

三维超声心动图：现状及将来发展方向综述

中文版翻译：清华大学第一附属医院 王廉一

中文版校对：美国纽约圣-弗朗西斯心脏专科医院 王琳

超声技术在过去 10 到 15 年有了明显改进，让超声心动图医生能用它做更多心脏结构和功能的研究。新型超声设备和技术能提供更佳的图像质量、更高的准确性和扩展能力。因此，更多更好的成像模式可用来评估心脏解剖、心室功能、血流速度和瓣膜病。三维超声心动图提高和扩大了心脏超声的诊断能力。然而，和任何新科技一样，我们在热情拥抱它的同时，必须对其使用的支持证据进行严格评估。了解新技术的局限性与了解其独特的作用一样重要。心脏成像在提供重要临床信息的同时，应安全、准确、灵活、全面，并具备良好的性价比。应根据目前的证据制定合理的应用标准，并且在有新信息时及时更新。

要确认三维新技术的用途，必须对它在临床实践中的独特贡献进行严格分析。在这篇文章中，我们回顾了三维超声心动图的现状，考察了它在不同临床情况下的使用依据，并以现有证据为基础提出它的合理应用指南。

背景

20 世纪 60 年代首次报道了超声图像的三维格式记录和显示。最早的一项研究描述了通过获取人眼眶平行扫描系列并进行三维解剖重建¹。尽管当时技术有限，这些初步研究表明使用三维技术能使复杂的解剖结构得到理想显示。对图像质量以及存储和重建所需的计算能力的担忧大大限制了该技术的早期应用。

十多年后，研究者开始获取心脏三维超声图²。通过仔细跟踪探头，能把二维超声心动图图像序列记录、排列并重建成三维数据。这种方法的局限性是需要离线数据处理来创建和显示三维图像。上世纪 90 年代初，von Ramm 和他的同事³开发出第一个实时三维超声心动图 (RT3D) 扫描仪，能够获得足以描绘心脏运动的帧速容积数据。近来设计和工程的改进导致了实时三维超声心动图的商业化。这种技术发展迅速，目前有几个不同平台的实时三维成像版本。

方法

重建技术

早期三维超声心动图成像是从系列二维图像重建获取。序列二维图像可通过手动扫描或通过事先设置时间间隔的机械化探头获取。手动扫描时，沿着一个固定的切面手动倾斜探头获取序列图像，同时，附在探头上的空间定位器把三维空间信息翻译到直角坐标系。这种方法在实际操作上有些局限性，包括声学空间定位器相对较大，操作探头困难；而且，在声学定位器和介质中需要清晰直接的通路。对电磁空间定位系统来说，另一问题是靠近探头的磁铁类材料（如医院病床上的材料及医疗设备）⁹可能对电磁场造成干扰。

一个替代手动扫描的办法是使用机械化探头获取序列图像，在一定的时间间隔以平行方式或通过固定轴扇形旋转方式取图。因为二维图像之间的时间间隔和角度是预定好的，获取的三维容积取样比手动扫描方法更均匀。

最近，经食管或经胸多平面探头的使用，让以规定间隔角度绕定轴转动取图法更容易。通常情况下，通过设定间隔旋转 180 度采集图像，序列图像通过心电图及呼吸门控以减少伪像，根据呼吸、心率和预定义的空间间隔不同，采集一个完整的数据集通常需要 1 到 5 分钟。心脏手术时，可在图像采集过程中暂停呼吸以减少呼吸运动的影响。

从二维超声重建的三维图像质量会受一些因素影响，包括超声图像的内在质量，用于重建三维图像的二维图像数量（或密度），限制运动伪影的能力，和足够的心电图和呼吸门控。一般情况下，获得图像的数目越多（即图像之间的空间间隔越小），三维重建的质量越好。然而，增加图像的数量也会延长采集时间，可能会造成运动伪影。因此，三维重建所需图像的最佳数目取决于检查的心脏结构和所需的分辨率。例如，4 至 6 序列图像通常足够左心室的重建，而更复杂、快速移动的结构，如二尖瓣和主动脉瓣的观察，则需要更多的图像数。

得到二维图像后，通过定制或市售的软件离线处理，心脏结构可以手动或半自动追踪入三维坐标来重建图像（图 1）。

11 实时三维数据采集方法

研究表明，从系列二维图像重建的三维图像能提供准确的解剖信息，适用于定量分析^{4,8,10-15}。但这种图像采集法受技术限制，需要大量的离线数据处理。实时三维超声心动图可以克服许多重建法的缺点。实时三维超声心动图使用超声元件网格化排列的探头（图 2）。最早的设备由 von Ramm 和他的同事开发^{3,16,17}，用稀疏数组矩阵探头发射频率为 2.5 或 3.5 兆赫。这些探头包括 256 个非同时发射的元素，在一个心动周期获得 $60^\circ * 60^\circ$ 的椎体容积数据集。第一代稀疏阵列探头的分辨力和图像质量相对较差，往往不如标准二维图像，帧频低，椎体的 60° 扇角让它无法容纳大的心室。此外，该系统获得的图像非实时容积生成；而是包括了源于三维数据的由计算机生成的系列二维切面。这些特点限制了这一开创性技术的临床应用。

目前的 3D 系统使用矩阵阵列传感器，与 256 个成像元件的稀疏阵列传感器相比，具有更大数量的成像元素，通常包含超过 3000 的成像元件。这些矩阵阵列传感器能提供更好的分辨率，在临床和研究应用中迅速成为三维数据采集的主要技术。传感器的最新技术改进已实现（1）较小的探头足迹（2）更佳旁瓣抑制（3）更好的敏感性和穿透力，以及（4）可用于灰阶和造影剂成像的谐波技术。此外，这些矩阵阵列探头可以显示实时三维容积图像或 2 至 3 个同时正交的二维成像平面（二平面或三平面成像）。

实时三维系统一般有 3 种采集模式：实时（窄）、缩放（放大），宽角。实时模式显示 $50^\circ * 30^\circ$ 的椎体数据集（图 3A，视频剪辑 1）。缩放模式以较高分辨率显示放大的 $30^\circ * 30^\circ$ 的椎体数据集（图 3b）。广角模式提供 $90^\circ * 90^\circ$ 的椎体数据集，它能包含更大的心脏容积（图 3C，视频剪辑 2）。广角模式需要心电门控，因为它在 4 个连续的心跳内通过合并 4 个窄的椎体扫描获得。为了减少重建伪像，应尽量在屏住呼吸时获取数据。虽然广角数据集提供更大的椎体扫描，与窄角 3D 模式相比，它的代价是分辨率的下降。

获得三维数据集后，必须通过切割或“裁剪”，观察内部的心脏结构（图 4）。可用多裁剪法，但通常是同时显示 2 或 3 个成像平面（视频片段 3a 和 3b），这些成像平面可单独操作来适当调整心脏结构。另一裁剪方法用一个可以手动移动调整的切面来暴露和显示感兴趣的心脏结构（视频剪辑 4）。

技术因素

获取高质量有诊断价值的三维超声心动图，技术方面类似于二维超声心动图。和

任何新的成像技术一样，也存在学习曲线，认识并避免潜在的伪像至关重要。许多伪像都与呼吸或心电图门控和/或不正确的增益设置有关。在采集前使用最佳增益设置是准确诊断的必要条件。过低增益设置会消除一些结构，导致后处理时这些结构看不到。反之，过高增益设置可以屏蔽一些结构，导致明显误诊。推荐采用时间增益补偿来补偿图像的亮度，让总增益设置在中档值，这让后处理设置更加灵活。

大多数三维超声心动图系统使用某种形式的门控，以获得容积数据。门控数据在心律失常或呼吸困难的患者中最具挑战。可用不同方式将门控伪像的影响降到最低。例如，如果门控系统用与参考图像平行的运动模式获取图像，那么获取的每个图像从与参考图像平行的角度看都会显示正常，从与参考图像平面正交角度看的时候门控伪像最明显。

分割就是从原始超声数据提取解剖特征的过程。分割可以使用低级别的技术，如边缘检测（二维）和基于局部特征的表面检测（三维），比如超声强度的空间梯度表现。在基于局部特征和整体结构预期形状的基础上，可用更复杂的技术来尝试提取整个边界或表面。压缩是一种可用于原始数字图像文件的数学技术，用来减少数据量，从而降低存储要求和提高检索率。一个典型的实时三维超声系统单体数据集有 $64 * 64 * 512$ 字节（约 2 MB），或超过 50 MB 的一秒钟电影回放，其负荷可以让存储系统瘫痪。数字数据文件可按 3:1 比率压缩减少负荷。目前 DICOM（医学数字成像和通信）使用的运动 JPEG 算法和单独的二维切片有望实现 20:1 的压缩。更先进的算法，如小波（JPEG-2000），能产生更好的结果。压缩算法的使用可以降低数据文件的大小，在不牺牲图像质量的基础上优化存储效率¹⁹。

方案

一个完整的三维超声心动图检查，包括评估心室功能，心脏瓣膜形态和血流动力学状态。标准二维超声心动图图像在扫查切面的基础上进行描述，而三维超声心动图本质上是容积数据。因此，它既能显示心脏的外观，也能通过裁剪得到多个内部的视角。

表 1 列出了一个完整的三维超声心动图研究构成。一般的方法是用超声平面和观

察视角来描述心脏结构。推荐三个正交平面：（1）矢状面，相当于心脏垂直长轴观；（2）冠状面，相当于四腔心；和（3）横向平面，相当于短轴切面（图 5）。每个平面可以从 2 个侧面看，代表相反的观察角度，例如，表示短轴观的横向平面，可以从心尖或基底部的角度进行观察，冠状面可以从上方或下方观察；而矢状面可以从左或右看。选择窄角或广角成像采集模式取决于需要检查的心脏结构。心室的成像最好用心尖部广角采集（轴向）以包括整个心室。较小的结构，如主动脉瓣，窄角采集足够。

作为完整三维研究的替代方法，三维超声心动图可以作为二维的补充来选择性执行。某些情况下有重点的三维成像研究可能更合适，例如，在二尖瓣狭窄患者，3D 研究可限定观察二尖瓣并定量研究二尖瓣口。作为标准二维成像的补充，三维超声也可重点做左室容积的计算，通常在心尖四腔广角采集图像。

从三维彩色多普勒超声提取血流动力学信息的能力是目前正在研究的内容。为了获得和分析 3 个维度的彩色血流成像，感兴趣区应被包含在三维数据集内，超声束的角度尽可能与血流平行，优化深度和扇角的设置来提高彩色多普勒分辨率。感兴趣区外的血流可裁剪掉，只显示感兴趣的区域。彩色血流可以从多个视角进行分析以提供彩色多普勒数据的完整评估（图 6）。

临床应用

腔室的量化

左心室：三维超声心动图已广泛应用于左室腔径和质量的量化研究（表 2 和表 3）²⁰⁻³⁸。最初三维方法测量左室容积是采用重建技术，虽然比 2D 的方法更准确和可重复，但需要长时间的采集与后处理^{20,21,30,35,39-41}，此外，容积的计算精度高度依赖于图像质量。实时成像技术的应用，因系统使用矩阵相控传感器及更多的处理单元，显著改善了图像质量。此外，左心室的量化算法，可以与矩阵相控传感器获得的三维数据接口，因而得以广泛使用和日益强大。

广角采集模式用于整个左室体积，从中可详细分析左室的整体和局部室壁运动。图像可以显示正交长轴视图或多个短轴视图。目前，可以在个人电脑上使用专门的三维软件进行数据分析，也可以用超声仪的内置软件在线数据分析。数据集包

括了整个左心室容积，因此可以从不同方向获得从基部到心尖的多个断面用以评价室壁运动。如果图像质量欠佳，可结合造影剂显像改善心内膜的边界显示。三维数据对比二维的优点是可以操纵切面显示左心室的真正长轴和短轴，从而避免不恰当的缩短及斜切图像（图 7）。一旦左心室轴适当对齐，左室容积通常可通过使用 2 或 3 个平面的质心算法计算（图 8），缩短了处理时间。此外，可以通过 LV 容积分割进行左室局部功能的评估（图 9，视频 5）。

实时三维超声评估左室容量快速、准确、可重复，优于传统二维方法⁴²。实时三维的优越性已经在各种临床情况下得到确认，但在声窗差的患者中其使用仍然受限。从实时三维心脏容积数据集采用圆盘总和法是计算心室容积的另一种方法。这项技术在心室不对称的患者更优^{22,43}。文献报道表明实时三维超声得到的 LV 体积和质量比心脏磁共振成像或放射性核素所测体积更好^{39,42,44}。此外，在心肌梗死后心室重塑和左心室整体不同步患者，实时三维超声心动图评估左室容积有效、准确（视频 6 和 7）^{32,45}。

初步临床研究证实实时三维负荷超声心动图可行，其敏感性和特异性与二维负荷成像媲美^{46,47}。三维负荷成像优势是减少成像时间；标准视图可从只有 1 或 2 个图像采集中得到。初步临床研究显示 3D 成像平均捕获时间从 65 秒减少到 28 秒^{46,47}。右心室：二维超声心动图评价右室（RV）的功能有限，因为 RV 的非对称锥体形状不符合简单的几何假设。理论上，三维技术可直视整个腔室，从而克服断层法的固有局限性。到目前为止，大多数三维超声心动图技术的 RV 研究主要使用旋转或者徒手扫描方法（表 4）；多数研究证明三维超声可以更精确的评估右心功能⁴⁸⁻⁵⁸。但是，这些三维数据集从二维图像序列重建需要进行离线后处理，从而限制了它的广泛临床应用。最近实时三维超声心动图的发展和普及有可能进一步提高右室大小、体积和功能的评估。

左心房：在数量有限的研究中，使用重建和实时三维超声心动图技术，已准确定量评估左心房容积。三维超声心动图的方法与 MRI 相关良好⁵⁹⁻⁶²，精度媲美 2D 法测量左心房容积⁶³。

瓣膜性心脏病

最近 RT3D 超声心动图的广泛普及，消除了 3D 重建技术在实践中的局限性，为 RT3D 在心脏瓣膜病的临床应用提供了更多可能，即可用于标准诊断评估，还可

在瓣膜修复术中实时指导。因为心脏瓣膜解剖的非平面性、与瓣膜病相关的解剖和空间改变，让 RT3D 成为评价瓣膜功能的理想工具。

二尖瓣：三维超声心动图技术对了解二尖瓣功能和解剖有很大帮助。因为瓣膜、腱索、乳头肌和心肌壁间的复杂相互关系，让二尖瓣特别适合于三维评价。这种技术可提供二尖瓣结构的重要了解，显示二尖瓣环鞍形、其前方的高点和内侧向的低点（图 10，视频剪辑 8）。在二尖瓣脱垂诊断时，有助于提供合适的成像平面，避免假阳性^{64,65}。

此外，三维超声心动图提供了功能性和缺血性二尖瓣反流的重要机制见解，是基于二尖瓣瓣叶及腱索附着、乳头肌和左室的正常空间关系出现紊乱^{13,66}，左室和二尖瓣装置之间正常空间关系的变形带来乳头肌的移位和二尖瓣瓣叶的附系，导致二尖瓣关闭不全和反流（视频 9）。三维超声心动图技术发现功能性二尖瓣反流的二尖瓣环形态发生变化⁶⁷⁻⁶⁹，这些基于三维分析的机制和解剖的见解，为开发治疗缺血性二尖瓣反流的新手段提供了依据⁷⁰⁻⁷⁴。

三维超声心动图已用于识别和定位二尖瓣脱垂、心内膜炎、先天性二尖瓣畸形⁷⁵⁻⁸⁰，在指导外科修复时尤为重要（视频片段 10 和 11）⁸¹⁻⁸³。

用三维方法直接测量近端血流会聚区可有效地定量二尖瓣返流^{84,85}。它有助于了解二尖瓣口前的几何形状如何影响二尖瓣狭窄时瓣口面积的计算⁸⁶。已证实通过三维超声心动图计算二尖瓣口面积准确、可重复、比传统的二维方法变异小（视频 12）⁸⁷⁻⁹¹，因此被推荐为首选方法⁹²。此外，三维超声心动图已用来指导经皮二尖瓣球囊成形术^{93,94}。

主动脉瓣：三维超声心动图已用于主动脉瓣狭窄患者，对主动脉瓣和根部形态进行解剖评估并计算瓣口面积⁹⁵⁻⁹⁹。该技术被用来描述主动脉血流模式^{100,101}，证明它量化主动脉瓣关闭不全可行且准确^{102,103}。其他应用包括主动脉瓣赘生物的检测及定位，先天性流出道梗阻畸形的评价，以及显示瓣膜球囊扩张术后的形态变化¹⁰³⁻¹⁰⁷。

三尖瓣和肺动脉瓣：相比主动脉瓣和二尖瓣，三尖瓣和肺动脉瓣的三维超声心动图研究相对较少。已用它显示三尖瓣风湿性和退行性瓣膜病时的解剖学改变，能准确重建先天性三尖瓣畸形，如房室管畸形^{111,112}。对于肺动脉瓣，三维评估限于肺动脉瓣狭窄和心内膜炎的解剖异常的个案描述性报道^{113,114}。

先天性心脏病

三维超声心动图在先天性心脏病患者应用的临床研究，侧重于三维成像所提供简单缺损或复杂畸形及术后的独特视角和多样用途^{115,116}。使用重建和实时方法，三维超声心动图已用于检查不同形式的先天性心脏病。对比二维超声心动图，能记录分析整个心脏结构和显示复杂空间关系是三维成像的潜在优势。此外，实时三维成像减少了检查时间，或能减少一些儿童患者检查时镇静剂的使用¹¹⁶。

在房间隔缺损的患者，三维超声心动图可以记录缺损的大小和形状。也可以显示缺损的精确位置和周围的残留组织量。在继发孔型房间隔缺损病人（图 11，视频 13），主动脉后缘的大小往往决定能否行经皮封堵修复。三维超声心动图也用于评估房间隔缺损封堵术是否成功，并确定残余分流的位置¹¹⁷。在室间隔缺损患者，三维技术的优点是能显示整个室间隔^{118,119}。通过离线重建测量彩色分流的形状和大小，在孤立性室间隔缺损患者能准确测量分流量，这是三维成像的一个新用途¹¹⁹。

各种三维超声心动图技术已用于评估先天性心脏病患者左右心室的大小和功能。左心室的方法与先前描述的相似，可以量化分析左室的腔径，容积，质量，和射血分数。由于左室的椭球形状，简单的几何假设可以用来计算左室容积，所以三维比起二维超声心动图技术的优势有限；但右室的不对称形状使得用于左室容积计算的简单几何假设不再有效，在这种情况下，证实能够记录和分析整个腔室，而非依赖于简化假设的三维法更好。在先天性心脏病涉及右心室病理改变的患者，三维超声所测量的右室容积与 MRI 相关良好^{48,121,122}。

三维超声心动图已成功应用于几种解剖畸形的检测和评估。例如，应用三维超声心动图成功观察到孤立性主动脉瓣下膜性狭窄的圆周范围和严重程度^{119,120}。从心尖角度观察，能直视看到独特的膜性异常图像，可以分析膜性狭窄的有效面积和血流动力学特征。三维超声心动图也用于评估二尖瓣先天性畸形⁸⁰，这些畸形的复杂性令全面的解剖学评估困难。在这种情况下，三维超声心动图对瓣膜异常的范围和严重程度可以提供完整的术前评估。

术中应用

术中三维超声心动图的准确性、可行性和价值已被证实。与二维 TEE 比较，术中三维超声心动图能提供准确解剖信息且常有补充发现¹²³。在有限的二尖瓣脱垂

术解剖评估研究中，与二维 TEE 相比，3D TEE 评估对脱垂小叶的定位提供了补充附加信息（视频 14）^{77,124}。在不停跳心脏手术中，术中三维 TEE 也用于识别二尖瓣环的扭曲和折叠，它们是导致功能性二尖瓣狭窄或二尖瓣反流恶化的一个原因¹²⁵。最后，已证实术中三维 TEE 在先天性心脏病手术治疗的有价值。例如，在因术后持续返流而再次手术的心内膜垫缺损患者，与 2DTEE 相比，术中三维 TEE 能提供左侧异常房室瓣的直视和斜视图因此术中评估更具优势^{78,126}。在肥厚型心肌病做室间隔心肌切除术的病人，心外膜 RT3D 超声心动图用于提高空间定位和评估间隔增厚程度、二尖瓣收缩期前向运动、术后左室流出道通畅¹²⁷。也用于指导监控不停跳动物模型的房间隔缺损封堵¹²⁸。最后，在缺血性心肌病的外科治疗中，心外膜及术后经胸 RT3D 超声心动图也用来评价梗死心肌切除后左室容积和功能的变化⁶⁹。与三维成像相比，传统的二维方法可能无法准确量化严重缺血性心肌病患者的左心室容积，尤其是在左室室壁瘤导致明显几何变化的情况下。

心肌造影超声心动图

三维超声心动图结合心肌造影改善左室容积的定量有几个优点。实时 3D 技术（单或全容积）最实用。心电触发虽然不是必需，但它提高了信噪比，因此比非触发成像好³⁸。初步临床研究表明，在左室心内膜识别及容积和射血分数测量方面均有明确改善^{129,130}。

三维造影超声心动图不断改进的另一项应用是评价心肌灌注。能够记录整个 LV 和量化低灌注心肌的范围是它的潜在优势¹³¹⁻¹³³。但即便使用触发成像，微泡破坏仍然是一个挑战。尤其在使用矩阵阵列探头时，声功率高会导致心肌显影不理想。这些方面的技术改进，将有助于三维造影超声心动图的更多实际应用。

未来发展方向

三维超声心动图技术的不断发展，包括技术创新和临床应用的扩大。自动化表面提取和量化，单心跳全容积采集，经食管实时三维成像，三维容积内的导航能力，和三维图像的立体可视化是未来可预期的技术进步点。这将进一步提高三维超声心动图的质量和临床应用。此外，完善标准化和侧重三维检查的规程，将优化此技术的临床应用。

左心室表面的实时标记和/或跟踪，可以提供定量心肌力学的新方法，如局部形状和应变。这种方法潜力很大，有望与心脏 MRI 定量能力互补和媲美。超声心动图的优越时间分辨率在这方面能提供独特的优势。未来，将 MRI（或 CT）的高空间分辨率和三维超声心动图更高的时间分辨率相结合，有望获取无与伦比的解剖和生理信息，这种方法叫“融合成像”。

结论

三维超声心动图是一种安全、非侵入性的成像方式，是二维成像的完善和补充，可在多种临床情况下用来评估心血管功能和解剖。现有的证据表明，三维超声心动图在左心室容积和功能计算以及二尖瓣狭窄患者瓣口面积的测量提供了更好的准确性和可重复性。技术改进和更多的临床研究将进一步扩大这种新超声模式的临床应用范围。

SUPERSEDED

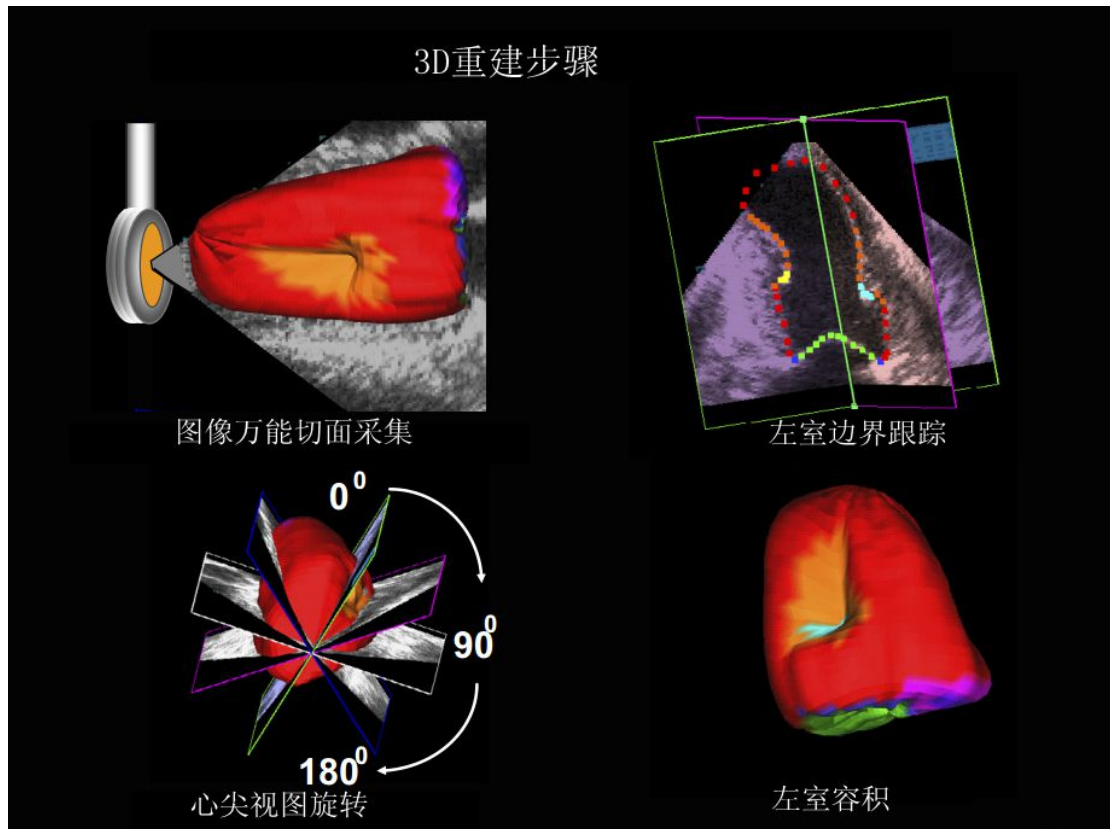


图 1，从沿心尖固定轴获取的系列旋转图像重建左心室容积

Omniplane: 全方位切面

Tracing: 描绘

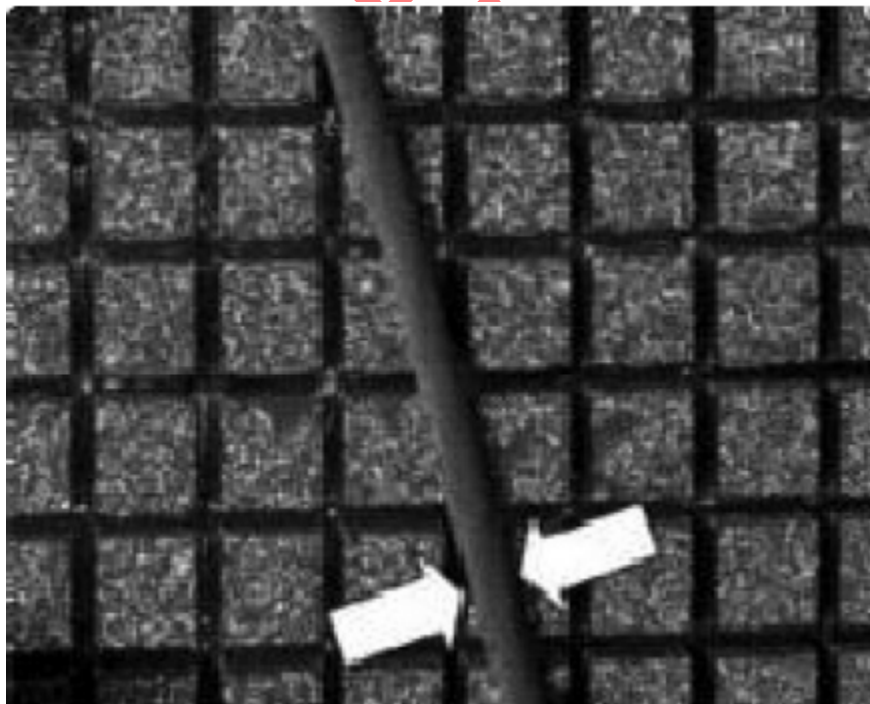


图 2，矩阵相控阵探头中网格状排列的多个探头元素。可见一根头发作为大小参

照对比。

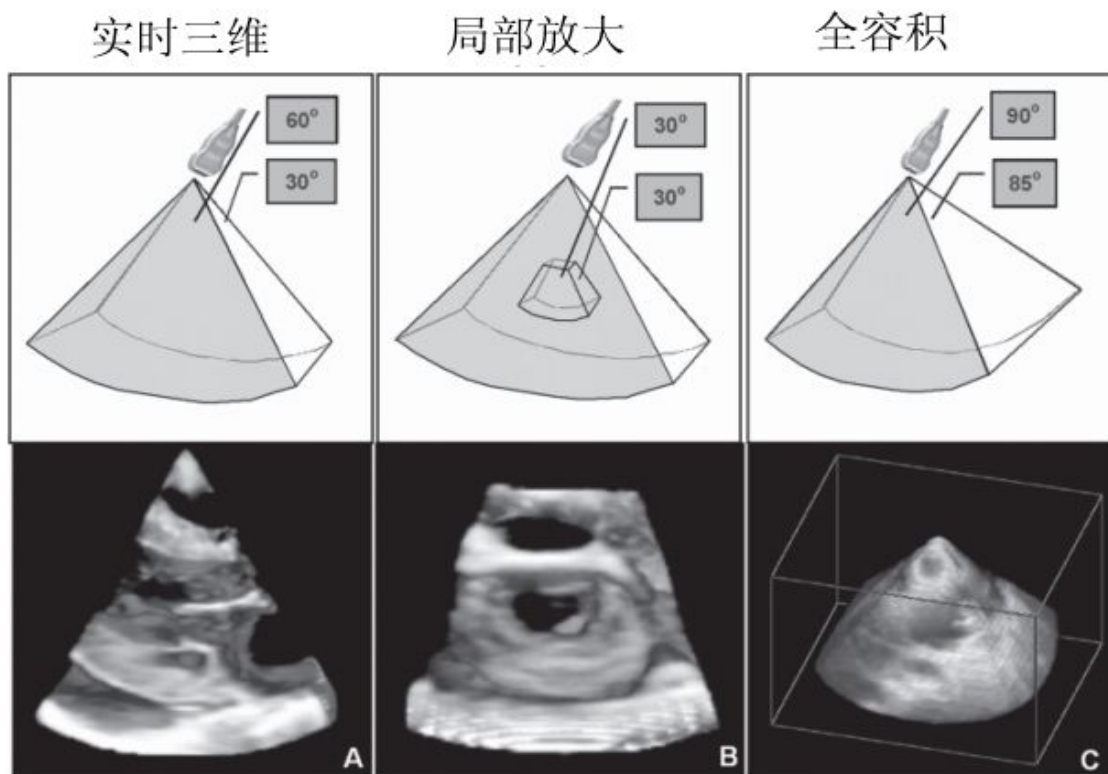


图 3，三种实时三维成像模式：A 实时或窄角模式 B 局部放大模式 C 宽角模式

SUPER

实时3D数据集

裁剪显示结构

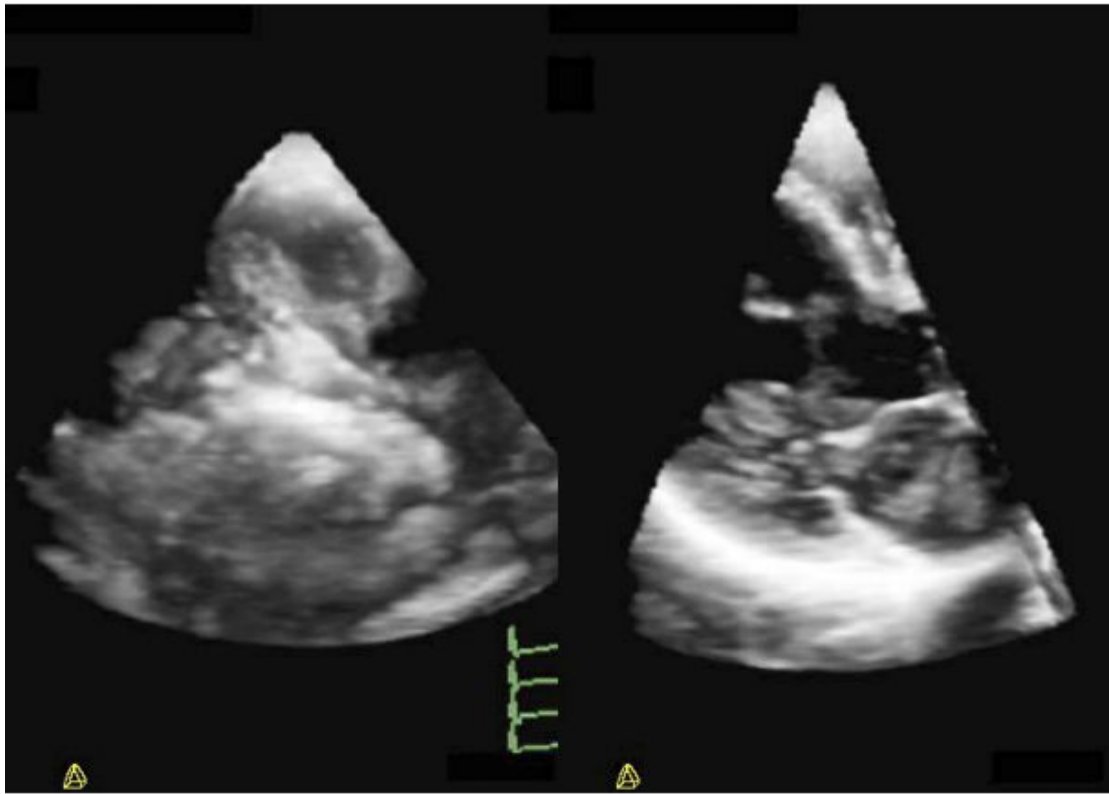


图 4, A 实时三维数据集, B 实时三维数据集切分后显示其内的心脏结构

SUPER

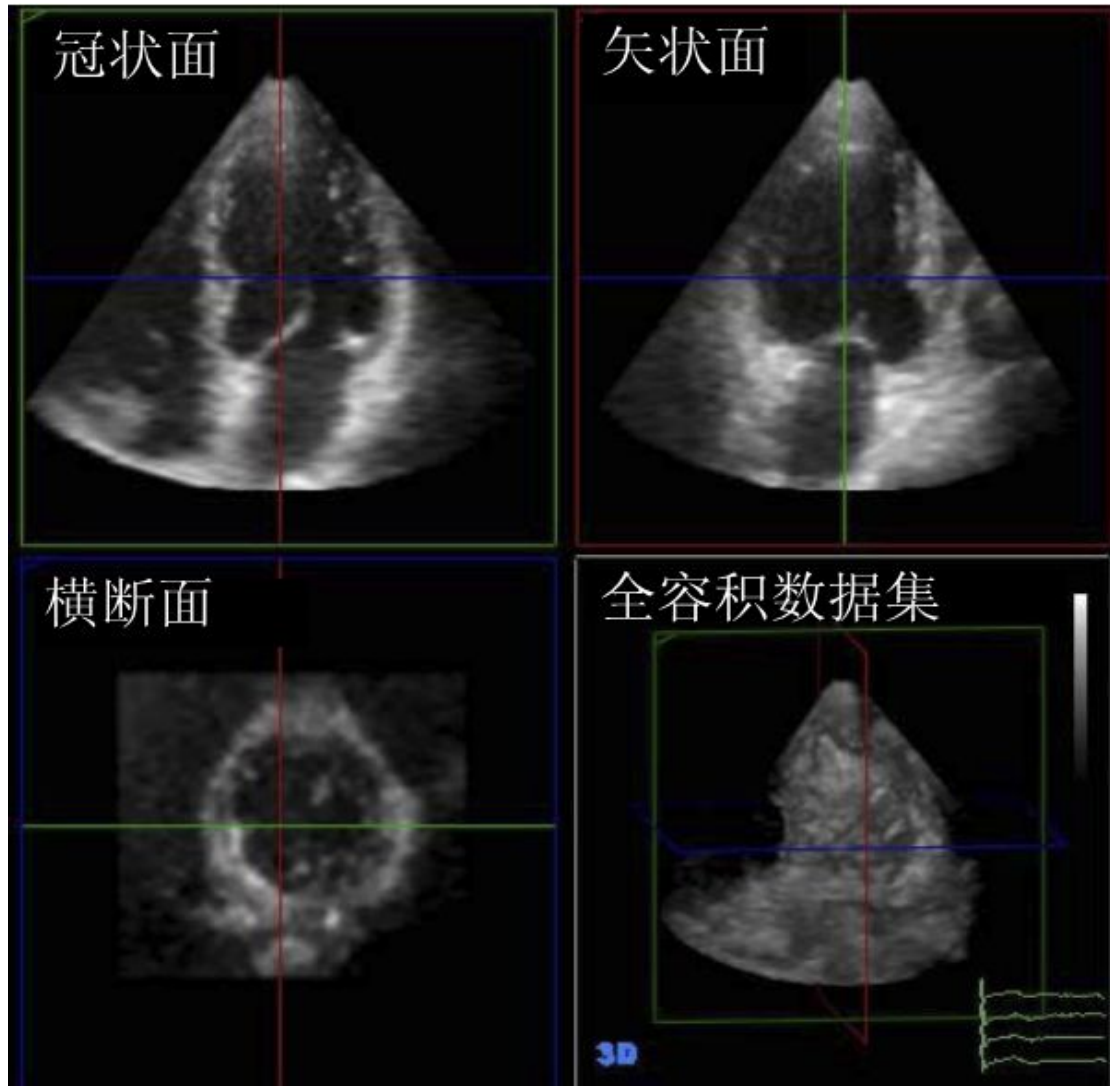


图 5，实时三维数据集（右下）切割成冠状面、矢状面及横断面

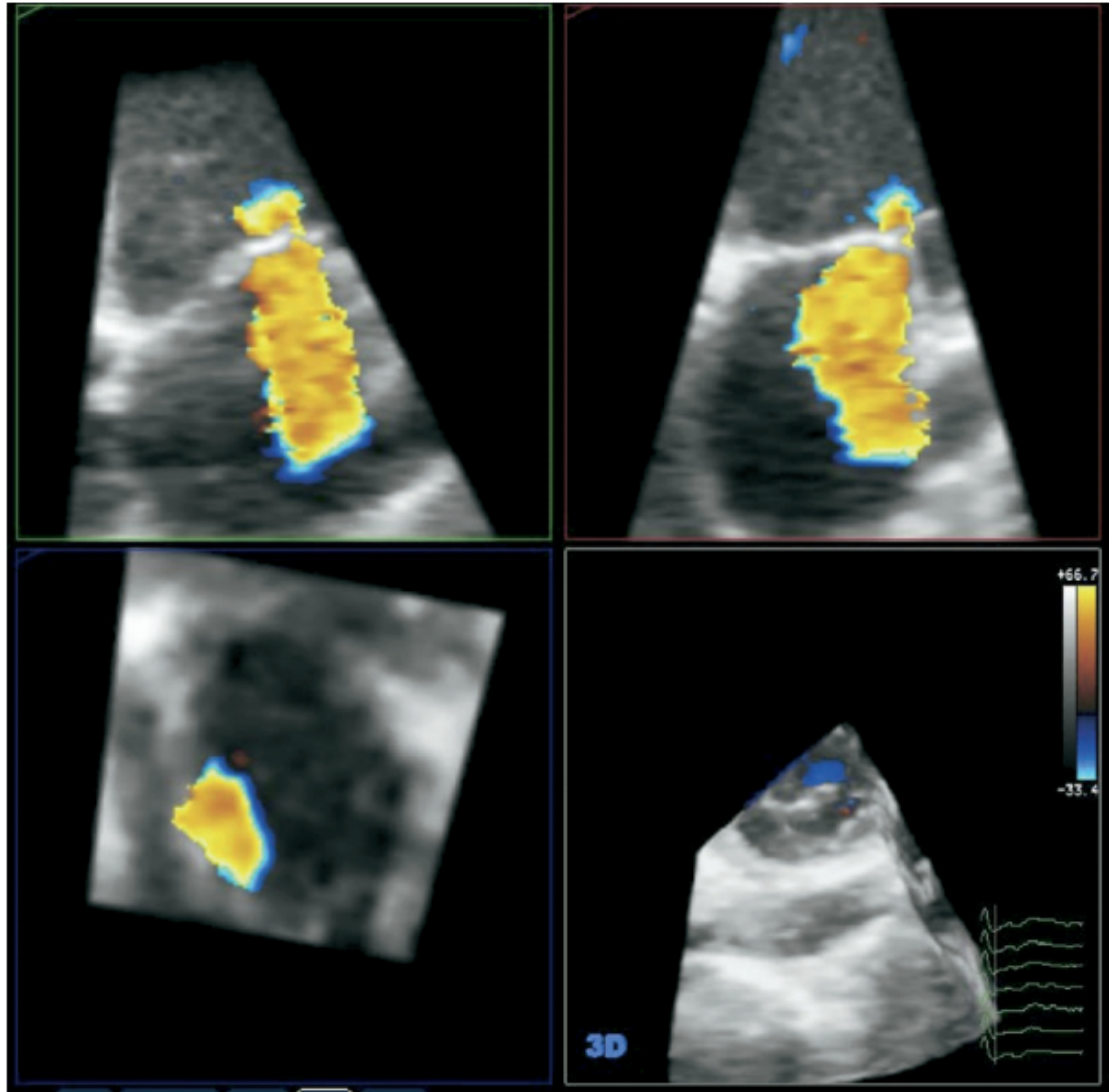


图 6，三维彩色多普勒显示二尖瓣反流

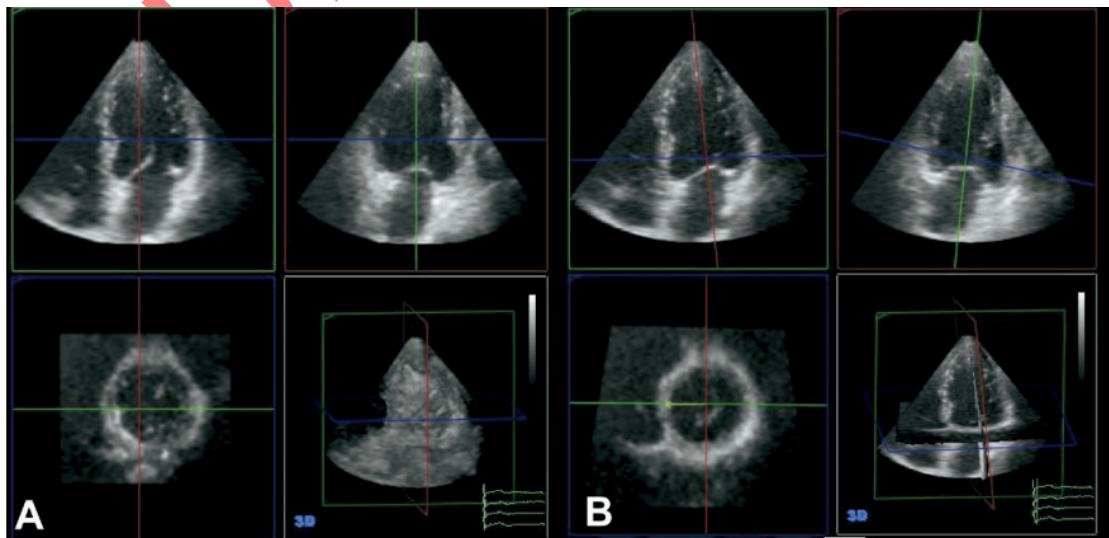
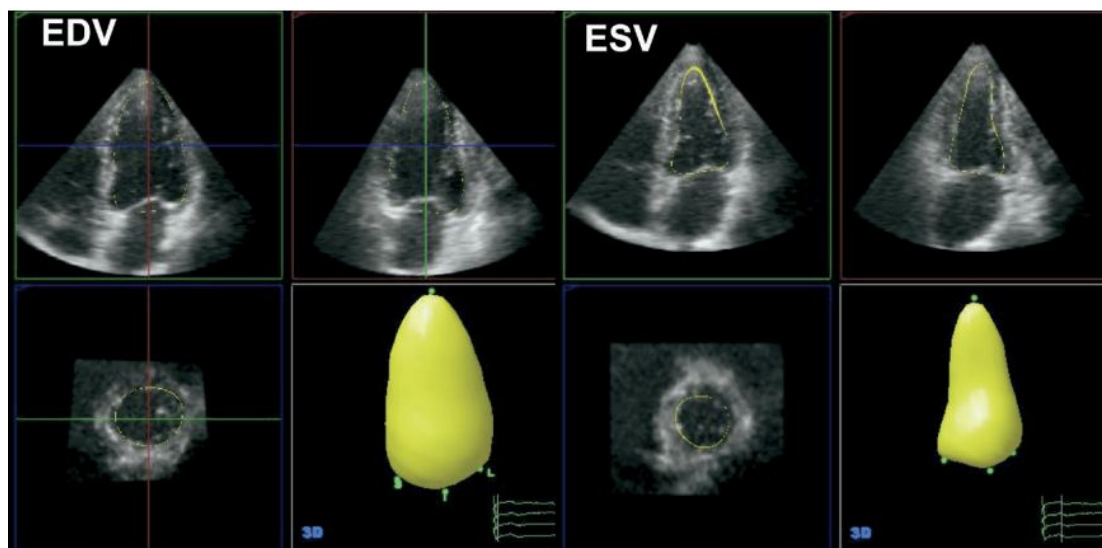


图 7，实时三维超声心动图同时显示三个切面（红、绿、蓝分别标色）。各切面

显示在顶部 2 图和左下图，实时三维数据显示在右下图。每个成像平面可以单独操作对准以计算左室体积（比较 A 和 B）。



EDV=舒张末容积 ESV=收缩末容积

图 8，应用双平面（四腔心及两腔心）5 点描绘算法计算左室容积

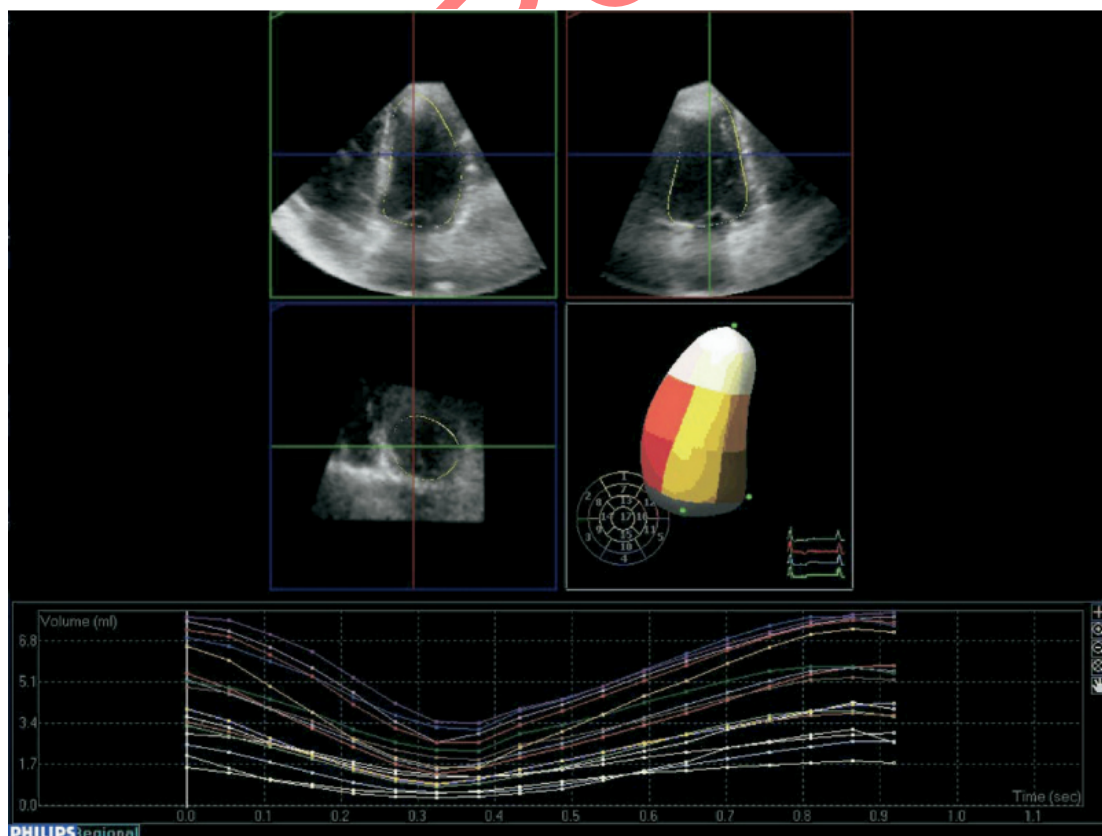


图 9，左室容积分为 17 个部分。图的底部显示左心室各个单独的容积段容积随时间的变化

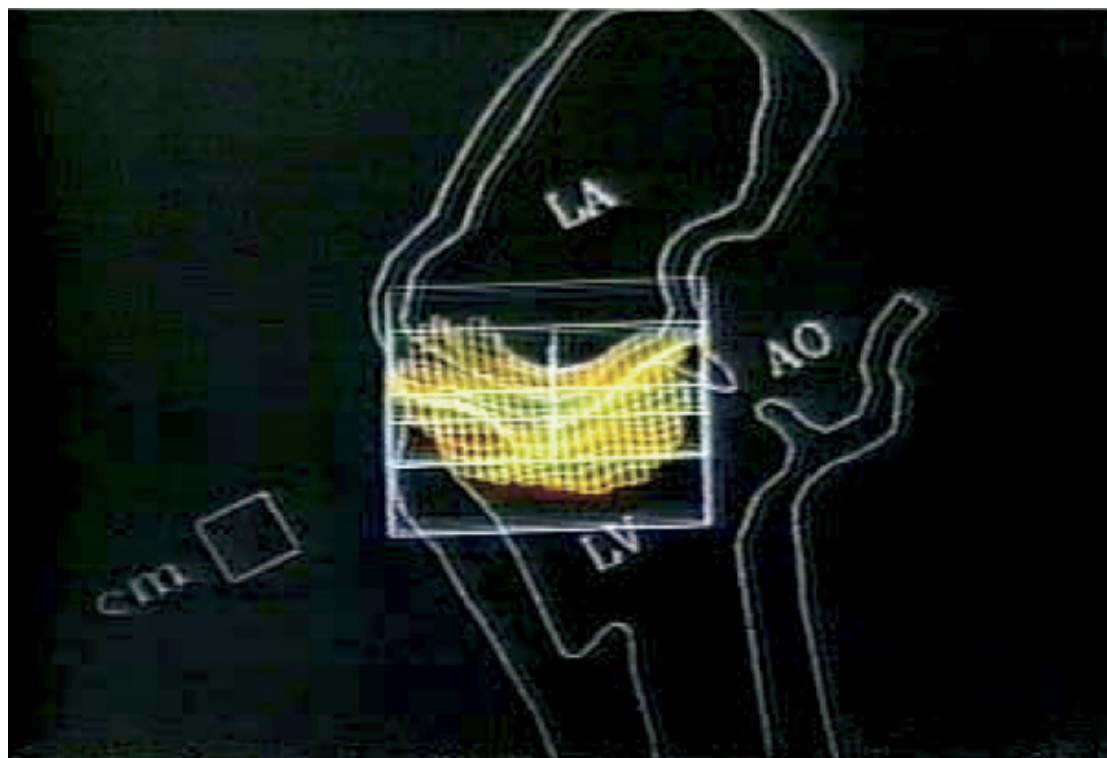


图 10，三维重建显示双峰形的二尖瓣环结构

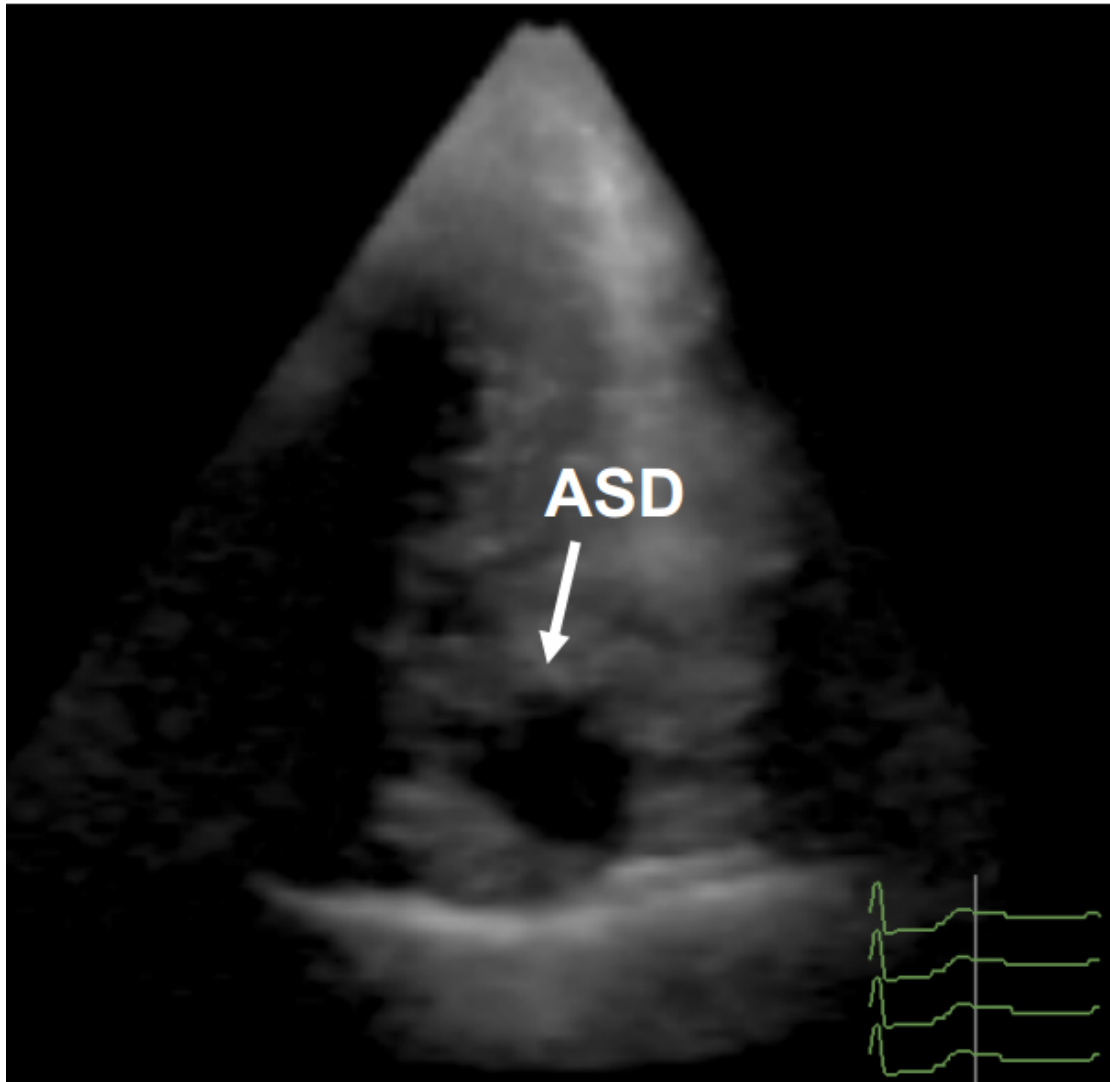


图 11，三维数据集直视房间隔显示房间隔缺损

表 1，完整三维超声心动图检查方案

- *宽角取图，胸骨旁长轴切面：三维彩色模式观察主动脉瓣和二尖瓣，三维彩色模式观察三尖瓣和肺动脉瓣
- *宽角取图，心尖四腔心切面：三维彩色模式观察二尖瓣、主动脉瓣和三尖瓣
- *宽角取图，剑突下切面：三维彩色模式观察房间隔和室间隔
- *宽角取图，胸骨上窝切面：三维彩色模式观察降主动脉

表 2，和独立标准对比三维超声心动图测量人左心室容积的准确性和可重复性

作者	使用技术	研究对象	例数	对照方法
Gopal 等	重建，交叉线法手动扫	正常人	15	MRI

	描, 火花间隙定位器				
Sapin 等	重建, 交叉线法手动扫描, 火花间隙定位器	疑诊 CAD 的患者	35		心室造影
Buck 等	重建, 旋转扫描	CAD 患者	23		MRI
Nosir 等	重建, 旋转扫描	CAD31 人, 正常 15 人	46		MRI
Lange 等	重建, 组织多普勒成像 旋转扫描	CAD 患者	16		心室造影
Nosir 等	重建, 旋转扫描	CAD25 人, 正常 15 人	40		MRI
Schmidt 等	实时三维成像	几种心脏病患者 21 例, 正常人 4 例	25		MRI
Belohlavek 等	重建, 带电磁定位器的 徒手扫描	CAD16 人,其他心脏病 及正常 7 人	29		MRI
Kawai 等	重建, 带电磁定位器的 徒手扫描	CAD10 人及其他心脏 病人	15		门控核素心室 造影
Kühl 等	实时三维数据采集 (稀 疏阵列)	心室形态失常 14 例, 正 常人 10 例	24		MRI
Arai 等	矩阵阵列, 实时三维成 像	CAD 及室壁运动异常 患者	25		SPECT
Jenkins 等	矩阵阵列, 实时三维成 像	申请超声心动图检查的 患者 50 例	50		MRI
Corsi 等	矩阵阵列, 实时三维成 像	申请超声心动图检查的 患者	16		MRI

CAD,冠心病; EDV,舒张末期容积; ESV,收缩末期容积; MRI, 核磁共振成像; SD,标准差; SEE,标准误; SPECT,单光子发射体层显像; 平均差列中的负数意味着三维超声心动图体积比对照体积小

表 2 (续), 和独立标准对比三维超声心动图测量人左心室容积的准确性和可重复性

Pearson 线性回归系数(r)	奥特曼分析 平均差 (偏置)	SEE, ml	观察者间变异,%	评论
-------------------	-------------------	---------	----------	----

		±SD, ml			
EDV 0.92		7		5-8	3D 比 2D 超声与
ESV 0.81		4			MRI 符合率更好
EDV 0.97	13±13	11		11	3D 比 2D 超声与
EDV 0.98	-1±12	10		9	MRI 符合率更好
EDV 0.97	-11±15	15			2° 旋转增量,
ESV 0.97	-3±13	12			3D 比 2D 超声与
					MRI 符合率更好
EDV 0.98	-1±14				2° 旋转增量
ESV 0.98	-2±11				
EDV+ESV	EDV:-4±5	EDV+ESV		10	2° 旋转增量, 组
(合并的) 0.99	ESV:-2±15	合并的: 5		7	织多普勒成像优
					于传统成像
EDV 0.98	-1±14				2° 旋转增量
ESV 0.99	-2±11				
EDV 0.98	EDV+ESV	EDV+ESV			
ESV 0.82	合并的: -17±36	合并的: 28			
合并的: 0.91					
EDV 0.96	-15±20	21		6	变异的旋转增量
ESV 0.96	-7±16	15		9	
EDV 0.99	+1±12	11			从奥特曼图估计
ESV 0.99	+4±10	10			符合性的限制
EDV 0.74	-14±13				2 患者进行了两
ESV 0.88	-18±24				次研究, 仅显示
					屏息 3D 超声心
					动图和 MRI 内
					轮廓方法的数据
EDV 0.94	-17±25	22		7	从奥特曼图估计
ESV 0.96	-4±18	15		5	符合性的限制
EDV 0.98	-14±19	18		2	部分数据由与手
ESV 0.98	-13±21	18		1	动描绘符合率非
					常高的半自动描

EDV 0.97	-4 ± 29 EDV	绘算法获取
ESV 0.98	-3 ± 18 ESV	半自动内膜边界识别

表 3，和独立标准对比三维超声心动图测量左心室质量的准确性和可重复性

作者	技术	研究模式	例数	对照方法
Gopal 等	重建，交叉线显示法徒手扫描，火花间隙定位器	尸检心脏体外研究	11	容积位移
Gopal 等	重建，交叉线显示法徒手扫描，火花间隙定位器	体内，患者	15	MRI
Kühl 等	重建，旋转取图	尸检心脏体外研究	14	容积位移
Lee 等	实时三维成像	各种心脏病的患者	25	MRI
Schmidt 等	实时三维成像	体内，开胸羊	21	尸检心脏测重
Mor-Avi 等	矩阵阵列	申请超声心动图检查的患者	21	MRI
Caiani 等	矩阵阵列	申请超声心动图检查的患者	21	MRI

表 3 (续)，和独立标准对比三维超声心动图测量左心室质量的准确性和可重复性

Pearson 线性回归系数(r)	奥特曼分析 平均差 (偏置) ±SD, g	SEE, g	观察者间变异,%	评论
0.99		3		
EDV 0.90		11	13	3D 比 2D 超声与
EDV 0.93		9	6	

0.98	5±10	10	4	MRI 符合率更好 2° 旋转增量, TEE 探头
0.95	5±26	6		从奥特曼图估计 符合性的限制
0.94	7±5	9		
0.90			0-23	
0.96		11	12.5	

表 4, 和独立标准对比三维超声心动图测量右心室容积的准确性和可重复性

作者	技术	研究模式	例数 (右室数)	对照方法
Jiang 等	重建, 徒手扫描, 火花间隙定位器	尸检心脏体外研 究	12	排水量位移
Jiang 等	重建, 徒手扫描, 火花间隙定位器	体内, 动物实验	20 个血流动力 学时期	腔内球囊容积
Vogel 等	重建, 旋转及扇 形扫描	体内, 患者	16	MRI
Pini 等	重建, 旋转取图	体外, 羊心脏	14	排水量位移
Shiota 等	实时三维成像	体内, 动物实验	14 个血流动力 学状态	电磁流量计所测 每搏量
Ota 等	实时三维成像	体外, 犬心脏	8	引流量
Ota 等	盐水造影对比实 时三维成像	体内, 人志愿者	14	3D 计算 RV 搏出 量对比 2D 计算 LV 搏出量
Hubka 等	重建, 徒手扫描	体外, 牛心脏	10	体外容积直接测 量

表 4 (续), 和独立标准对比三维超声心动图测量右心室容积的准确性和可重复性

Pearson 线性回归系数(r)	奥特曼分析 平均差 (偏置) ±SD, ml	SEE, ml	观察者间变异,%	评论
0.99	2±3	3	5	
EDV 0.99	-2	2	4	
EDV 0.98	2	3		
EDV 0.95	-5±4		4	
EDV 0.87	-6±5		5	
0.94-0.97	0±4	4	5	偏移, 同等条件下较 MRI 低估 2ml
0.8	-3±6			
0.97	0	3	4	
0.88	-4±4	2	8	
0.998	6	3		

SUPERSEDED

参考文献

1. Baum G, Greenwood I. Orbital lesion localization by threedimensional ultrasonography. *N Y State J Med* 1961;61: 4149-57.
2. Dekker DL, Piziali RL, Dong E Jr. A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions. *Comput Biomed Res* 1974;7:544-53.
3. Sheikh K, Smith SW, von Ramm O, Kisslo J. Real-time, three-dimensional echocardiography: feasibility and initial use. *Echocardiography* 1991;8:119-25.
4. King DL, Harrison MR, King DL Jr, Gopal AS, Martin RP, DeMaria AN. Improved reproducibility of left atrial and left ventricular measurements by guided three-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 1992;20:1238-45.
5. Siu SC, Rivera JM, Guerrero JL, Handschumacher MD, Lethor JP, Weyman AE, et al. Three-dimensional echocardiography: in vivo validation for left ventricular volume and function. *Circulation* 1993;88:1715-23.
6. Jiang L, Vazquez de Prada JA, Handschumacher MD, Guerrero JL, Vlahakes GJ, King ME, et al. Three-dimensional echocardiography: in vivo validation for right ventricular free wall mass as an index of hypertrophy. *J Am Coll Cardiol* 1994;23:1715-22.
7. Gopal AS, Schnellbaecher MJ, Shen Z, Boxt LM, Katz J, King DL. Freehand three-dimensional echocardiography for determination of left ventricular volume and mass in patients with abnormal ventricles: comparison with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 1997;10:853-61.
8. Handschumacher MD, Lethor JP, Siu SC, Mele D, Rivera JM, Picard MH, et al. A new integrated system for three dimensional echocardiographic reconstruction: development and validation for ventricular volume with application in human subjects. *J Am Coll Cardiol* 1993;21:743-53.
9. King DL. Errors as a result of metal in the near environment when using an electromagnetic locator with freehand threedimensionalechocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:731-5.
10. Pai RG, Jintapakom W, Tanimoto M, Cao QL, Pandian N, Shah PM. Three-dimensional echocardiographic reconstruction of the left ventricle by a transesophageal tomographic technique: in vitro and in vivo validation of its volume measurement. *Echocardiography* 1996;13:613-22.
11. Franke A, Flachskampf FA, Kuhl HP, Klues HG, Job FP, Merx M, et al. Three-dimensional reconstruction of multiplanar transesophageal echocardiography images: a methodologic report with case examples. *Z Kardiol* 1995;84:633-42 [in German].
12. Roeland J, Salustri A, Mumm B, Vletter W. Precordial threedimensional echocardiography with a rotational imaging probe: methods and initial clinical experience. *Echocardiography* 1995;12:243-52.
13. Otsuji Y, Handschumacher MD, Schwammenthal E, Jiang L, Song JK, Guerrero JL, et al. Insights from three-dimensional echocardiography into the mechanism of functional mitral regurgitation: direct in vivo demonstration of altered leaflet tethering

geometry. *Circulation* 1997;96:1999-2008.

14. Pandian NG, Roelandt J, Nanda NC, Sugeng L, Cao QL, Azevedo J, et al. Dynamic three-dimensional echocardiography: methods and clinical potential. *Echocardiography* 1994;11:237-59.

15. Hozumi T, Yoshikawa J, Yoshida K, Akasaka T, Takagi T, Yamamuro A. Three-dimensional echocardiographic measurement of left ventricular volumes and ejection fraction using a multiplane transesophageal probe in patients. *Am J Cardiol* 1996;78:1077-80.

16. von Ramm OT, Smith SW. Real-time volumetric ultrasound imaging system. *J Dig Imaging* 1990;3:261-6.

17. Snyder JE, Kisslo J, von Ramm O. Real-time orthogonal mode scanning of the heart, I: system design. *J Am Coll Cardiol* 1986;7:1279-85.

18. Sugeng L, Weinert L, Thiele K, Lang RM. Real-time three-dimensional echocardiography using a novel matrix array transducer. *Echocardiography* 2003;20:623-35.

19. Hang X, Greenberg NL, Shiota T, Firstenberg MS, Thomas JD. Compression of real time volumetric echocardiographic data using modified SPIHT based on the three-dimensional wavelet packet transform. *Comput Cardiol* 2000;27:123-6.

20. Gopal AS, Keller AM, Rigling R, King DL Jr, King DL. Left ventricular volume and endocardial surface area by three-dimensional echocardiography: comparison with two-dimensional echocardiography and nuclear magnetic resonance imaging in normal subjects. *J Am Coll Cardiol* 1993; 22:258-70.

21. Sapin PM, Schroder KM, Gopal AS, Smith MD, DeMaria AN, King DL. Comparison of two- and three-dimensional echocardiography with cineventriculography for measurement of left ventricular volume in patients. *J Am Coll Cardiol* 1994;24:1054-63.

22. Buck T, Hunold P, Wentz KU, Tkalec W, Nesser HJ, Erbel R. Tomographic three-dimensional echocardiographic determination of chamber size and systolic function in patients with left ventricular aneurysm: comparison to magnetic resonance imaging, cineventriculography, and two-dimensional echocardiography. *Circulation* 1997;96:4286-97.

23. Nosir YFM, Lequin MH, Kasprzak JD, van Domburg RT, Wletter WB, Yao J, et al. Measurements and day-to-day variabilities of left ventricular volumes and ejection fraction by three-dimensional echocardiography and comparison with magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 1998;82: 209-14.

24. Lange A, Palka P, Nowicki A, Olszewski R, Anderson T, Adamus J, et al. Three-dimensional echocardiographic evaluation of left ventricular volume. Comparison of Doppler myocardial imaging and standard gray-scale imaging with cineventriculography: an in vitro and in vivo study. *Am Heart J* 1998;135:970-9.

25. Nosir YFM, Štokar J, Kasprzak JD, Lequin MH, Dall'Agata A, Ten Cate FJ, et al. Paraplane analysis from precordial three-dimensional data sets for rapid and accurate quantification of left ventricular volume and function: a comparison with

magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 1999;137: 134-43.

26. Schmidt MA, Ohazama CJ, Agyeman KO, Freidlin RZ, Jones M, Laurienzo JM, et al. Real-time three-dimensional echocardiography for measurement of left ventricular volumes. *Am J Cardiol* 1999;84:1434-9.

27. Belohlavek M, Tanabe K, Jakrapanichakul D, Breen JF, Seward JB. Rapid three-dimensional echocardiography: clinically feasible alternative for precise and accurate measurement of left ventricular volumes. *Circulation* 2001;103:2882-4.

28. Lee D, Fuisz AR, Fan PH, Hsu TL, Liu CP, Chiang HT. Real-time 3-dimensional echocardiographic evaluation of left ventricular volume: correlation with magnetic resonance imaging. A validation study. *J Am Soc Echocardiogr* 2001; 14:1001-9.

29. Mannaerts HFJ, van der Heide JA, Kamp O, Papavassiliou T, Marcus JT, Beek A, et al. Quantification of left ventricular volumes and ejection fraction using freehand transthoracic three-dimensional echocardiography: comparison with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2003;16: 101-9.

30. Kawai J, Tanabe K, Morioka S, Shiotani H. Rapid freehand scanning three-dimensional echocardiography: accurate measurement of left ventricular volumes and ejection fraction compared with quantitative gated scintigraphy. *J Am Soc Echocardiogr* 2003;16:110-5.

31. Kuhl HP, Schreckenber M, Rulands D, Katoh M, Schafer W, Schummers G, et al. High-resolution transthoracic real-time echocardiography: quantitation of cardiac volumes and function using semi-automatic border detection and comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Coll Cardiol* 2004;43:2083-90.

32. Arai K, Hozumi T, Matsumura Y, Sugioka K, Takemoto Y, Yamagishi H, et al. Accuracy of measurement of left ventricular volume and ejection fraction by new real-time three-dimensional echocardiography in patients with wall motion abnormalities secondary to myocardial infarction. *Am J Cardiol* 2004;94:552-8.

33. Jenkins C, Bricknell K, Hanekom L, Marwick TH. Reproducibility and accuracy of echocardiographic measurements of left ventricular parameters using real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2004;44:878-86.

34. Corsi C, Lang RM, Veronesi F, Weinert L, Caiani EG, MacEneaney P, et al. Volumetric quantification of global and regional left ventricular function from real-time three-dimensional echocardiographic images. *Circulation* 2005;112:1161-70.

35. Gopal AS, Keller AM, Shen Z, Sapin PM, Schroeder KM, King DL Jr, et al. Three-dimensional echocardiography: in vitro and in vivo validation of left ventricular mass and comparison with conventional echocardiographic methods. *J Am Coll Cardiol* 1994;24:504-13.

36. Kühl H, Franke A, Frielingsdorf J, Flaskamp C, Krebs W, Flachskampf FA, et al. Determination of left ventricular mass and circumferential wall thickness by three-dimensional reconstruction: in vitro validation of a new method using a multiplane transesophageal transducer. *J Am Soc Echocardiogr* 1997;10:107-19.

37. Mor-Avi V, Sugeng L, Weinert L, MacEneaney P, Caiani EG, Koch R, et al. Fast measurement of left ventricular mass with

- real-time three-dimensional echocardiography: comparison with magnetic resonance imaging. *Circulation* 2004;110:1814-8.
38. Caiani EG, Coon P, Corsi C, Goonewardena S, Bardo D, Rafter P, et al. Dual triggering improves the accuracy of left ventricular volume measurements by contrast-enhanced real-time 3-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2005;18:1292-8.
39. Sapin PM, Schroeder KD, Smith MD, DeMaria AN, King DL. Three-dimensional echocardiographic measurement of left ventricular volume in vitro: comparison with two-dimensional echocardiography and cineventriculography. *J Am Coll Cardiol* 1993;22:1530-7.
40. Leotta DF, Munt B, Bolson EL, Kraft C, Martin RW, Otto CM, et al. Quantitative three-dimensional echocardiography by rapid imaging from multiple transthoracic windows: in vitro validation and initial in vivo studies. *J Am Soc Echocardiogr* 1997;10:830-9.
41. Mele D, Teoli R, Cittanti C, Pisanisi G, Guardigli G, Levine RA, et al. Assessment of left ventricular volume and function by integration of simplified 3D echocardiography, tissue harmonic imaging and automated extraction of endocardial borders. *Int J Card Imaging* 2004;20:191-202.
42. Jacobs LD, Salgo IS, Goonewardena S, Weinert L, Coon P, Bardo D, et al. Rapid quantification of left ventricular volume from real-time three-dimensional echocardiographic data. *Eur Heart J* 2006;27:460-8.
43. Qin JX, Shiota T, Asher CR, Smedira NG, Shin JH, Agler DA, et al. Usefulness of real-time three-dimensional echocardiography for evaluation of myectomy in patients with hypertrophic cardiomyopathy. *Am J Cardiol* 2004;94:964-6.
44. Caiani EG, Corsi C, Sugeng L, Macneaney P, Weinert L, Mor-Avi V, et al. Improved quantification of left ventricular mass based on endo- and epicardial surface detection using real-time three-dimensional echocardiography. *Heart* 2006;92:213-9.
45. Kapetanakis S, Keamey MT, Siva A, Gall N, Cooklin M, Monaghan MJ. Real-time three-dimensional echocardiography: a novel technique to quantify global left ventricular mechanical dyssynchrony. *Circulation* 2005;112:992-1000.
46. Matsumura Y, Hozumi T, Arai K, Sugioka K, Ujino K, Takemoto Y, et al. Non-invasive assessment of myocardial ischaemia using new real-time three-dimensional dobutamine stress echocardiography: comparison with conventional two-dimensional methods. *Eur Heart J* 2005;26:1625-32.
47. Ahmad M, Xie T, McCulloch M, Abreo G, Runge M. Real-time three-dimensional dobutamine stress echocardiography in assessment of ischemia: comparison with two-dimensional dobutamine stress echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2001;37:1303-9.
48. Papavassiliou DP, Parks WJ, Hopkins KL, Fyfe DA. Three-dimensional echocardiographic measurement of right ventricular volume in children with congenital heart disease validated by magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 1998;11:770-7.

49. Fujimoto S, Mizuno R, Nakagawa Y, Dohi K, Nakano H. Estimation of the right ventricular volume and ejection fraction by transthoracic three-dimensional echocardiography: a validation study using magnetic resonance imaging. *Int J Card Imaging* 1998;14:385-90.
50. Vogel M, Gutberlet M, Dittrich S, Hosten N, Lange PE. Comparison of transthoracic three-dimensional echocardiography with magnetic resonance imaging in the assessment of right ventricular volume and mass. *Heart* 1997;78:127-30.
51. Jiang L, Siu SC, Handschumacher MD, Luis Guerro J, Vazquez de Prada JA, King ME, et al. Three-dimensional echocardiography: in vivo validation for right ventricular volume and function. *Circulation* 1994;89:2342-50.
52. Pini R, Giannazzo G, Di Bari M, Innocenti F, Rega L, Casolo G, et al. Transthoracic three-dimensional echocardiographic reconstruction of left and right ventricles: in vitro validation and comparison with magnetic resonance imaging. *Am Heart J* 1997;133:221-9.
53. Shiota T, Jones M, Chikada M, Fleishman CE, Castellucci JB, Cotter B, et al. Real-time three-dimensional echocardiography for determining right ventricular stroke volume in an animal model of chronic right ventricular volume overload. *Circulation* 1998;97:1897-900.
54. Ota T, Fleishman CE, Strub M, Stetten G, Ohazama CJ, von Ramm OT, et al. Real-time, three-dimensional echocardiography: feasibility of dynamic right ventricular volume measurement with saline contrast. *Am Heart J* 1999;137:958-66.
55. Hubka M, Mantei K, Bolson E, Coady K, Sheehan F. Measurement of right ventricular mass and volume by three-dimensional echocardiography by freehand scanning. *Comput Cardiol* 2000;27:703-706.
56. Nabeel H. Optimal assessment of right ventricular size and function by real-time 3D echocardiography: comparison to cardiac magnetic resonance imaging. *Circulation* 2004;110(suppl III):III-570 [abstract].
57. Jiang L, Levine RA, Weyman AE. Echocardiographic assessment of right ventricular volume and function. *Echocardiography* 1997;14:189-206.
58. Jiang L, Handschumacher MD, Hibberd MG, Siu SC, King ME, Weyman AE, et al. Three-dimensional echocardiographic reconstruction of right ventricular volume: in vitro comparison with two-dimensional methods. *J Am Soc Echocardiogr* 1994;7:150-8.
59. Poutanen T, Jokinen E, Sairanen H, Tikanoja T. Left atrial and left ventricular function in healthy children and young adults assessed by three-dimensional echocardiography. *Heart* 2003;89:544-9.
60. Khankirawatana B, Khankirawatana S, Lof J, Porter TR. Left atrial volume determination by three-dimensional echocardiography reconstruction: validation and application of a simplified technique. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:1051-6.
61. Keller AM, Gopal AS, King DL. Left and right atrial volume by freehand three-dimensional echocardiography: in vivo validation using magnetic resonance imaging. *Eur J Echocardiogr* 2000;1:55-65.

62. Bauer F, Shiota T, White RD, Lever HM, Qin JX, Drinko J, et al. Determinant of left atrial dilation in patients with hypertrophic cardiomyopathy: a real-time 3-dimensional echocardiographic study. *J Am Soc Echocardiogr* 2004;17:968-75.
63. Jenkins C, Bricknell K, Marwick TH. Use of real-time three-dimensional echocardiography to measure left atrial volume: comparison with other echocardiographic techniques. *J Am Soc Echocardiogr* 2005;18:991-7.
64. Levine RA, Triulzi MO, Harrigan P, Weyman AE. The relationship of mitral annular shape to the diagnosis of mitral valve prolapse. *Circulation* 1987;75:756-67.
65. Freed LA, Levy D, Levine RA, Larson MG, Evans JC, Fuller DL, et al. Prevalence and clinical outcome of mitral valve prolapse. *N Engl J Med* 1999;341:1-7.
66. Levine RA, Hung J, Otsuji Y, Messas E, Liel-Cohen N, Nathan N, et al. Mechanistic insights into functional mitral regurgitation. *Curr Cardiol Rep* 2002;4:125-9.
67. Flachskampf FA, Chandra S, Gaddipati A, Levine RA, Weyman AE, Ameling W, et al. Analysis of shape and motion of the mitral annulus in subjects with and without cardiomyopathy by echocardiographic 3-dimensional reconstruction. *J Am Soc Echocardiogr* 2000;13:277-87.
68. Kwan J, Shiota T, Agler DA, Popovic ZB, Qin JX, Gillinov MA, et al. Geometric differences of the mitral apparatus between ischemic and dilated cardiomyopathy with significant mitral regurgitation: real-time three-dimensional echocardiography study. *Circulation* 2003;107:1135-40.
69. Qin JX, Shiota T, McCarthy PM, Firstenberg MS, Greenberg NL, Tsujino H, et al. Real-time three-dimensional echocardiographic study of left ventricular function after infarct exclusion surgery for ischemic cardiomyopathy. *Circulation* 2000;102(suppl III):III101-6.
70. Messas E, Guerrero JL, Handschumacher MD, Conrad C, Chow CM, Sullivan S, et al. Chordal cutting: a new therapeutic approach for ischemic mitral regurgitation. *Circulation* 2001;104:1958-63.
71. Hung J, Guerrero JL, Handschumacher MD, Supple G, Sullivan S, Levine RA. Reverse ventricular remodeling reduces ischemic mitral regurgitation: echo-guided device application in the beating heart. *Circulation* 2002;106:2594-600.
72. Langer F, Rodriguez F, Ortiz S, Cheng A, Nguyen TC, Zasio MK, et al. Subvalvular repair: the key to repairing ischemic mitral regurgitation? *Circulation* 2005;112(suppl I):I383-9.
73. Tibayan FA, Rodriguez F, Langer F, Zasio MK, Bailey L, Liang D, et al. Annular or subvalvular approach to chronic ischemic mitral regurgitation? *J Thorac Cardiovasc Surg* 2005;129:1266-75.
74. Inoue M, McCarthy PM, Popovic ZB, Doi K, Schenk S, Neme H, et al. The Coapsys device to treat functional mitral regurgitation: in vivo long-term canine study. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2004;127:1068-76.
75. Schwalm SA, Sugeng L, Raman J, Jeevanandam V, Lang RM. Assessment of mitral valve leaflet perforation as a result of

- infective endocarditis by 3-dimensional real-time echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2004;17:919-22.
76. Cheng TO, Xie MX, Wang XF, Li ZA, Hu G Evaluation of mitral valve prolapse by four-dimensional echocardiography. *Am Heart J* 1997;133:120-9.
77. Ahmed S, Nanda NC, Miller AP, Nekkanti R, Yousif AM, Pacifico AD, et al. Usefulness of transesophageal three-dimensional echocardiography in the identification of individual segment/scallop prolapse of the mitral valve. *Echocardiography* 2003;20:203-9.
78. Acar P, Laskari C, Rhodes J, Pandian N, Warner K, Marx G Three-dimensional echocardiographic analysis of valve anatomy as a determinant of mitral regurgitation after surgery for atrioventricular septal defects. *Am J Cardiol* 1999;83:745-9. *Journal of the American Society of Echocardiography* Volume 20 Number 3 Hung et al **231**
79. Barrea C, Levasseur S, Roman K, Nii M, Coles JG, Williams WG, et al. Three-dimensional echocardiography improves the understanding of left atrioventricular valve morphology and function in atrioventricular septal defects undergoing patch augmentation. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2005;129:746-53.
80. Espinola-Zavaleta N, Vargas-Barron J, Keirns C, Rivera G, Romero-Cardenas A, Roldan J, et al. Three-dimensional echocardiography in congenital malformations of the mitral valve. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:468-72.
81. Chauvel C, Bogino E, Clerc P, Fernandez G, Vermet JC, Becat A, et al. Usefulness of three-dimensional echocardiography for the evaluation of mitral valve prolapse: an intraoperative study. *J Heart Valve Dis* 2000;9:341-9.
82. Delabays A, Jeanrenaud X, Chassot PG, Von Segesser LK, Kappenberg L. Localization and quantification of mitral valve prolapse using three-dimensional echocardiography. *Eur J Echocardiogr* 2004;5:422-9.
83. Macnab A, Jenkins NP, Bridgewater BJ, Hooper TL, Greenhalgh DL, Patrick MR, et al. Three-dimensional echocardiography is superior to multiplane transesophageal echo in the assessment of regurgitant mitral valve morphology. *Eur J Echocardiogr* 2004;5:212-22.
84. Sitges M, Jones M, Shiota T, Qin JX, Tsujino H, Bauer F, et al. Real-time three-dimensional color Doppler evaluation of the flow convergence zone for quantification of mitral regurgitation: validation experimental animal study and initial clinical experience. *J Am Soc Echocardiogr* 2003;16:38-45.
85. Iwakura K, Ito H, Kawano S, Okamura A, Kurotobi T, Date M, et al. Comparison of orifice area by transthoracic three-dimensional Doppler echocardiography versus proximal isovelocity surface area (PISA) method for assessment of mitral regurgitation. *Am J Cardiol* 2006;97:1630-7.
86. Gilon D, Cape EG, Handschumacher MD, Jiang L, Sears C, Solheim J, et al. Insights from three-dimensional echocardiographic laser stereolithography: effect of leaflet funnel geometry on the coefficient of orifice contraction, pressure loss, and the Gorlin formula in mitral stenosis. *Circulation* 1996;94:452-9.

87. Cheng TO. Assessment of mitral valve volume by quantitative three-dimensional echocardiography in patients with rheumatic mitral valve stenosis. *Clin Cardiol* 1998;21:869-70.
88. Binder TM, Rosenhek R, Porenta G, Maurer G, Baumgartner H. Improved assessment of mitral valve stenosis by volumetric real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2000;36:1355-61.
89. Xie MX, Wang XF, Cheng TO, Wang J, Lu Q. Comparison of accuracy of mitral valve area in mitral stenosis by real-time, three-dimensional echocardiography versus two-dimensional echocardiography versus Doppler pressure half time. *Am J Cardiol* 2005;95:1496-9.
90. Zamorano J, Cordeiro P, Sugeng L, Perez de Isla L, Weinert L, Macaya C, et al. Real-time three-dimensional echocardiography for rheumatic mitral valve stenosis evaluation: an accurate and novel approach. *J Am Coll Cardiol* 2004;43:2091-6.
91. Sebag IA, Morgan JG, Handschumacher MD, Marshall JE, Nesta F, Hung J, et al. Usefulness of three-dimensionally guided assessment of mitral stenosis using matrix-array ultrasound. *Am J Cardiol* 2005;96:1151-6.
92. Mannaerts HF, Kamp O, Visser CA. Should mitral valve area assessment in patients with mitral stenosis be based on anatomical or on functional evaluation? A plea for 3D echocardiography as the new clinical standard. *Eur Heart J* 2004;25:2073-4.
93. Zamorano J, Perez de Isla L, Sugeng L, Cordeiro P, Rodrigo JL, Almeria C, et al. Non-invasive assessment of mitral valve area during percutaneous balloon mitral valvuloplasty: role of real-time 3D echocardiography. *Eur Heart J* 2004;25:2086-91.
94. Applebaum RM, Kasliwal RR, Kanojia A, Seth A, Bhandari S, Trehan N, et al. Utility of three-dimensional echocardiography during balloon mitral valvuloplasty. *J Am Coll Cardiol* 1998;32:1405-9.
95. Ge S, Wamer JG Jr, Abraham TP, Kon ND, Brooker RF, Nomeir AM, et al. Three-dimensional surface area of the aortic valve orifice by three-dimensional echocardiography: clinical validation of a novel index for assessment of aortic stenosis. *Am Heart J* 1998;136:1042-50.
96. Handke M, Jahnke C, Heinrichs G, Schlegel J, Vos C, Schmitt D, et al. New three-dimensional echocardiographic system using digital radiofrequency data: visualization and quantitative analysis of aortic valve dynamics with high resolution: methods, feasibility, and initial clinical experience. *Circulation* 2003;107:2876-9.
97. Kasprzak JD, Nosir YF, Dall'Agata A, Elhendy A, Taams M, Ten Cate FJ, et al. Quantification of the aortic valve area in three-dimensional echocardiographic data sets: analysis of orifice overestimation resulting from suboptimal cut-plane selection. *Am Heart J* 1998;135:995-1003.
98. Menzel T, Mohr-Kahaly S, Kolsch B, Kupferwasser I, Kopp H, Spiecker M, et al. Quantitative assessment of aortic stenosis by three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 1997;10:215-23.

99. Nanda NC, Roychoudhury D, Chung SM, Kim KS, Ostlund V, Klas B. Quantitative assessment of normal and stenotic aortic valve using transesophageal three-dimensional echocardiography. *Echocardiography* 1994;11:617-25.
100. Haugen BO, Berg S, Brecke KM, Torp H, Slordahl SA, Skaerpe T, et al. Blood flow velocity profiles in the aortic annulus: a 3-dimensional freehand color flow Doppler imaging study. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:328-33.
101. Mehwald PS, Rusk RA, Mori Y, Li XN, Zetts AD, Jones M, et al. A validation study of aortic stroke volume using dynamic 4-dimensional color Doppler: an in vivo study. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:1045-50.
102. Acar P, Jones M, Shiota T, Masani N, Delabays A, Yamada I, et al. Quantitative assessment of chronic aortic regurgitation with 3-dimensional echocardiographic reconstruction: comparison with electromagnetic flowmeter measurements. *J Am Soc Echocardiogr* 1999;12:138-48.
103. Shiota T, Jones M, Tsujino H, Qin JX, Zetts AD, Greenberg NL, et al. Quantitative analysis of aortic regurgitation: real-time 3-dimensional and 2-dimensional color Doppler echocardiographic method: a clinical and a chronic animal study. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:966-71.
104. Acar P, Aggoun Y, Saliba Z, Sidi D, Kachaner J. Effect of balloon dilatation on aortic stenosis assessed by 3-dimensional echocardiographic reconstruction. *Circulation* 1999;99:2598-9.
105. Dall'Agata A, Cromme-Dijkhuis AH, Meijboom FJ, Spitaels SE, McGhie JS, Roelandt JR, et al. Use of three-dimensional echocardiography for analysis of outflow obstruction in congenital heart disease. *Am J Cardiol* 1999;83:921-5.
106. Ge S, Wamer JG Jr, Fowle KM, Kon ND, Brooker RF, Nomeir AM, et al. Morphology and dynamic change of discrete subaortic stenosis can be imaged and quantified with three-dimensional transesophageal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 1997;10:713-6.
107. Yamamoto Y, Shiraishi I, Yamagishi M, Hamaoka K. Mitral valve injury during balloon valvuloplasty for an infant with severe aortic stenosis: spatial evaluation using three-dimensional echocardiography. *Pediatr Cardiol* 2003;24:300-3.
108. Falotra F, La Marchesina U, Bragato R, De Chiara F. Three-dimensional transthoracic echocardiography images of tricuspid stenosis. *Heart* 2005;91:499.
109. Schnabel R, Khaw AV, von Bardeleben RS, Strasser C, Kramm T, Meyer J, et al. Assessment of the tricuspid valve morphology by transthoracic real-time 3D echocardiography. *Echocardiography* 2005;22:15-23.
110. Trocino G, Salustri A, Roelandt JR, Ansink T, van Herwerden L. Three-dimensional echocardiography of a flail tricuspid valve. *J Am Soc Echocardiogr* 1996;9:91-3.
111. Vogel M, Ho SY, Lincoln C, Anderson RH. Transthoracic three-dimensional echocardiography for the assessment of straddling tricuspid or mitral valves. *Cardiol Young* 2000;10:603-9.
112. Nekkanti R, Nanda NC, Ahmed S, Huang WY, Pacifico AD. Transesophageal three-dimensional echocardiographic

- demonstration of clefts in the anterior tricuspid valve leaflet. *Am J Geriatr Cardiol* 2002;11:329-30.
113. Citro R, Salustri A, Gregorio G. Images in cardiovascular medicine: three-dimensional reconstruction of pulmonary valve endocarditis. *Ital Heart J* 2001;2:938-9.
114. Wanitkun S, Rusk RA, Sahn DJ. Assessment of pulmonary artery stenosis using freehand "flock of birds" digital color three-dimensional echocardiographic reconstruction. *J Med Assoc Thai* 2002;85(suppl 4):S1259-65.
115. Marx GR, Sherwood MC. Three-dimensional echocardiography in congenital heart disease: a continuum of unfulfilled promises? No. A presently clinically applicable technology with an important future? Yes. *Pediatr Cardiol* 2002;23:266-85.
116. Balestrini L, Fleishman C, Lanzoni L, Kisslo J, Resai Bengur A, et al. Real-time 3-dimensional echocardiography evaluation of congenital heart disease. *J Am Soc Echocardiogr* 2000;13:171-6.
117. Sinha A, Nanda NC, Misra V, Khanna D, Dod HS, Vengala S, et al. Live three-dimensional transthoracic echocardiographic assessment of transcatheter closure of atrial septal defect and patent foramen ovale. *Echocardiography* 2004;21:749-53.
118. Dall'Agata A, Cromme-Dijkhuis AH, Meijboom FJ, McGhie JS, Bol-Raap G, Nosir YF, et al. Three-dimensional echocardiography enhances the assessment of ventricular septal defect. *Am J Cardiol* 1999;83:1576-9, A8.
119. Ishii M, Hashino K, Eto G, Tsutsumi T, Himeno W, Sugahara Y, et al. Quantitative assessment of severity of ventricular septal defect by three-dimensional reconstruction of color Doppler-imaged vena contracta and flow convergence region. *Circulation* 2001;103:664-9.
120. Nascimento R, Pereira D, Freitas A, Pereira E, Mendonca I, Dinis M. Comparison of left ventricular ejection fraction in congenital heart disease by visual versus algorithmic determination. *Am J Cardiol* 1997;80:1331-5.
121. Abd El Rahmani MY, Abdul-Khalik H, Vogel M, Alexi-Meskishvili V, Gutberlet M, Lange PE. Relation between right ventricular enlargement, QRS duration, and right ventricular function in patients with tetralogy of Fallot and pulmonary regurgitation after surgical repair. *Heart* 2000;84:416-20.
122. Heusch A, Rubo J, Krogmann ON, Bourgeois M. Volumetric analysis of the right ventricle in children with congenital heart defects: comparison of biplane angiography and transthoracic 3-dimensional echocardiography. *Cardiol Young* 1999;9:577-84.
123. Abraham TP, Warner JG Jr, Kon ND, Lantz PE, Fowle KM, Brooker RF, et al. Feasibility, accuracy, and incremental value of intraoperative three-dimensional transesophageal echocardiography in valve surgery. *Am J Cardiol* 1997;80:1577-82.
124. De Castro S, Salandini V, Carloni D, Valfre C, Salvador L, Magni G, et al. Qualitative and quantitative evaluation of mitral valve morphology by intraoperative volume-rendered three-dimensional echocardiography. *J Heart Valve Dis* 2002;11:173-80.
125. George SJ, Al-Ruzzeh S, Amrani M. Mitral annulus distortion during beating heart surgery: a potential cause for hemodynamic disturbance. A three-dimensional echocardiography reconstruction study. *Ann Thorac Surg* 2002;73:1424-30.

126. Miller AP, Nanda NC, Aaluri S, Mukhtar O, Nekkanti R, Thimmarayappa MV, et al. Three-dimensional transesophageal echocardiographic demonstration of anatomical defects in AV septal defect patients presenting for reoperation. *Echocardiography* 2003;20:105-9.
127. Nash PJ, Agler DA, Shin JH, Qin J, Smedira NG, Lever HM, et al. Images in cardiovascular medicine: epicardial real-time 3-dimensional echocardiography during septal myectomy for obstructive hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 2003;108:e54-5.
128. Suematsu Y, Takamoto S, Kaneko Y, Ohtsuka T, Takayama H, Kotsuka Y, et al. Beating atrial septal defect closure monitored by epicardial real-time three-dimensional echocardiography without cardiopulmonary bypass. *Circulation* 2003;107:785-90.
129. Yao J, Takeuchi M, Teupe C, Sheahan M, Connolly R, Walovitch RC, et al. Evaluation of a new ultrasound contrast agent (AI-700) using two-dimensional and three-dimensional imaging during acute ischemia. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:686-94.
130. Yao J, De Castro S, Delabays A, Masani N, Udelson JE, Pandian NG. Bulls-eye display and quantitation of myocardial perfusion defects using three-dimensional contrast echocardiography. *Echocardiography* 2001;18:581-8.
131. Camarano G, Jones M, Freidlin RZ, Panza JA. Quantitative assessment of left ventricular perfusion defects using real-time three-dimensional myocardial contrast echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:206-13.
132. Toledo E, Lang RM, Collins KA, Lammertin G, Williams U, Weinert L, et al. Imaging and quantification of myocardial perfusion using real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2006;47:146-54.
133. Takeuchi M, Otani S, Weihert L, Spencer KT, Lang RM. Comparison of contrast-enhanced real-time live 3D dobutamine stress echocardiography with contrast 2D echocardiography for detecting stress-induced wall motion abnormality. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19:294-9.