

義肢製作支援システムの開発

— CAD/CAMを用いた義肢製作支援システムの開発 —

阿部 正人・清水 誠司・平川 寛之・河野 裕

Development of Production Support System for Artificial Limb

— A CAD/CAM System for Artificial Limb —

Masahito ABE, Seiji SHIMIZU, Hiroyuki HIRAKAWA and Hiroshi KONO

要 約

事故や疾病などにより切断された人体部位を補う補装具の設計・製造のCAD/CAMシステムを構築するため、外部計測機器や2次元画像からのデータ入力方法及び身体モデルの再構築法についての検討を行った。その結果、連続的に撮影されたCT (Computer Tomography) 画像から、自動的に3次元身体モデルを再構築することが可能となった。

1. 緒 言

近年、高齢者の増加に伴って、高齢者が生活をするうえで障害となる問題が数多く生じてきている。その中の1つが、ある種の疾患や事故によって指や腕、足など体の一部を失い、補装具を使用しなければならない場合である。また、心臓病や糖尿病などのいわゆる循環器に起因する疾病により下肢等の切断を余儀なくされている人々は年々増加の傾向にある。

補装具などで使用されている機械的な部品は、CAD/CAMシステムを用いて設計・製造をされているが、補装具のソケット製造に関しては依然としてマンパワーに頼らざるをえないのが現状である。しかしながら、ソケットの形状が体に合わず、義肢の使用時に苦痛を感じている人が多数いることも事実である。患者が本質的に快適に感じるかどうかは、義肢装具製作者の技能と経験に依存するということをそれは意味する。

一方、補装具のソケット設計と製造のプロセスをサポートするために2, 3のCAD/CAMシステムが開発されている^{1) 2)}が、短時間に十分にフィットする補装具を作成するためには解決しなければならない問題が多数存在し残念ながら実用化に至っていない。

それらの問題の一例が、計測装置から得られる測定データ値のスムージング化と人体幾何形状の再構築、そして3次元モデルの高速な製造方法である。

そこで、今年度から3年計画で、3次元CAD技術と紫外線硬化樹脂を使用したラピッドプロトタイプングシステムを用いて前述の問題点を解決しつつ、最適な下腿義肢ソケット作成が可能なCAD/CAMシステムの開発を進めることとした。

本報はこのシステムの設計思想と、画像データからの幾何形状モデルの再構築手法について述べる。

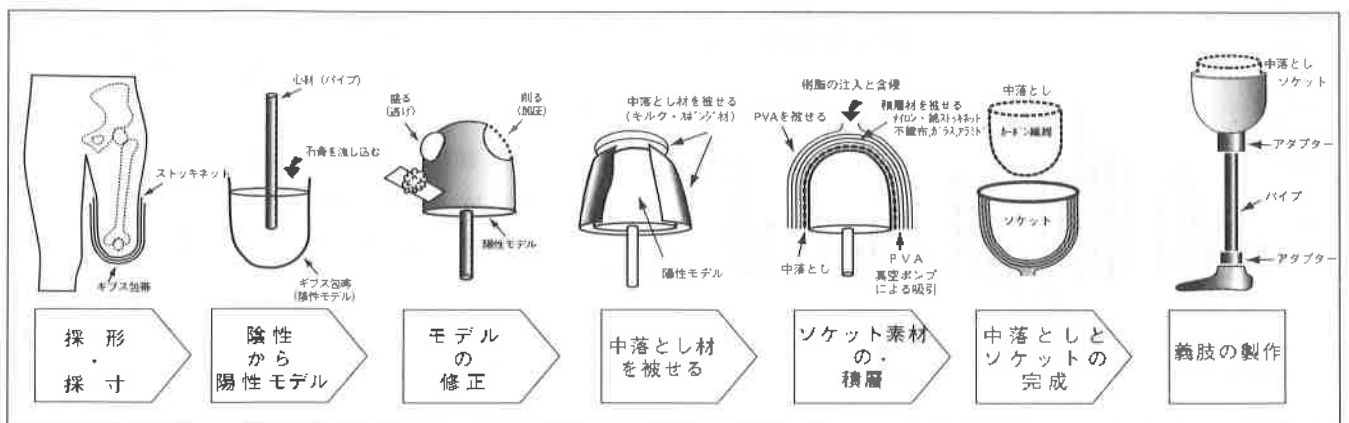


図1 義肢製作工程

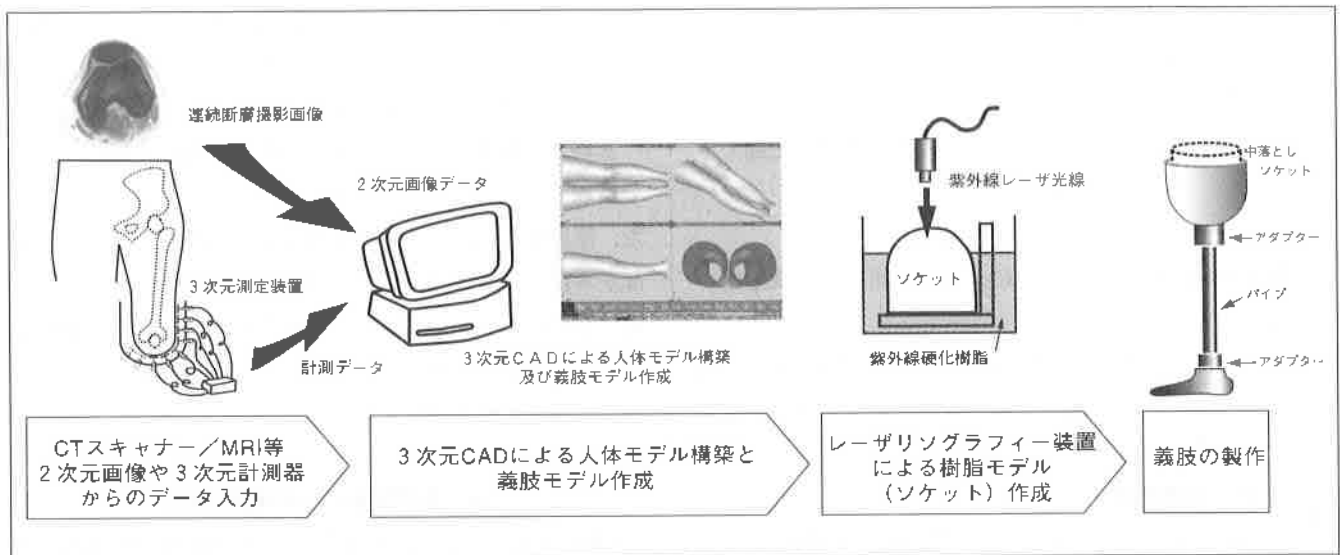


図2 システム概要図

2. システム概略設計

義肢装具上による下腿義足の一般的な製作は、図1に示される7工程により製作される。

- (1) ストックネットを切断部位に被せ、体重をサポートする箇所や、荷重を避ける箇所が陽性モデルに転写できるようマーキングを行う。その後ギプス包帯を巻き、切断箇所の採形、および陰性モデルの作成を行う。
- (2) ギプス包帯で作成した陰性モデルに石膏を流し込み陽性モデルを作成する。
- (3) 荷重をサポートする部位は削り、逃がす部分は石膏を盛り上げる等の修正を陽性モデルに対して行う。
- (4) クッション材となるソフトインサートを陽性モデルに被せる。ソフトインサートは、発泡ウレタン樹脂などを使用して、直接表皮がソケットと接触するのを防ぐ。
- (5) ナイロン、ガラスアラミド、PVA等のソケット素材を積層する。
- (6) 樹脂が硬化したところで、ソケットと中落とし(ソフトインサート)が完成する。
- (7) 脚部のパイプや足部を取り付けて、下腿義足とする。

本研究でのCAD/CAMシステムの開発コンセプトは、義肢の製作工程の(1)、(2)及び(3)の工程をコンピュータをベースにした設計システムに置き替え、(5)のソケットの製作工程をCAMを利用した加工装置によって代替しようとするものである。図2にシステムの概要を示す。

以下、下肢切断者の切断部位計測機能、計測データから3次元人体モデル構築及び義肢をデザインするCAD機能についての概略仕様について述べる。

2-1 計測機能

義肢を製作する場合、切断者は人種、身長、体重、体格などの相違の他に、疾病や事故の状況により切断部位、切

断方法、縫合方法が大きく異なるため、個別に対応しなくてはならない。立体物を計測し3次元データとしてコンピュータに取り込む方法は、レーザスキャニング装置などが実用化されているが、本研究は異なる人体の形状を正確に把握するために医療用CT画像を利用して人体形状データを取り込み、3次元モデルを構築する手法を検討した。最近の医療用CT/MRI機器は、DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) の入出力インターフェースを持っていることが標準となりつつある。DICOMインターフェースは、CT機器-コンピュータ、MRI機器-コンピュータなどの異なるベンダーや機種間で医療画像データの転送方法を規定したもので、DICOM3.0からネットワーク環境でもTCP/IPやOSIなどのプロトコルで使用可能となった。このDICOMインターフェースを使用し、CT等で撮影された連続断層画像を直接デジタル形式でコンピュータに取り込むこととした。CT画像を利用することは、以下の点においても身体形状をコンピュータに取り込む手



図3 義肢内形状計測装置

法として有用である。

- (1) 既存の設備を利用できる
- (2) 比較的容易に撮影することができる
- (3) 表皮だけではなく、骨形状などの内部構造も把握できる
- (4) 義肢を着用した状態で撮影が可能
- (5) 断層間隔を狭くすることによって、正確な形状把握が可能

また、CT画像からの入力インターフェースだけではなく、義肢ソケットの内形状測定装置（図3）からのデータ入力インターフェースも作成した。

2-2 CAD機能

形成外科や脳外科の分野で、3次元CG・CAD技術による手術支援システムの実用化が進められており、医学とは異なる分野であるCAD技術が、大きな影響を与えるようになってきた。本システムは、一般の3次元CADの機能の他に、義肢製作支援用CADとして義肢製作に必要な以下の特化機能をワークステーション及びパーソナルコンピュータ上で実現した。

- (1) マルチスライス2次元画像データからの3次元形状モデルの構築機能
- (2) マルチスライスデータと3次元サーフェースデータを扱うための内部データ構造
- (3) 義肢ソケットの内形状測定装置などの3次元座標データから形状モデルを構築する機能
- (4) 汎用性の高い3次元グラフィックスライブラリーを使用した高速な3次元描画機能

3. X線CT装置

X線CT装置の原理は、X線の透過線量を電氣的に増幅してその吸収差を2次元画像として表示する機構³⁾である。

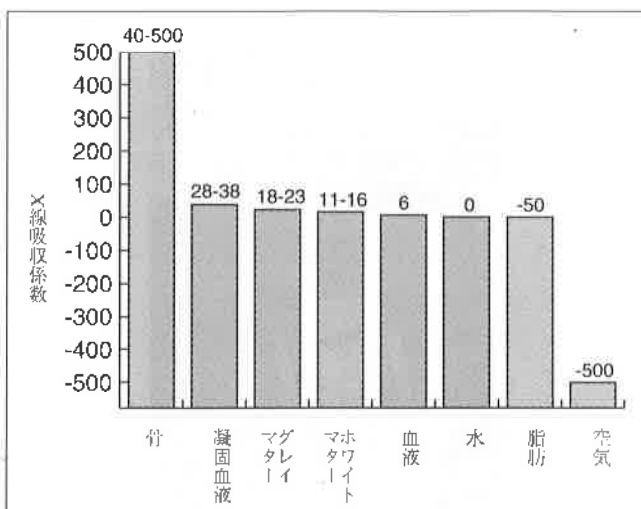


図4 X線呼吸率

そのため画像精度は、X線吸収係数の精度が大きく影響することとなる。X線の吸収率は生体組織それぞれ固有の値をもつ。生体組織とX線吸収率の関係を図4に示す。

本研究で使用した脚部のCT画像は、512×512ピクセルで構成され、2ビットのグレイスケールの解像度であった。原画像を図5に示す。再構築に使用したデータは、腰部から踵部分まで2mm間隔のマルチスライス（多断層）画像で表わされ、計485層から構成されている。この画像から、必要となる生体組織部分をウィンドウ変換によって強調し、図6に示す画像を得た。

4. CT画像からの輪郭抽出

CT画像データから、対象となる生体組織の輪郭情報を抽出するために、以下に述べる2値化画像を生成し、値が変化する部分をラスタースキャンして輪郭線とする手法を用いた。

- (1) 隣接するピクセルの輝度の垂直方向、水平方向の差分値を求める。ピクセルp(i, j)の輝度を $p_{i,j}$ とすると、水平方向の差分値を $h_{i,j}$ は、

$$h_{i,j} = p_{i,j} - p_{i,j+1}$$

で表わされ、垂直方向の差分値 $v_{i,j}$ は、

$$v_{i,j} = p_{i,j} - p_{i+1,j}$$

で表わされる。この時の差分画像を図7に示す。

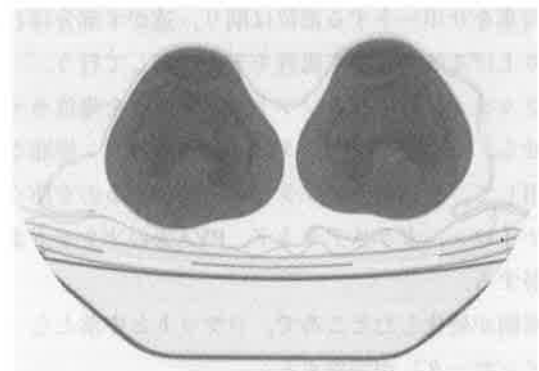


図5 CT原画像



図6 ウィンドウ変換後の画像



図7 差分画像

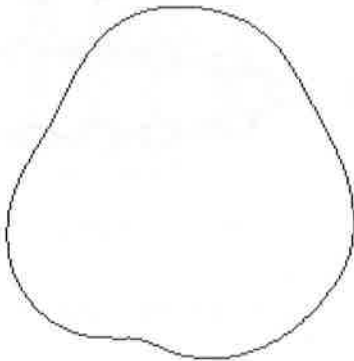


図8 輪郭点列

- (2) 次に2値化するための局所的なしきい値を求める。しきい値は、それぞれのピクセル $p(i, j)$ を中心とした局所的な 8×8 の領域について平均値 $av_{i,j}$, $ah_{i,j}$ を計算する。垂直方向、水平方向それぞれの差分についてのしきい値 $th_{i,j}$, $tv_{i,j}$ は、
 $th_{i,j} = ah_{i,j} \times 8$
 $tv_{i,j} = av_{i,j} \times 8$
 で求める。
- (3) ピクセル $p(i, j)$ が、エッジ上の点か否かの判断は、 $p(i, j)$ について、 $h_{i,j}$ が $th_{i,j}$ より大きい場合、または $v_{i,j}$ が $tv_{i,j}$ より大きい場合に $p(i, j)$ は、エッジ上の点 $e(i, j)$ とする。
- (4) ピクセル $e(i, j)$ に隣接した点が存在せず、独立した点になっている場合、 $e(i, j)$ はノイズとみなし、エッジ上の点列から除く。
- (5) 上記処理を全ての点について行う。

この処理によって得られた膝部分の輪郭点列を図8に示す。

5. 点列の曲線化

一般に測定データには、種々の誤差が含まれているのが普通であり、前節で得られる点列にも、CTスキャナーの解像度や、2値化処理時で生じる情報の欠如などにより誤

差が生じる。3次元モデルを構築する場合、これらの誤差の影響を可能なかぎり排除し、前節で求められたエッジを表わす点列から滑らかな曲線を生成することが求められる。ここでは点列データを平滑化し、Bezier曲線¹⁾によって点列を近似する方法を述べる。

曲線の生成は以下の手法により生成する。

- (1) 点列を最小二乗法によって、直線で近似を行う。
- (2) (1)の直線とそれぞれの点間の距離を計算し、直線と点列の度数分布図を作成する。
- (3) 度数分布が正規分布であるかチェックする。
- (4) 正規分布でなければ、点列を2つに分割し再度上記作業を行う。
- (5) 得られた直線セグメントの2点を端点とし、さらに2点の制御点を与えた4点で記述される3次のBezier曲線でセグメントを補間する。
- (6) この曲線と与えられた点列との距離を計算し、ある一定距離内にある点の分布が一様である場合に、この曲線が点列を近似しているものとみなす。分布が一様でない場合は、制御点の位置を変更し再度(5)の作業を行う。分布のヒストグラムを図9に示す。

このような手順で得られた点列を近似した滑らかな曲線を図10に示す。

6. 人体形状の再構築

輪切りデータから3次元モデルを構築するために多くの手法²⁾が提案されているが、人体の3次元モデルを構築する手法として次の2つに大別される。

- (1) 人体の構成要素を何らかの面で近似する手法（面パッチ構成法）
- (2) 人体の構成要素をボクセルとして近似する手法（ボクセル構成法）

人体構造をどの方法で構築するかは、再構成法のみなら

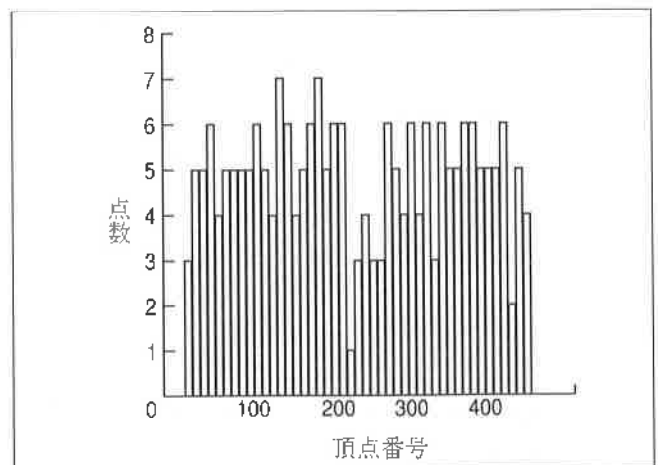


図9 点列の分布ヒストグラム

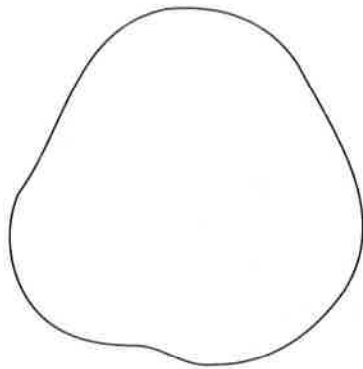


図10 滑らかな曲線

ず、構築したデータを最終的にどのように利用するので大きく影響される。本研究では、レーザーソングラフイー装置による実モデルの作成を行うことや、従来のCAD技術が応用できることなどから、面パッチ構成法による人体モデルの再構築を行った。

構築手法は、各スライス層で抽出された輪郭線を上下の層で関連を付け、3角形パッチ面で構成することにした。具体的な構築法は以下のとおりである。

- (1) 複数のBezier曲線セグメントで表わされている輪郭曲線を適当な分割数で分割する。
- (2) 分割した点にシーケンシャルな番号を付ける。
- (3) この操作を全ての層に対して行う。
- (4) 分割した曲線をZ値（高さ方向）でソートを行う。
- (5) 隣接する層の点を結んでパッチ面を構成する。ここで、I番目の層を l_i とし、 l_i 層にある点を $p_{i,j}$ とすると、 l_{i+1} 層において、点 $p_{i,j}$ と最短距離にある点 $p_{i+1,k}$ を計算し、 $p_{i,j}$ と $p_{i+1,k}$ を結び、次に $p_{i+1,k}$ と $p_{i,j+1}$ を結び、 $p_{i,j}$ 、 $p_{i+1,k}$ 、 $p_{i,j+1}$ の3点で3角形パッチ面を生成（図11）する。
- (6) (5)の操作を l_i, l_{i+1} 層にある全ての点について行う。

7. 再構築例

今回再構築に使用したデータの撮影条件を表1に示す。

20mmごとの輪郭ループとこのループによって再構築した人体のワイヤーフレーム表示の例を図12に、シェーディング表示例を図13に示す。

また、2mmごとの輪郭ループによって再構築した膝部分の表示例を図14に示す。

8. 結 言

下腿義足ソケット製作用CAD/CAMシステムの開発の最初のステップとして、CAD/CAMシステムの設計コンセプトとCT画像からの3次元幾何形状モデルの再構築手法に検討を行った結果、

- (1) CAD/CAMシステムの仕様を決定した。

表1 撮影条件

撮影装置	CE製X線CT装置
スライス方法	ヘリカルスキャンニング
スライス間隔	2 mm
スライス枚数	485枚
画素数	512×512
症 例	健常者

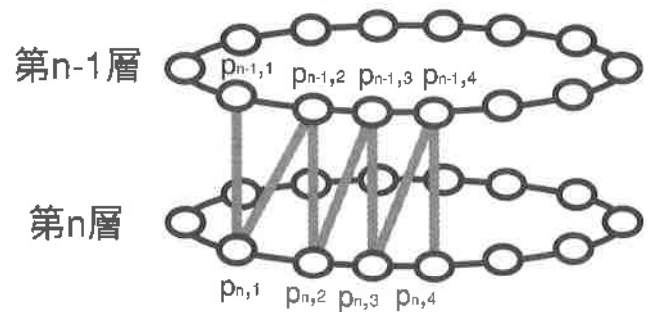


図11 パッチ面構築法

- (2) 断層画像から脚の輪郭形状を表わす点列を得ることができた。
- (3) 輪郭形状の点列を平滑化することで、滑らかな曲線を得ることができ、マルチスライスの断層画像から身体の再構築ができた。
- (4) 既存の義肢ソケットの形状を測定し、3次元モデルとして構築することができた。
- (5) 従来、経験と勘の大きく依存していた医療・福祉分野の義肢装具製作分野に対し、CAD/CAM技術によるコンピュータ援用の製作支援システム構築の礎を固めることができた。

今回は、主にCT画像からの身体モデルの再構築という観点から検討を行い、CT画像のようなマルチスライスの2次元画像から3次元モデルの再構築が可能であることを

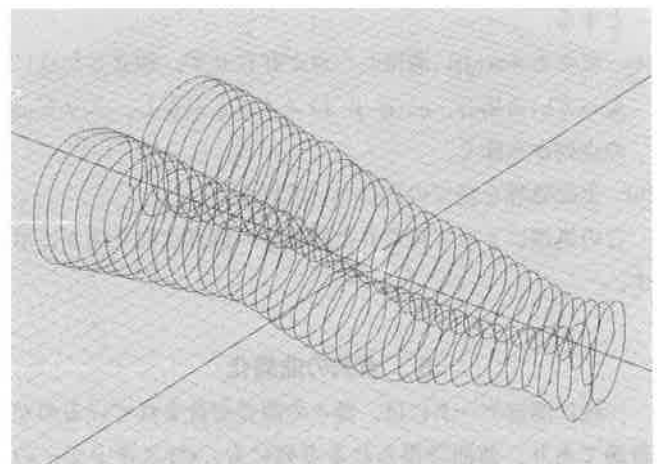


図12 ワイヤーフレーム表示例

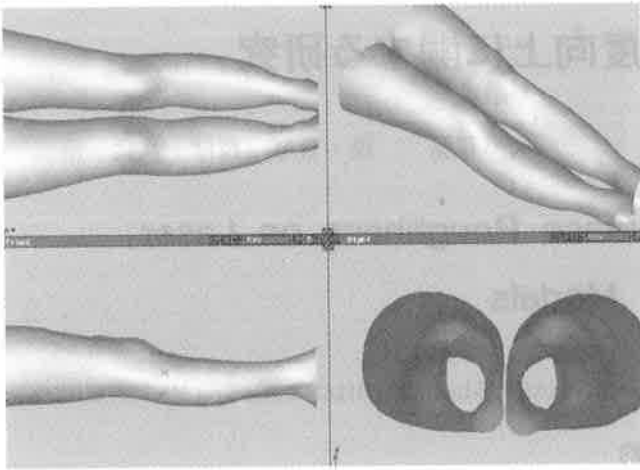


図13 身体モデルシェーディング表示例



図14 漆部再構築例

確認した。

しかしながら、機械部品などのメカニカルなパーツと違い、身体形状は極めて複雑な形状をしており、表皮だけではなく、骨や筋組織を対象にするとデータ量が膨大になり、サーフェース構造のみで表現しようとするシステムのリソースの大半はこのデータで消費されてしまう。3次元サーフェースデータとCT画像から得られる2次元データを融合させ、より少ないデータで効率よく扱える新しい内部データ構造の検討を現在進めている。

最後に本システムの研究において、画像からの輪郭抽出、曲線化にご指導いただきました山梨大学 古川先生、中京大学 伊藤先生、また臨床面とCT撮影でご協力いただきましたあけほの医療福祉センターの佐藤氏、山梨医科大学付属病院 中島先生、中村先生、また義肢製作のモデルとなっいただきました板橋氏に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Dudley S. Childress : Nu PRL-RERC Activities Report, Northwestern University PRL-RERC (1995) 26
- 2) 森本正治 : CAD/CAMによる義肢ソケット製作システム日本義肢装具学会誌, Vol 9 (1993)
- 3) 周藤安造 : 医学における三次元画像処理, コロナ社 (1995)
- 4) 金子敏明 : 数値図形処理, 共立出版 (1994)
- 5) Keith Unsworth : Recent developments in surface reconstruction from planar cross-sections, University of Dundee Computer Science Report, Annals of Numerical Mathematics, vol. 3, nos. 1-4 (1996) 401-422.