

断層心エコー図像の三次元的配置によるヒト左室の再構築：本法とシンプソン法を用いた二方向同時撮影左室造影法による左室容積の比較

Three dimensional reconstruction of the human left ventricle from multiple cross-sectional echocardiograms: Comparison with biplane cineventriculography using Simpson's rule

澤田 準
藤井 諄一
相澤 忠範
加藤 和三
尾上 守夫*
久野 義徳*
仲西 正*

Hitoshi SAWADA
Junichi FUJII
Tadanori AIZAWA
Kazuzo KATO
Morio ONOE*
Yoshinori KUNO*
Tadashi NAKANISHI*

Summary

A system for reconstructing three-dimensional images of the left ventricle from randomly-recorded multiple short-axis two-dimensional images was developed. This system consisted of a real-time phased array sector scanner, a transducer-locating arm system for registering the spatial coordinates of the images, and a digitizer-computer system for digitizing the endocardial edge to display the reconstruction image and to calculate the left ventricular volume. The clinical applicability of this system was assessed by comparing the calculated left ventricular volumes by this system (3DE) with those measured by cineventriculography (LVG) for 10 patients. For end-diastolic volumes (EDV) determined by 3DE and LVG, the linear regression equation was $EDV (LVG) = 1.07 EDV (3 DE) - 3.4$, $SEE = 19.0 ml$, $r = 0.959$. For end-systolic volumes (ESV), it was $ESV (LVG) = 1.16 ESV (3 DE) - 6.0$, $SEE = 13.1 ml$, $r = 0.970$, and for stroke volumes (SV), it was $SV (LVG) = 0.70 SV (3 DE) + 32.3$, $SEE = 24.5 ml$, $r = 0.606$.

This method was considered applicable to clinical non-invasive measurements of left ventricular volumes. Digitized images were easily processed by a computer, and much informations, such as volumes, shapes and wall motion, were assessable.

心臓血管研究所
東京都港区六本木 7-3-10 (〒106)
*東京大学生産技術研究所
東京都港区六本木 7-22-1 (〒106)

The Cardiovascular Institute, Roppongi 7-3-10, Minato-ku, Tokyo 106 and *The Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Roppongi 7-22-1, Minato-ku, Tokyo 106

Received for publication August 11, 1984; accepted September 1, 1984 (Ref. No. 25-64)

Key words

Three dimensional echocardiography

Computer graphics

Left ventricular volume

はじめに

左室容積とその変化は心機能評価上重要な指標であるが、非侵襲的で十分な信頼性を有する測定方法はまだ開発されていない。近年、電子計算機とその応用技術の発達に伴い、電算機画像処理の新しい技法が開発され、医学分野においてもさまざまな分野で活用されている。我々はすでに電算機画像処理により複数の断層心エコー図から左室立体像を再構築して左室容積を計測する装置と方法を開発し、摘出ブタ心の容積測定におけるその妥当性を報告した²³⁾。今回は、その臨床応用について検討を加えた。

対 象

対象は10例の左室造影施行例で、内訳は男8例、女2例、年齢は31~65歳、平均49.9±10.3歳である。疾患の内訳は心筋梗塞3例、狭心症3例、心房中隔欠損症、僧帽弁閉鎖不全症、大動脈弁狭窄兼閉鎖不全兼僧帽弁狭窄兼閉鎖不全症、肥大型心筋症、各1例である。

装置と方法

1. 断層心エコー図の記録および記録装置

左室造影法施行の前後1日以内に心尖から心基部までの6ないし8断面において左室短軸断層像を記録した。なお心尖部に向って記録するさい、短軸像が記録し得る限界をもって心尖とし、僧帽弁が記録されるもっとも左房寄りの短軸面をもって心基部断面とした。各画像の記録にさいしては、心尖から心基部にいたる短軸画像ということ以外には、特定の条件をつけていない。

記録装置は超音波心断層像記録装置(Aloka製SSD-800)と、探触子の位置を計測する支持装置(Aloka製Universal stand)から構成される(Fig. 1)。記録中に許される動きは、模式図に示

した3点の屈伸と探触子の回転である(Fig. 2)。これにより、探触子にはこれら3点により規定される平面内での動きと、回転が許されることになる。可動3支点における角度は、角度変化を電圧変化に変換するポテンシオメーターにより記録した。

2. 画像処理

超音波画像はビデオテープからモーションアナライザー(Sony製SMV-1100)のディスクに転写し、フレームごとの再生を行い、拡張終期と収縮終期の短軸像内膜面をトレースした。トレースにさいして肉柱や乳頭筋の像は左室腔内に含めた。トレース像はビジコンカメラで撮影し、画素数256×256、濃淡8ビットのデジタル画像とした後、二値化、細線化を行い、支持装置のーム取付け部を原点とした三次元座標として、コンピューターに記憶させた(Fig. 3)。トレース像より三次元画像を再構築するのに先立ち、トレース像を三次元的に表示し、左室全体の評価に適した配置になっていることを確認し、不適当な例は除外した。トレース像の重ね合わせ像において、隣接する輪郭間を四辺形または三角形で補間することにより面を形成し、立体画像を再構築した(Fig. 4)。

3. 超音波像からの容積計測

もっとも心尖寄りの実記録面ともっとも心基部寄りの実記録面との面積重心を結ぶ直線をz軸とし、心基部側においては、もっとも心基部寄りの実記録面をz軸に対し垂直方向に投影した像を、実記録面と一点で接するように設定し、心基部側断面とした。心尖部側では、もっとも心尖寄りにある2枚の実記録面輪郭を結んで作られた面がz軸と交わるもっとも心基部寄りの点を心尖とした。このように再構築された左室内腔像をz軸に垂直な面で等間隔に50分割し、各部分の体積の総和をもって左室容積とした。駆出量は拡張終期

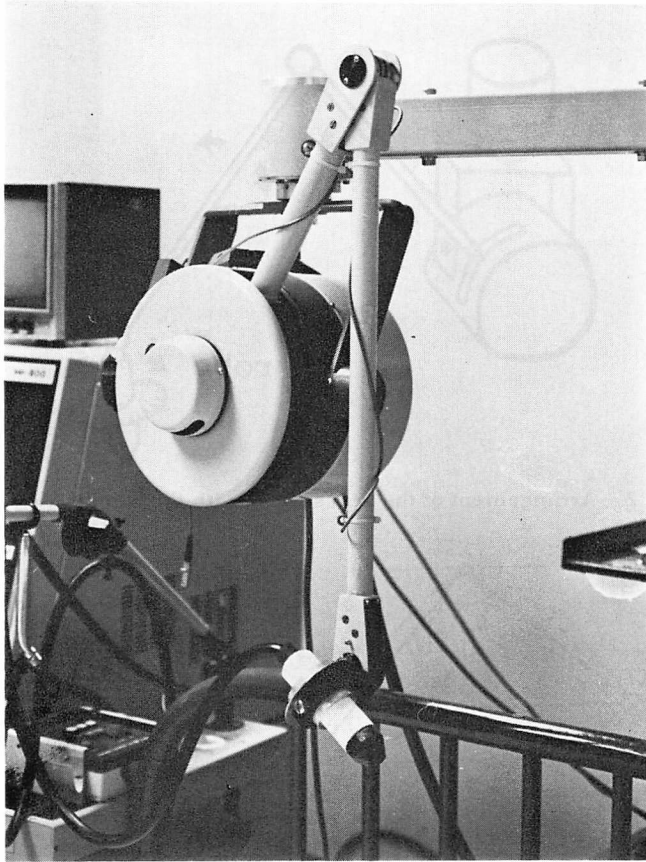


Fig. 1. Transducer-locating arm system.

The probe of the phased array scanner is attached to the special arm with three movable joints and potentiometers.

容積と収縮終期容積の差として求めた。

4. 左室造影像からの容積計測

二方向同時撮影シネアンジオシステム (Siemens 製 Kardoskop-U) により得られた左前斜位および右前斜位の二方向左室造影像をトレースし、ミニコンピューター (DEC 製 PDP 11) に入力し、シンプソン法により求めた。

結 果

再構築された左室は実体をよく再現していると考えられた。これから求めた値と左室造影像から得た値を比較すると、拡張終期容積では $r=0.96$,

$p<0.005$, $SEE=19.0$, 収縮終期容積では $r=0.97$, $p<0.005$, $SEE=13.1$ と良い相関を示した (Figs. 5, 6)。しかし駆出量では $r=0.61$, $p<0.05$, $SEE=24.5$ とあまり良い相関を示さなかった (Fig. 7)。拡張終期容積と収縮終期容積では断層心エコー図法による値が左室造影法による値より、小さく評価される傾向が認められた。

考 察

断層心エコー図法によれば、多断面において左室の断層像を生理的状态で記録することが可能であり、画像相互の位置関係がわかれば、左室構造

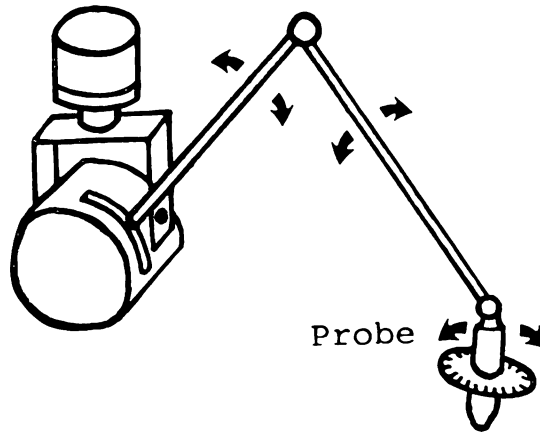
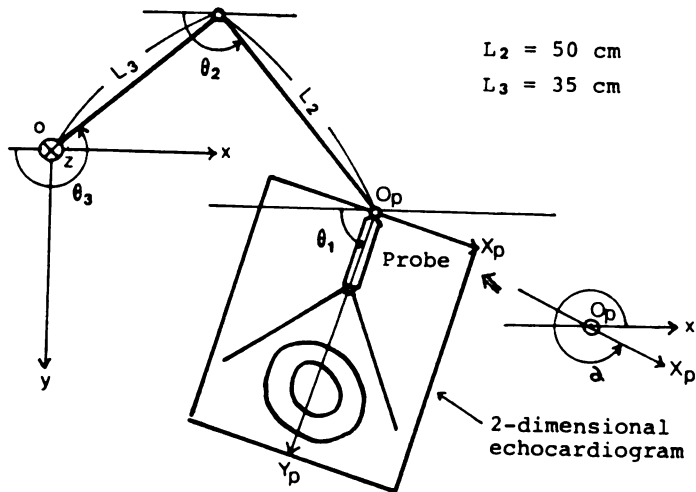


Fig. 2. Arrangement of the arm system with three movable joints.



$$\begin{aligned}
 x &= X_p \cos \lambda \sin \theta_1 - Y_p \cos \theta_1 \\
 &\quad - L_2 \cos \theta_2 - L_3 \cos \theta_3 \\
 y &= X_p \cos \lambda \cos \theta_1 + Y_p \sin \theta_1 \\
 &\quad + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 \\
 z &= X_p \sin \lambda
 \end{aligned}$$

Fig. 3. Determination of the three dimensional position.

X_p, Y_p : two-dimensional coordinates of the short-axis images; X, Y, Z : three-dimensional coordinates.

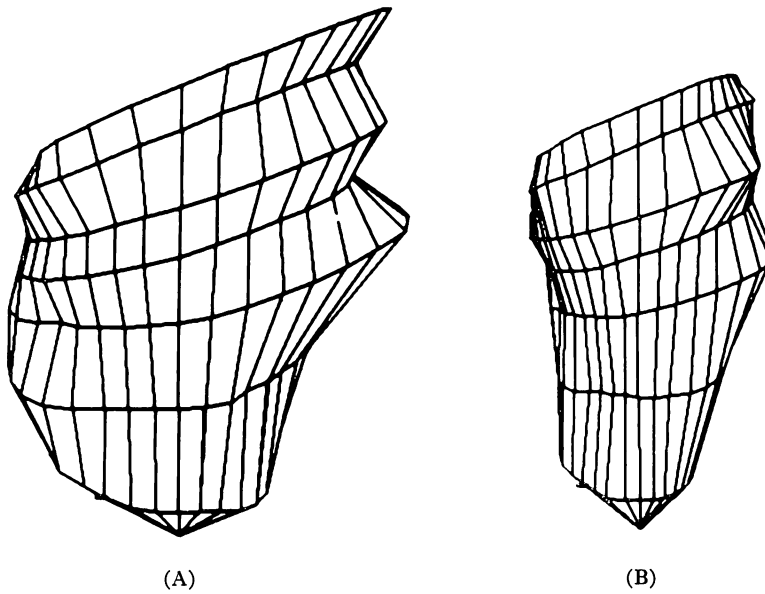


Fig. 4. Reconstructed images of the left ventricular cavity.
 (A) End-diastolic image. (B) End-systolic image.

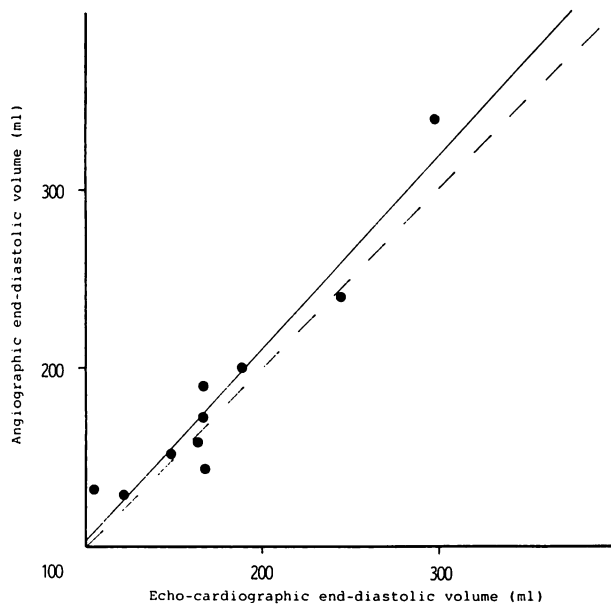


Fig. 5. Biplane cineventriculographic end-diastolic volumes plotted against three-dimensional echocardiographic end-diastolic volumes in 10 patients.

$y = 1.07x - 3.4$; SEE = 19.0; $r = 0.959$; $p < 0.005$.

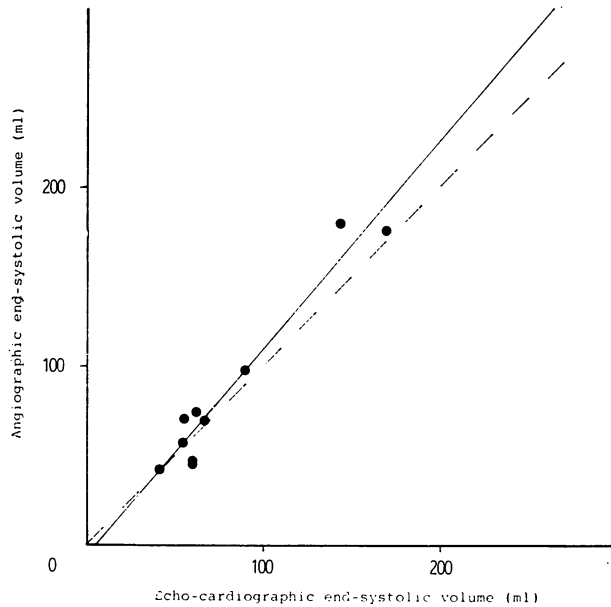


Fig. 6. Biplane cineventriculographic end-systolic volumes plotted against three-dimensional echocardiographic end-systolic volumes in 10 patients.

$y = 1.16x - 6.0$; $SEE = 13.1$; $r = 0.970$; $p < 0.005$.

を三次元的にとらえることが出来る。この特徴に着目して、三次元的情報のうちでも利用価値の高い左室容積の計測に、断層心エコー図法を用いようとする試みは多い¹⁻²³⁾。それらの方法は、画像の位置関係を知る手段により、二つの流れに分けられる。

その一つは画像相互の位置関係を、等間隔の平行な短軸像としてあらかじめ規定しておき、この条件にあう画像を得て、三次元情報を知ろうとする方法である^{1-14,21)}。これらの方法では、条件に合致した画像が得られる摘出標本や模型では正確な値が得られても、条件通りの特定画像が必ずしも得られるとは限らない生体に適用した場合には、結果の信頼性に乏しい。

他の一つの流れは、画像を記録するさいに、探触子の位置を知り、この位置情報を元に画像の空間座標を得、左室の立体像を求めるものである^{15-20,23)}。この流れでは、用いる画像の種類によ

りさまざまな画像処理方法がある。長軸像を用いる場合、胸骨傍からの記録では心尖部の記録が困難である。いわゆる心尖部記録では、一般に心尖と考えて探触子を当てている部分が真の心尖よりも上方にずれていることが知られており、真の長軸像は得難い²¹⁾。

本研究では、各記録法の得失を考慮し、内膜面が比較的鮮明に記録され、トレース像が閉曲線となり、心尖から心基部までの像が記録しやすい短軸断面像を用いた。内膜面の決め方もまた結果に影響を与える因子ではあるが、今回は左室造影像を対照においたため、肉柱や乳頭筋の像を左室腔内に含めた。それでもなお、本法により得られた値は全般的に左室造影像による値より小さかった。これは投影像と断層像という画像の性質の差に加えて、超音波ビームの太さやパルス幅によるアーチファクト、あるいはまた造影剤投与の影響などによるものと考えられる。

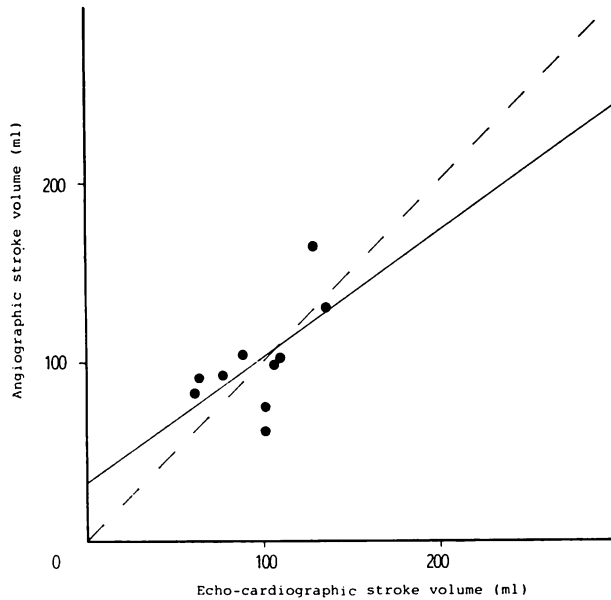


Fig. 7. Biplane cineventriculographic stroke volumes plotted against three-dimensional echocardiographic stroke volumes in 10 patients.

$$y = 0.70x + 32.3; \text{SEE} = 24.5; r = 0.606; p < 0.05.$$

今回の方法は原理的には左室を摘出してその容積を計測するのに準ずるものであり、形態についての仮定や近似を必要とせず、記録にさいしての制限が少ない。しかし実用化するにはいくつかの問題を解決しなければならない。現在、用手的に行っている画像のデジタル化は再現性に問題があり、自動トレーシングや画像上明確な部分のみを入力し、自動的に補間する方法などを、システムに組み込むことが望ましい。画像記録にさいして探触子の動きに制限を加えないためには、支持装置の可動部に十分な自由度を与え、処理方法もこれに合わせて改変する必要がある。本法では記録装置と複数の画像処理装置がそれぞれ独立しているが、処理効率を上げるためには、各装置のオンライン化が必要である。これらの点はすでに開発された技術で解決し得る。

本法では左室内膜面をデジタル化し、空間座標として記憶させておくことが出来るため、プロ

グラム²²⁾により容積計算のほか、形態や動態の三次元的評価への応用が可能である。

結 論

断層心エコー画像の三次元的合成により左室の立体像を再構築し、その容積を求めるシステムについて論じた。本システムによる三次元的画像処理は、生理的状态における左室構造の立体的把握を可能とするものである。

要 約

任意の断面で記録された複数の左室短軸断層心エコー図画像から、左室の三次元像を再構築するシステムを開発した。このシステムは電子走査型超音波断層装置、探触子を装着して画像の三次元座標を記録する支持装置、心内膜辺縁画像をデジタル化して再構築された画像を表示するとともに、左室容積を計算するデジタイザー・コンピ

ューターシステムの3部から構成される。本システムの臨床応用について検討するため、各種心疾患患者10例において、このシステム(3DE)により得られた左室容積を左室造影(LVG)により得られた左室容積と比較した。拡張終期容積(EDV)に関しては $EDV(LVG) = 1.07 EDV(3DE) - 3.4$, $SEE = 19.0 ml$, $r = 0.959$, 収縮終期容積(EVS)に関しては $EVS(LVG) = 1.16 ES(3DE) - 6.0$, $SEE = 13.1 ml$, $r = 0.970$, 駆出量(SV)に関しては $SV(LVG) = 0.70 SV(3DE) + 32.3$, $SEE = 24.5$, $r = 0.606$ の関係が認められた。

このシステムは非侵襲的左室容積計測上、臨床応用可能と考えられた。デジタル化された画像はコンピューターによる処理が容易であり、容積、形態、壁動態など、多くの情報処理が可能である。

文 献

- 1) Carr KW, Engler RL, Forsythe JR, Johnson AD, Gosink B: Measurement of left ventricular ejection fraction by mechanical cross-sectional echocardiography. *Circulation* **59**: 1196-1206, 1979
- 2) Eaton LW, Maugham WL, Shoukas AA, Weiss JL: Accurate volume determination in isolated ejecting canine left ventricle by two-dimensional echocardiography. *Circulation* **60**: 320-326, 1979
- 3) Schiller NB, Acquatella H, Ports TA, Drew D, Goerke J, Ringertz H, Silverman NH, Brundage B, Botvinick EH, Boswell R, Carlsson E, Parmley WW: Left ventricular volume from paired biplane two-dimensional echocardiography. *Circulation* **60**: 547-555, 1979
- 4) Folland ED, Parisi AF, Moynihan PF, Jones DR, Feldman CL, Tow DE: Assessment of left ventricular ejection fraction and volumes by real-time, two-dimensional echocardiography: A comparison of cineangiographic and radionuclide techniques. *Circulation* **60**: 760-766, 1979
- 5) Wyatt HL, Heng MK, Meerbaum S, Hestenes JD, Cobo JM, Davidson RM, Corday E: Cross-sectional echocardiography: I. Analysis of mathematic models for quantifying mass of the left ventricle in dogs. *Circulation* **60**: 1104-1113, 1979
- 6) Silverman NH, Ports TA, Snider AR, Schiller NB, Carlsson E, Heilbron DC: Determination of left ventricular volume in children: Echocardiographic and angiographic comparisons. *Circulation* **62**: 548-557, 1980
- 7) Gueret P, Meerbaum S, Wayatt HL, Uchiyama T, Lang TW, Cordy E: Two-dimensional echocardiographic quantitation of left ventricular volumes and ejection fraction: Importance of accounting for dyssynergy in short axis reconstruction models. *Circulation* **62**: 1308-1318, 1980
- 8) Wyatt HL, Meerbaum S, Heng MK, Gueret P, Cordy E: Cross-sectional echocardiography: III. Analysis of mathematical models for quantifying volume of symmetric and asymmetric left ventricles. *Am Heart J* **100**: 821-828, 1980
- 9) Helac JW, Reichec N: Quantitation of human left ventricular mass and volume by two-dimensional echocardiography: In vitro anatomic variation. *Circulation* **63**: 1398-1407, 1981
- 10) Shapia JN, Kohn MS, Beaver WL, Popp RL: In vitro quantification of canine left ventricular volume by phased-array sector scan. *Cardiology* **67**: 1-11, 1981
- 11) Mercier JC, DiSessa TG, Jarmakani JM, Nakanishi T, Hiraishi S, Isabel-Jones J, Friedman W: Two-dimensional echocardiographic assessment of left ventricular volumes and ejection fraction in children. *Circulation* **65**: 962-969, 1982
- 12) Stamm RB, Carabello BA, Mayers DL, Martin RP: Two-dimensional echocardiographic measurement of left ventricular ejection fraction: Prospective analysis of what constitutes an adequate determination. *Am Heart J* **104**: 136-144, 1982
- 13) Tortoledo FA, Quinones MA, Fernandez GC, Waggoner AD, Winters WL: Quantification of left ventricular volumes by two-dimensional echocardiography: A simplified and accurate approach. *Circulation* **67**: 579-584, 1983
- 14) Weiss JL, Eaton LW, Kallman CH, Maughan WL: Accuracy of volume determination by two-dimensional echocardiography: Defining requirements under controlled conditions in the ejecting canine left ventricle. *Circulation* **67**: 889-895, 1983
- 15) Dekker DL, Piziali RL, Dong E Jr: A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions. *Comput Biomed Res* **7**: 544-553, 1974
- 16) King DL, Al-Banna S, Larach DR: A new three-dimensional random scanner for ultrasonic/computer graphic imaging of the heart. *in* White D, Barnes R, editors: *Ultrasound in medicine* vol. 2. New York, 1975, Plenum Press, 363-372
- 17) Matsumoto M, Matsuo H, Kitabatake A, Inoue M, Hamanaka Y, Tamura S, Tanaka K, Abe H:

- Three-dimensional echocardiograms and two-dimensional echocardiographic images at desired planes by a computerized system. *Ultrasound Med Biol* **3**: 163-178, 1977
- 18) Geiser EA, Lupkiewicz SM, Christie LG, Ariet M, Conetta DA, Conti CR: A framework for three-dimensional time-varying reconstruction of the human left ventricle: Sources of error and estimation of their magnitude. *Comput Biomed Res* **13**: 225-241, 1980
 - 19) Geiser EA, Ariet M, Conetta DA, Lupkiewicz SM, Christie LG, Conti CR: Dynamic three-dimensional echocardiographic reconstruction of the intact human left ventricle: Technique and initial observations in patients. *Am Heart J* **103**: 1056-1065, 1982
 - 20) Nixon JV, Saffer SI, Lipscomb K, Blomqvist CG: Three-dimensional echoventriculography. *Am Heart J* **106**: 435-443, 1983
 - 21) Erbel R, Schweizer P, Lambertz, Henn G, Meyer J, Krebs W, Effert S: Echoventriculography: A simultaneous analysis of two-dimensional echocardiography and cineventriculography. *Circulation* **67**: 205-215, 1983
 - 22) Christiansen H, Stephanson M: Interactive computer graphics MOVIE BYU. Seminar Lecture Note, 1980
 - 23) Sawada H, Fujii J, Kato K, Onoe M, Kuno Y: Three dimensional reconstruction of the left ventricle from multiple cross-sectional echocardiograms: Value for measuring left ventricular volume. *Br Heart J* **50**: 438-442, 1983