4-3 3次元形状計測システム

土 井 淳 多[†]

1. ま え が き

3次元形状計測は産業分野だけでなく医学、芸術など多くの分野で需要のあることは言をまたない。不規則な形状については、それが計測といえるほどの精度で再現できるようになったのはごく最近のことで、汎用的な3次元形状計測はこれからの開発課題となっている。

近時、3次元形状計測には多くの研究・試作例があり、その大部分は何らかの形で画像を利用している。しかし、産業分野で実用的地位を築くに至った方法はまだ少く、今後の開発に期待する部分が多い。本稿では、これら多くの計測方法のうち実施例の多いもの、ないし近い将来に多くの応用が見込めるものを中心に、若干の記述を行いたい。

2. 3次元形状計測に用いられる方法

形状計測においては、対象物体上の任意の一点について基準点からの位置データを得る方法で順次物体表面上を走査する計測法から、直接的に物体の存在空間を規定する方法まで、多くの方法が考えられている。物体上での測定範囲について計測法を分類すれば概略表1のとおりになる。

2.1 物体表面上の位置測定と走査の併用

3次元形状計測で最も広く用いられているものは、3軸のスライド機構とプローブをもつ3次元(座標)測定機である。三角測量方式で非接触とした光学プローブも実用化されている。近ごろは、この方法を微細化しトンネル現象を利用して物体表面の微細構造を測る走査型トンネル顕微鏡(STM, Scanning Tunneling Microscopy)も実用化されている。

三角測量原理に基づく物体点の位置(距離)測定は、レーザスポット光を投射し反射光の結像位置から割出す方法¹⁾で、受光を2ヵ所で行う方法などを含め、モ

表1 3次元形状計測法の分類

次元	計測原理	光源	走査(移動)
点計測 (零次元)	3次元座標測定機 (機械式)	能動 (光プローブ)	測定台枠
	走査型トンネル顕微鏡	能動	測定台枠
	3角測量法	能動	光源/物体
	オートフォーカス法	能動/受動	光源/物体
	飛行時間法 変調光の位相検出法	能動	光源/物体
シート光、 パターン光 投影法 (1~2次元)	ドットパターン投影法	能動	光源/物体
	シート光投影法	能動	物体
	格子投影法 モアレトポグラフィー	能動	光源/物体
	特定パターン光投影法	能動	物体
断面計測 (2次元)	等高線検出法	能動/受動	光源/物体
	光切断法 CT法	能動	物体
	シート光走査法 パターン光走査法	能動	光源
領域計測 (3次元)	単数または小数カメラ による錐(柱)体相貫法	受動	カメラ/物体
	多数カメラによる錐 (柱)体相貫法	受動	不要

ジュール化された商品が市販されている。また、このモジュールを複数個同時に用いて走査を不要にした計測も行われている。他に、自動カメラに用いられているオートフォーカス法や飛行時間の測定法がある。3次元測定機の光学プローブとしてオートフォーカス法も実用化されている。

2.2 シート光、パターン光の投影による方法

上記の方法に線状、格子状あるいは特定パターンの投影により計測の効率化を図る方法がある^{1)~4)}。特にレーザ光を円筒レンズとスリットを用いてシート状とした光源は広く用いられており、耐熱タイルの形状計測や光切断顕微鏡として精密部品の表面計測など多くの実施例がある。

2.3 断面形状測定と積層化

物体の断面形状を連続して測定し積層化して3次元

[†] 東京大学 農学部

"4-3 Systems for the Three-Dimensional Shape Measurement" by Junta Doi (Dept. of Biotechnology, Faculty of Agriculture, The University of Tokyo, Tokyo)

形状を再構成する方法で、走査が1軸のみでよいことから高速の計測が可能になる。断面形状の測り方には、浅い焦点深度の顕微鏡において試料を光軸方向に移動させながら合焦断面の画像を取得する方法、透明物体に対してシート光による断面画像を得る方法、X線などによるCT画像として取得する方法があり、前出のシート光やパターン光をミラーで旋回・走査させる方法もこの分類に含まれる。ミラー走査のシート光もよく用いられる方法で、機械部品の仕分けに利用した例などが報告されている⁵⁾。

2.4 物体の存在領域の規定

前三者は、いわば直接的には零次元～2次元の測定データを走査を用いて3次元的に再構成するのに対し、この方法は直接的に物体の存在する領域を3次元的に規定し形状を再構成するものである。すなわち、一般にカメラなどにより得られた画像にあつては、画像中の物体像の領域をひとつの断面とし、カメラのレンズ中心(視点)を頂点とする錐体(視錐体)を考えることができる。物体は常にこの内部に含まれるから、多方向からの視錐体についてそれらの共通領域(相貫領域)を求めれば、物体はこの限定された領域の内部にだけ存在することになる。そして物体の形状が凸な場合には方向数を増加すれば、この領域の形状はもとの物体形状に近づくことになる。どの視錐体にも現れないような凹所は再現できないが、用途によっては実用上の目的を達し得る。

3. 形状計測とモデリング

上述の各種方法で得られた走査データや断面データは、コンピュータグラフィックス(CG)として表示し、視覚による理解を得ることができ、体積や特徴点などは個別に計算で求めることができる。しかし、形状計測は究極的には形状モデリングとして構造化することが望ましい。

計測の対象となる物体は一般に不規則で複雑な形状であるが、このような形状を表現できるモデルはB-Reps(境界表現, Boundary Representation)と呼ばれるもので、ワイヤモデル、サーフェスモデルおよびソリッドモデルに大別される。このうち、そのいずれの側に物体が存在するかの情報を付した面素(Facet)で物体の境界を表すソリッドモデルが最も汎用的で、体積、重心位置、表面積や断面2次モーメントなどのマスのプロパティ(Mass Property)計算や有限要素法などによる数値解析との結合、あるいは3次元図形の論理演算を含むCADシステムとの結合などに多くの利点をもっている。以下にソリッドモデル化された計測例について紹介する。

4. 断面計測による形状再構成

計測で得られた断面形状を積層化し形状モデルとする方法として、断面間を三角形の面素でパッチすることが広く行われているが、格子型モデルも提案されている⁶⁾。図1は断面間を三角形で構成するソリッドモデル化の概念図である。これは各断面を閉多角形で近似し、相隣る閉多角形断面間を線で接続する方法で

図1 三角形面素による断面の接続

図2 バクテリオファージの再構成例(A)とCG表示(B)¹³⁾

ある．接続の仕方には線分が最短となる方法や断面間の体積が最大となる方法など多くの提案があり，閉多角形の辺上に接続点を設ける方法もある^{7)~9)}．ソリッドモデルのデータ構造は図1の各三角形において，その頂点の座標値と，三角形を構成する頂点の接続順を指定する方法が広く用いられている．図1の順序は右ねじの進む方向が物側の外側に指定されている．この方法はX線CT像など医用画像の他，地形情報⁹⁾，アパレル設計¹⁰⁾や乱流の構造解析¹¹⁾など多分野で用いられており，商品化も進んでいる．

図2は電子顕微鏡写真を基に，この方法でモデル化したバクテリオファージφ29の再構例(A)とそのCG表示(B)である¹²⁾¹³⁾．モデル化によりCG技法を用いてこのような微細構造を詳細に観察することができるとともに，走査型トンネル顕微鏡による3次元像¹⁴⁾

図3 視錐体の相貫による領域決定とソリッドモデル

図4 人形のソリッドモデルと写真

との対比が可能で，分子生物学分野への貢献も期待される．

5. 多重画像による形状再構成

多重画像（多視点画像）からの視錐体の相貫による形状計測の原理は図3のとおりで，画像 $D_i(i=1,2,\dots)$ 上の物体領域を閉多角形で近似（図中の斜線部分）すれば，それぞれの視点とで構成される視錐体はいずれも角錐となる．これら角錐の相貫領域の表現にはVoxel¹⁵⁾やオクトツリー¹⁶⁾を用いる方法も提案されているが，本稿では多面体のソリッドモデルを用いた例について紹介する^{17)~22)}．この方法では特別の光源

図5 魚のソリッドモデルと断面表示

図6 流れの中のタフト挙動（4時刻におけるソリッドモデル）

を要しないことから、鏡面や半透明の表面をもつ物体に対しても適用可能である。

図4は人形の計測例で、1012面をもつ多面体として表現されている。図5も同様の表現による魚の例である。図6はタフト(気流計測に用いられる糸)を3台のカメラで4時刻について同時入力し再構成した多面体の平面図と正面図である。従来、目視により判断されていた流れの状況が定量的に記述できることになる。この方法では、多数のカメラを空間に配置することにより走査が不要になり、高速の計測が可能になる。

流体中のトレーサの移動、非定常な火炎形状のゆらぎや魚の3次元的な行動計量など、大きさや形を変えながら運動する物体の瞬時形状と挙動を追跡できることが、この方法の大きな特徴である。

6. む す び

3次元形状計測に用いられる諸手法を分類し概観した。断面形状計測ないし3次元領域計測という2～3次の計測と、それを形状モデル化した方式に新しい展開が期待される。内部構造まで含めた物体の形状データの取得と加工および効果的な表示技術は、今後ますます大きな役割りを果たすことになる。

(昭和62年6月9日受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) R. A. Jarvis: "A Perspective Range Finding Techniques for Computer Vision", IEEE Trans., PAMI-5, 2, pp. 122-139 (Mar., 1983)
- 2) 松下, 柿倉: "3次元物体認識のための距離センサと走査技術", 計測と制御, 26, 4, pp. 337-342 (Apr., 1972)
- 3) 出澤: "光学的距離情報取得法", 第1回産業における画像センシング技術シンポジウム, pp. 47-56 (June, 1986)
- 4) 吉澤, 鈴木, 田代: "格子パターン投影法による三次元形状の自動測定", O plus E, 87, pp. 56-61 (Feb., 1967)
- 5) O. Ozeki, T. Nakano and S. Yamamoto: "Real-Time Range Measurement Device for Three-Dimensional Object Recognition", IEEE Trans., PAMI-8, 4, pp. 550-554 (July, 1986)
- 6) 程, 出澤, 相馬: "等高線型形状モデルから格子点モデルへの変換", 情処学グラフィックスとCAD研報, 86-CAD-21-4, pp. 1-7 (May, 1986)
- 7) O. D. Faugeras, M. Herbert, P. Mussi and J. D. Boissonnat: "Polyhedral Approximation of 3-D Objects without

- Holes", Comput. Vision. Graphics & Image Process., 25, 2, pp. 169-183 (Feb., 1984)
- 8) 鳥脇: "最近の医用画像三次元表示の基本手法", ME誌, 24, 5, pp. 293-303 (Sep., 1986)
- 9) 中嶋, 宮田, 安居院: "三次元自然形状の擬似符号化について", 情処学グラフィックスとCAD研報, 86-CAD-20-1, pp. 1-8 (Feb., 1986)
- 10) 加藤, 岩崎, 川原井, 川崎: "コンピュータによる衣服デザイン統合化", 日経CG, 1, pp. 130-140 (Oct., 1986)
- 11) J. Jimenez, M. Cogollo and L. P. Bernal: "A Perspective View of the Plane Mixing Layer", J. Fluid Mechanics, 152, pp. 125-143 (Mar., 1985)
- 12) J. M. Carazo, A. Santisteban and J. L. Carrascosa: "Three-Dimensional Reconstruction of Bacteriophage ϕ 29 Neck Particles at 2.2 nm Resolution", J. Molecular Biology, 183, 1, pp. 79-88 (May, 1985)
- 13) J. Jimenez, A. Santisteban, J. M. Carazo and J. L. Carrascosa: "Computer Graphic Display Method for Visualizing Three-Dimensional Biological Structures", Science, 232, pp. 1065-1172 (May 30, 1986)
- 14) A. M. Baró, R. Miranda and J. L. Carrascosa: "Application to Biology and Technology of the Scanning Tunneling Microscope Operated in Air at Ambient Pressure", IBM J. Res. & Dev., 30, 4, pp. 380-386 (July, 1986)
- 15) 宇佐美, 仁尾: "3次元ディジタル画像入力方法の基礎的検討", 情処学コンピュータビジョン研報, 85-CV-37-2, pp. 1-6 (July, 1985)
- 16) C. H. Chien and J. K. Aggarwal: "Computation of Volume/Surface Octrees from Contours and Silhouettes of Multiple Views", Proc. CVPR, pp. 250-255 (June, 1986)
- 17) J. Doi, T. Miyake and T. Asanuma: "Three-Dimensional Flow Analysis by On-Line Particle Tracking", Proc. 3rd Int'l Symp. on Flow Visualization, pp. 14-18 (Sep., 1983)
- 18) 三宅, 土井: "立体形状の多面体近似システム", 情処学論, 25, 5, pp. 745-754 (Sep., 1984)
- 19) 土井, 三宅: "多重画像による三次元形状再構成とその応用", 信学技報, PRU86-74, pp. 37-42 (Dec., 1986)
- 20) J. Doi and T. Miyake: "Three Dimensional Analysis of Time Varying Tuft Behavior by Its Successive Geometric Shape Modeling", Proc. 4th Int'l Symp. on Flow Visualization, pp. 229-234 (Aug., 1986)
- 21) 土井, 三宅: "多重画像による像再構成を用いた流れの三次元計測", 流れの可視化学会誌, 7, 24, pp. 46-52 (Jan., 1987)
- 22) J. Doi, S. Sato and T. Miyake: "Three-Dimensional Measurement of the Shape of Combustion Flames", Laser Diagnostics and Modeling of Combustion, Springer(in press)

どい じゅんた
土井 淳多 昭和34年、東京大学農学部
農業工学科卒業。41年、東京大学農学部助
教授。53年、同大学教授。現在、東京大学
大学院農学系研究科応用生命工学専攻に勤
務。ロボット、レーザ計測、画像処理の研究
に従事。