測ピッチ X_{pitch} と角度θのみに依存することになる．

一方隣接する２つのライン内のデータに対する最近傍

２点間距離の閾値は，計測理論上Ｘ座標の値が等しくなるためＹ軸方向の計測ピッチ Y_{pitch} と角度θのみに依存する．しかし，実際の計測においては特異的にＸ軸方向の計測ピッチが X_{pitch} と異なってしまう場合があるため X_{pitch} を考慮する必要がある（最近傍２点のＸ座標の値が必ずしも一致しない）．最近傍２点のＸ座標値の差は最大で $X_{pitch}/2$ となる（Ｚ座標値の変化量によってはそれ以上になる場合もある）ことから，この値を利用して閾値を決定している．

２．２　空間的に重なりのあるセグメントグループについて

前項の処理は１方向から取得したレンジデータを単独でセグメンテーションしたものであり，３次元空間でセグメントグループの重なりは存在しない．しかし，複数の方向からレンジデータを取得した場合，それだけでは異なる方向から取得したデータ間でセグメントグループの重なりが生じてしまう．本項では重なりのあるセグメントグループが，すべてのレンジデータに対して重なりが生じないよう再セグメンテーションを行う．以下に手順を示す．

異なるｓ個の方向からレンジデータを取得した場合

(1) 取得したレンジデータを計測した方向ごとに分け，それぞれのグループに 0 から(ｓ－１)の番号をふる．

(2) ｔ番のレンジデータを基準のレンジデータとする．（番号の小さいグループから実施する）

(3) ｔ番のレンジデータの，あるセグメントグループＡとｔ＋１番以降のすべてのレンジデータを比較（レンジデータをアフィン変換してｔ番の計測方向と同じ角度に合わせて比較），それぞれのレンジデータとＡのレンジデータとの最短距離ｄを導出する．ｄが閾値以内であればＡと重なっていると見なす．

(4) 重なっている場合

- ｔ番のレンジデータの各ラインのＹ座標の値を基準にして（ポリゴン描画時にライン情報が必要なため）重なっているレンジデータをｔ番のセグメントグループに統合する（図５）．
- 所属していたｔ＋１番のセグメントグループからこのデータを削除する．

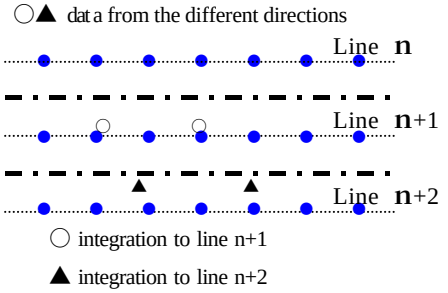


図５　データ統合方法

Fig.5 The range data integration

(5) (3)(4)の処理を繰り返す．１方向にある点列データが終了すればｔをインクリメントし，比較対象がなくなるまで行う．

上記の処理により，重なっていたセグメントグループ内のレンジデータはどれか１つのセグメントグループに統合され，セグメントグループ同士の重なりがなくなる．

２．３　セグメント間の補間について

セグメンテーションを行った後，セグメントグループ間を補間するメッシュを生成する．メッシュによる補間は２つの方法で行う．１つめは，もともと空間的に重なるレンジデータを有していたセグメントグループ（２．２項の処理により重なりはなくなっている）同士の間を補間する方法である（図６①）．２つめは，すべてのセグメントグループに関して，その外形となる点群をそれぞれ抽出した後，他の外形をなす点群同士の距離比較を行う方法である．あるレンジデータとの距離が閾値以内であれば，そのレンジデータを有するセグメントグループを近傍にあるセグメントグループとみなし，セグメントグループ間を補間する（図６②）．ここで，閾値は一定の値ではなく，段階的に設けることとする．最初に一番小さい閾値で判定し，そこで，一番近傍のセグメントグループ間を補間する．そして，その次に更に大きい閾値で判定し，その閾値内で先に補間したものは除いた近傍点に関して補間を行う．このように閾値を段階的に増加して補間処理を繰り返すことで，すべてのセグメントグループ間の補間をする．

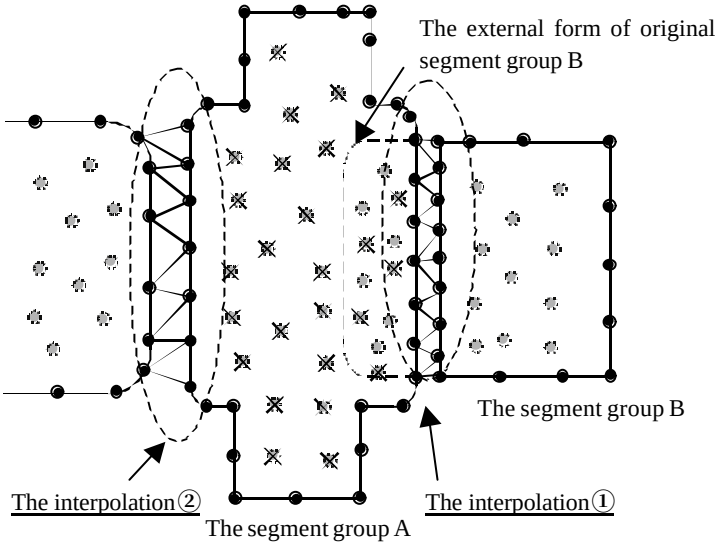


図６　セグメント間の補間

Fig.6 The interpolation between the segments

セグメントグループ間を補間する場合，各セグメントグループの外形をなす点群から閾値内にある点群を抽出し（図６の点線部内），それらからメッシュを生成する．外形は平行をなす直線ばかりではなく曲線もある．また，該当する線上にある点列データ群は等間隔に並んでおらず，点の数も等量ではない．２本の線間に三角ポリゴン

を描画していく場合，順に点を選んでいくと，一方の線上の点をすべて選んでしまったのに，もう一方の点が残ってしまう．また，線上に三角ポリゴンが生成されてしまうこともある．そこで郷らの提案している三角ポリゴン生成法[6]～[8]を使用することにした．この手法はなるべく均一な三角ポリゴンをすべての点を利用して作ることができる．しかしながら，２本の線間が急に変化する箇所では生成される三角ポリゴンに重なりが生じる場合がある．そこで，まず２本の線間が狭くなるところ（極小）を検出し，狭くなる手前までをこの手法で三角ポリゴンを生成する．同様に次に狭くなるところを検出し，先ほど生成したところから狭くなるところまでを順次同じ手法でポリゴン生成する手法を用いた．以下にその手順を示す（図７）．

１）２本の線上の点群において，もっとも近い相手側の点を抽出しておく．

２）LineA上にある点A0 から LineB上の点でもっとも近い点を見つける．下記の例では点Ba である．しかし，点Ba からはAa がもっとも近いので互いに最も近い点同士ではない．同様に逐次検索をしていくと，点Ai と点Bj が互いに最も近い点同士であることがわかる．このように互いに最も近い点同士（Ai，Bj）が存在すれば，最初の点（A0，B0）から（Ai，Bj）まで三角ポリゴンの描画を行う．

３）スタート位置を（Ai，Bj）に更新し，２）と同様にして互いに最も近い点同士（As，Bt）を検索する．存在すれば，（Ai，Bj）から（As，Bt）まで三角ポリゴンの描画を行う．

４）（As，Bt）以降で最後まで互いに最も近い点同士がなければ（As，Bt）から（Alast，Blast）まで三角ポリゴンの描画を行う．ここで，Alast，Blast は各ライン最後のデータとする．

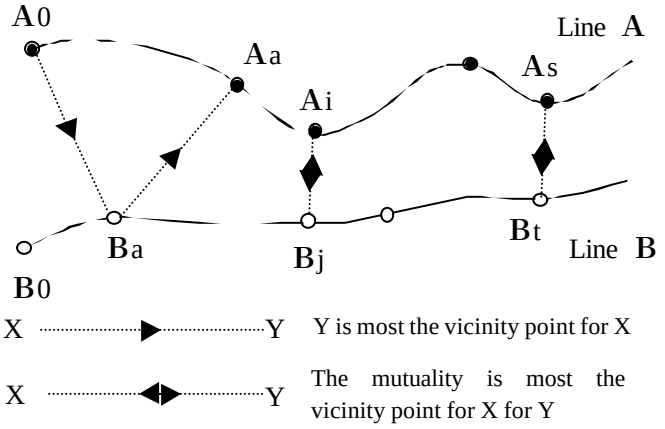


図７　三角ポリゴンの生成手順

Fig.7 The generation procedure of the triangular polygon

２．４　出力結果

上記の手法を検証するため，３次元計測器SURVEYOR にて，マウスを０度，ケミカルウッド木型で作られた立方体を－３０度，３０度の角度で傾けて計測し，本システムにて３次元形状の再構成を行った．結果を以下に示す．

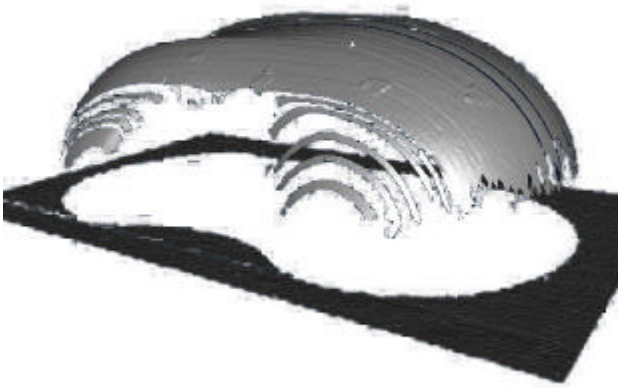


図８　セグメントをグループ化した例

Fig.8 The example of grouping

図８では，１方向からとったマウスのレンジデータをセグメンテーションし，それらをグループ化した例を示す．周辺にも多くのグループがあるのがわかる．図８をもとに手前のセグメントのみの補間を行った例を図９に示す．セグメントグループ間がうまく補間されているのが確認できる．

図９　セグメント間を補間した例

Fig.9 The example of the interpolation between the segments

図１０　ケミカルウッド木型で生成された立方体

Fig.10 The cube made with chemical woods

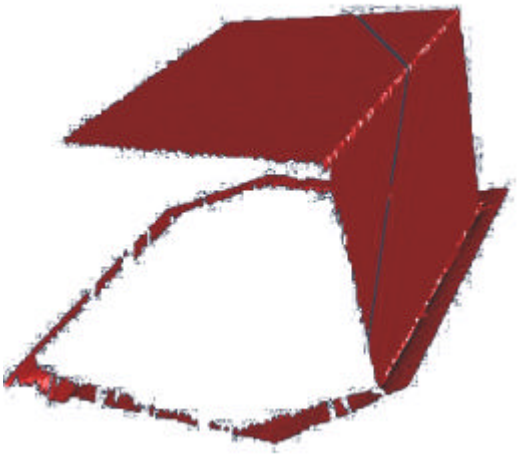


図１１　－３０度からの３次元形状の再構成

Fig.11 Three-dimensional shape reconstruction from -30 angle range data

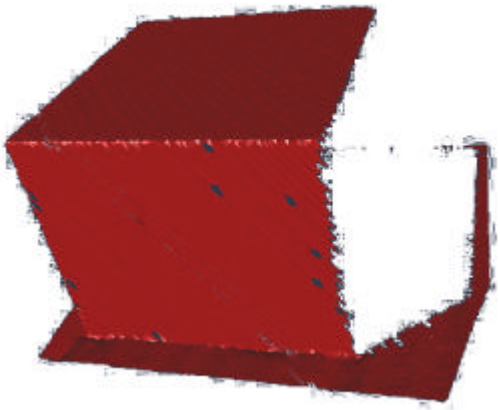


図１２　３０度からの３次元形状の再構成

Fig.12 Three-dimensional shape reconstruction from 30 angle range data

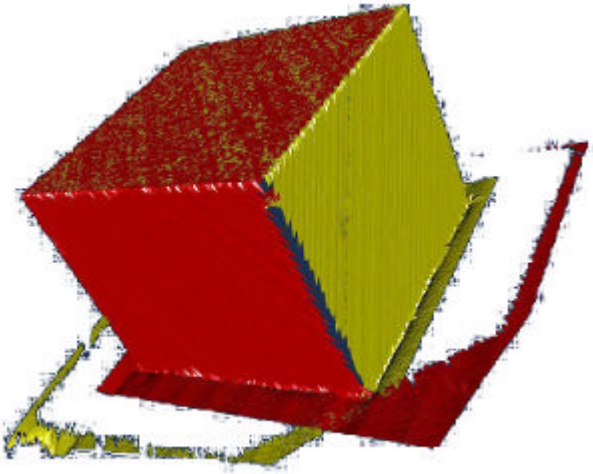


図１３　複数方向からのモデル再構成結果

Fig.13 Three-dimensional shape reconstruction from plural angles range data

図１１，１２に，－３０度，３０度から立方体を計測し再構成した結果を示す．また，これらを統合した結果を図１３に示す．複数方向から取得したレンジデータの統合により立方体の全周モデルが再構成できることを目視にて確認した．

上記の結果より，我々の提案する手法の有効性を確認できる．今後，精度についても検討していく予定である．

３．　３次元データをもとにした光造形

３．１　システム

再構成された３次元形状データは，光造形装置 3D Systems inc. 製 SLA－5000 により形状作成が可能である．

本システムは 0.36mm のレーザビーム径を使用し，スライス間隔は 0.15mm，500mm×500mm×500mm までの対象を計測することができる．光硬化性エポキシ樹脂(チバツール SL5510）を使用し，入力形状データには STL バイナリフォーマットを使用する．

３．２　光造形法

光造形法とは，紫外線を照射することによって硬化する特性を持つ樹脂（紫外線硬化樹脂)を用い構造物を作る方法である[9]．以下に造形プロセスを示す．

(1) 造形したいモデルの３次元形状データを作成する．
(2) 上記形状データを一定の間隔で水平に切り取ったスライスデータを作成する．
(3) 得られたデータを基に紫外線を樹脂に照射して，ベースプレート上の樹脂を硬化させていく．
(4) １つの層を硬化し終わったらベースプレートを１段下げて次の層を硬化させていき，順番に１層１層積み重ねていく．

(5) 全部の層を硬化させたら樹脂の中から完成した構造物を取り出し洗浄する．

３．３　試作

３次元測定器で取得したデータを基に再構成された形状データで実際に光造形を行い，本システム利用に対する問題点を検討した．

形状データの取得には光切断法を採用しているミノルタ(株)製非接触型３次元形状測定器 VIVID700 を使用した．付属のソフトウェアによりターンテーブルや特徴点を利用した多視点画像の統合が容易に可能な上，データ点数削減など多彩な機能を有している．造形対象には，デザイン性と機能性が要求されるマウスを選択した．造形結果を図１４に示す．

図１４　本物（左）と光造形モデル（右）

Fig.14 The real mouse(left)
and Rapid Prototyping model (right)

“再構成された３次元データに基づくモデル”ということによる本システム使用の制限は全く見つからなかった．マウス以外の再構成データについても検討したが不具合は見られなかった．以下に本システム使用に際する留意事項を挙げる．

- 積層型による精度の制限
  １枚づつ積み重ねて造形していくため，Z 軸方向の精度は積層ピッチ 0.15mm を上回ることは不可能である．また，サンドペーパなどにより積層段差を取り除き平滑化する必要があるため，完成品の精度は 0.15mm より悪くなる．精度は平滑化のやり方に大きく依存するため，注意が必要である．
- 積層型による形状の制限
  積層型であるということは，造形したい場所には必ず土台となるものがないと造形できない．オーバーハング形状など造形可能な形状に制限がある．
- 使用材料による制限
  材料に樹脂を使用しているため，ある程度以上の厚さがないと強度を確保できない．平滑化も非常に難しくなる．
- 平面再現性
  積層型であるため，XY 平面と水平でない限り平面は階段形状で造形されてしまう．サンドペーパなど手作業での平滑化により平面を再現するのは非常に難しい．可能な限り平らな面を XY 平面と平行にあわせることが必要である．

４．　まとめ

３次元計測器から得られた複数の方向からの高精度なレンジデータを統合し，モデルを再構成する手法の提案を行った．また，モデルを再構成し，このデータをもとに光造形によるラピッドプロトタイピングを行った．この結果，光造形特有の形状再構成に伴う制限や問題が抽出された．

今年度はパッチモデルを用いた形状再構成を行ったが，来年度以降は階層化モデルによる自由曲面形状の再構成や CAD データとの統合を行っていく予定である．

文　献

[1] 佐藤宏介，横矢直和：“測定手法の種類と基本原理”，計測と制御，34 巻 6 号，pp.435-439 ,1995

[2] 品川嘉久：“３次元形状データ圧縮手法の最近の動向”，情報処理，40 巻 3 号，pp.280-285

[3] 古川貴雄，清水義雄，佐々木和也：“距離画像の木構造表現を用いた形状記述データ生成”，信学論，Vol.J81-D-II，No.9，pp.2130-2138,1998

[4] 安村禎明，折本勝則，馬場口登，北橋忠宏：“部品構成モデルの自動生成による３次元物体の部品分割”，信学論，Vol.39，No.6，pp.1944-1952,1998

[5] 査紅彬，牧元喜宣，長谷川勉：“三次元物体の全周モデルを獲得するためのデータ重複部再構成”,画像の認識・理解シンポジウム(MIRU’98)，Vol.1，pp.195-200 ,1998

[6] 郷泰彦，丹羽義典：“ＣＡＤデータを応用した３次元形状検査システムの開発（第３報）”,岐工技研究報告, 1995

[7] 大野尚則，丹羽義典：“仮想空間を用いた距離画像からの形状抽出”電学論 D，Vol.119-1，pp.75-80,1999

[8] 落合重紀：“新・ＤＸＦリファレンスガイド”，日経ＢＰ社,1997

[9] 中川威雄・丸谷洋二：“積層造形システム　三次元コピー技術の新展開”，（株）工業調査会，1996