

お腹の赤ちゃんを見たい！
- VEを用いた医療画像の実時間・実空間での可視化をめざして -

大淵竜太郎¹, Andrei State², David Chen², Andrew Brandt²,
Chris Tector², Michael Bajura², and Henry Fuchs²

¹日本アイ・ピー・エム東京基礎研究所.

² Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill

仮想インターフェース技術は人間が実世界を知覚し理解する能力を拡大する可能性をもっている。たとえば、see-through Head-Mounted Display (HMD) (シースルーHMD) を用い実世界の画像と超音波断層像を重ね合わせる augmented reality (拡張現実) システムによって、医師が母親の体内の胎児を「見る」ことが可能になるかもしれない。しかし、現在、こういった拡張現実システムの研究は利用可能な計算処理能力によって制約されている。本論文では、実時間・実空間で医療用3次元超音波像を表示する拡張現実システムを題材に、計算処理能力の制約(の一部)を取り除いた場合いったいどのような可能性が開けるのか、またどのような問題点が残るのか、探ってみた。今回紹介する実験と、過去にわれわれの試みた同一目的の拡張現実システムで得られた経験とにより、拡張現実システムの将来に重要な課題の幾つかを明らかにした。

Seeing the baby in the womb
- Real-time real-space visualization of medical images
using virtual environment technology -

Ryutarou Ohbuchi¹, Andrei State², David Chen², Andrew Brandt²,
Chris Tector², Michael Bajura², and Henry Fuchs²

¹Tokyo Research Laboratory, IBM Japan

²Department of Computer Science, University of North Carolina at Chapel Hill

Virtual interface technology offers potential to enhance human perception and understanding of the real world. An *augmented reality* systems with a see-through Head-Mounted Display (HMD), for example, may enable a doctor to view the unborn baby in the mother's abdomen, by combining images of the real world and the image acquired by medical ultrasound echography scanners. Exploration of such systems, however, has been limited by the computational capabilities available. This paper explores the possibility of augmented reality for a particular application, real-space, real-time display of 3D medical echography images, by removing some of the limitations of current computational capabilities. Combined with our previous experience, such exploration have identified issues important to determine future direction of such augmented reality systems.

1. はじめに

超音波断層像は、産婦人科、胃腸科などの多くの医療の分野において、現在最もポピュラーな医療用画像の一つである。これは超音波断層像がその他の手法（例えばX線CT）に比べ安全なこと、2次元断層像を、実時間で、比較的低コストで得られることなどによる。

我々のゴールは、現在米 Duke 大学等で研究されている実時間・3次元の超音波断層像装置から取得した画像を実時間で3次元視覚化し、さらに視覚化された画像（例えば胎児）を、*Augmented Reality (AR)*（拡張現実）と呼ばれる手法を用いて、その画像が取得された位置（例えば母親の腹の中）に表示するシステムを実現することである。このような表示法は、*real-time*（実時間）という言葉からの連想で *real-space*（実空間）表示と呼ばれることもある。

我々は、AR手法を適用することにより、看護婦のような非専門家でも日々の診療に超音波画像を使えるよう、その表示を解りやすくしたい。また、専門医にとっても、このような視覚化によって各種の医療行為、たとえば腫瘍を検査するための尖刺などが容易になるのでは、と期待している。

以下、本章ではARシステムと超音波画像の3次元視覚化についてレビューし、ついで2章では我々UNC-Chapel Hill のグループが過去に行った実験をを幾つか紹介する。3章では、過去のシステムの反省にもとづいて行った最近の実験を報告し、第4章でまとめを述べる。

1. 1. 拡張現実システム

ARシステムは、通常の人間の知覚を「拡張」する。拡張という意味では旧来からの顕微鏡やX線写真と同様であるが、近年ようやくその一部が実用の域に近づきつつある Virtual Environment (VE)（仮想環境）の要素技術を用いることによ

り、人間が本来持っている知覚により近いメタフォで情報を提示できるようになりつつあるところが新しい。対象となる人間の感覚としては、視覚、聴覚、触覚、平衡感覚などいろいろ考えられるが、ここでは視覚を議論の対象とする。

視覚を対象としたARシステムは、*see-through head-mounted display (HMD)*（シースルーHMD）に代表される *see-through head-tracked display*（透視型視点追従表示装置）を用いて、肉眼で見える実世界の画像、*実画像*、とそれ以外の*仮想画像*（計算機に蓄積、生成、もしくは実世界から取得後計算機で処理された画像）を重ね合せ、実世界でそれぞれの画像があるべき位置に表示する。表1では、3種類の生成源からの画像データのどれを人間に提示するかによりVEおよびARシステムを分類した。生成源のうち *eye* は普通のヒトの目に見える情報を、*sensory* は何らかのセンサー（例えば超音波）で取得した情報を、また *synthetic* は計算機に蓄えられもしくはシミュレートされた情報を、与える。アプリケーション例の中で“?”は、可能ではあるが現在のところ該当する例が無いことを示す。

Type	Eye	Sensory	Synthetic	Application examples
VE	No	No	Yes	Architectural walkthrough, molecular modeling, CAM simulation, etc.
VE	No	Yes	No	Scanning tunneling microscope [Taylor, 93].
VE	No	Yes	Yes	?
HV	Yes	No	No	Unaided human eye.
AR	Yes	No	Yes	Laser printer repair [Feiner, 93], aircraft wiring harness assemble [Dave, 94], "on-site" architectural preview, etc.
AR	Yes	Yes	No	Medical ultrasound imaging (This paper)
AR	Yes	Yes	Yes	?

表1. 表示データの発生源によるVEシステムとARシステムの分類。HVは補助なしのヒトの目。

ARシステムには、ボーイング社の航空機のケーブルハーネスの組み立て補助 [Dave, 94] の例やレーザプリンタの修理補助 [Feiner, 93] のように計算機に蓄えられた図面等を実空間表示する例がある。これに対し、何らかのセンサから実時間で入力された情報を直ちに表示するのがここで紹介するような実時間・実空間視覚化システムで、表示するデータがほとんど変化しない on-site architectural preview や修理マニュアルの表示などに比べてより高い処理能力を必要とする可能性が高い。

VE用には、両眼ステレオ視より重要な視覚的3次元 cueである head-motion parallax を備える head-tracked (視点追従) 表示装置を多く用いる。このタイプで代表的なのがHMDであるが、fish-tank virtual reality display [Deering, 92], [Arthur, 93] のように固定したビデオモニタを用いるものもある。AR用の表示装置では、視点追従に加えて実像と仮想像を重ねて表示するシースルー機能が要求される。このシースルー機能は実画像または仮想像がお互いを完全にブロックできるか否かで分類される。最も多いハーフミラー方式では、一方の画像による他方の画像の完全なブロックが不可能である(例えば [Sutherland, 68], [Holmgren, 92])。我々の用いたビデオシースルー方式(例えば[Edwards, 93])では相互に完全なブロックが可能だが、その反面実画像の画質が低く、また実画像が実世界に遅れる。この他、まだ実例を見ないが、ピクセルごとに液晶シャッタを付けることにより相互完全ブロック可能な光学シースルーディスプレイも可能であろう。

1. 3. 医療用超音波画像の3次元視覚化

医療用超音波像の3次元視覚化はしばしば試みられている ([McCann, 88], [Lalouche, 89], [Pini, 90], [Tomographic Technologies, 93] など)。しかし、手持ちで操作される2次元超音波プローブを6自由度でトラックし3次元再構築および3

次元視覚化を試みたのはこのうち数例に過ぎない ([Ganapathy, 92], [Ohbuchi, 92], [Watkin, 93])。

これら3次元視覚化をするシステムも、患者の脇に置かれた一般の固定式ビデオモニタ(視点追従なし)を表示に使っていた。従って使用者は、解剖学の知識を使って超音波画像の向きや位置などを考えつつ、目で見える(実世界の)患者の像と超音波画像とを頭のなかで融合する必要があった。我々の目標は、実空間表示によりこのような頭脳の負担を減らすことにある。

頭脳の負担の軽減を目指して我々の試みた初めてのシステム [Bajura, 92] は、ビデオシースルーHMDを使い、実時間(といっても数フレーム/秒)で取り込まれる2次元の超音波断層像を、ビデオカメラで撮った患者の実画像に融合して実空間で表示した。このシステムはARの可能性を示唆したシステムであったが、超音波画像の3次元視覚化はせず、超音波画像の取り込みは数フレーム/秒に限られ、融合した画像中にはただか数枚の2次元断層像を同時表示するのがやっとだった。また、トラックのノイズ、トラックの精度や校正の不足、システムの種々の遅れ、低フレームレート、などの原因により、超音波画像は患者の中に留まるようには見えず、患者の上をふらふらとさまよっているように見えた。つまり、真の「実時間・実空間の視覚化」には程遠いシステムであった。

2. 実時間・実空間の3次元視覚化を目指して

我々のさしあたりの目標は、実時間・実空間で視覚化された胎児の映像を非専門家、例えば子供が見て「あ、赤ちゃんだ!」と解ることである。[Bajura, 92]に述べられた実験(これを便宜上「実験0」と呼ぶ)以来、我々はこの目標に向かってシステムをいくつか開発・実験し、いろいろ学んできた。本章では、これらの実験を簡単に振り返ってみる。

2. 1. 実験1：仮想時間・実空間ボリューム視覚化システム

まず、我々は、ボリュームレンダリングによる3次元視覚化をシースルーHMD表示で実現しようと試みた(1992年夏)[Ohbuchi92]。我々は、6自由度でトラックした2次元超音波断層像をオフラインで3次元データに再構築し、これを実験0で使われたシースルーHMDシステムを使って仮想時間・実空間でボリュームレンダリング表示してみた。ここで「仮想時間」と言っているのは入力が入力がオフラインで処理されるためである。本システムのハードウェア構成を図1に示す。ボリュームレンダラとしては、Pixel-Planes 5 [Fuchs89] 上で開発された並列ボリュームレンダラ VOL2 [Yoo92] を用いた。

成人男性の右大腿部の超音波断層像を図2に、このような画像を再構築し、これをシースルーHMDでボリュームレンダリング表示した結果を図3に示す。大腿の走査に5-10分程度、オフラインの再構築に数分かかった。大腿の走査に時間がかかったのは、超音波画像をデジタル化しディスクに書き込むのに時間を要したためである。ボリュームレンダリングは視点変更中低解像度時のイメージ生成速度が8-10フレーム/秒である。(解像度は、視点が固定されると自動的に高くなる。)

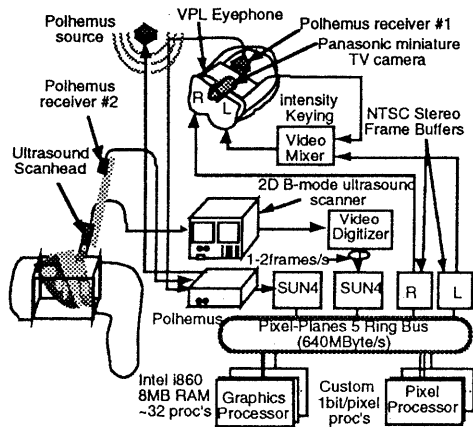


図1. 仮想時間・実空間ボリューム表示システムのシースルーHMDハードウェア構成。

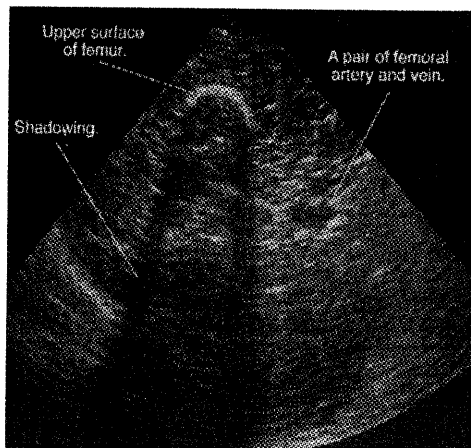


図2. 成人男子右大腿部の超音波断層像。大腿骨の上面(上左)およびその影と、大腿動脈/静脈のペア(右下)が見える。



図3. シースルーHMDに送るビデオ信号。大腿骨の像の手前に大腿動脈/静脈のペアの像(矢印)が認められる。

この実験の結果、主観的な観察結果ではあるが次のようなことが言えた(詳しくは[Ohbuchi94]を参照)。

- 1) HMDは3次元再構築・視覚化した3D超音波データの表示に効果的と思われる: HMDを使ったボリュームレンダリングによる視覚化は、3次元データ中の3次元物体たち(例えば大腿骨と大腿動脈)の関係の理解を助ける。この効果は主に head-motion parallax によると思われる。従ってシースルーHMDの場合でも成立する。

2) シースルーHMDを使った実空間表示は、医療用3次元超音波像の表示に効果的と思われる：シースルーHMDを使った実空間表示は超音波データ中の3Dオブジェクト（例えば、大腿動脈）と実画像中の実世界のオブジェクト（例えば大腿）の関係の理解を助ける。

しかし、これら好材料に加え、数々の深刻な問題点も明らかになった。これら問題点の多くは実験0と同じだが、新たに、ボリュームレンダリングの画質の低さや、ビデオカメラとHMDの光学系による画像の歪みによる実画像と仮想画像のずれなどが加わった。

2. 2. 実験2：実時間・実空間ボリューム視覚化システム

次に我々が開発・実験したのは、実時間で2次元超音波画像を取り込み、直ちに3次元データに再構築し、これをシースルーHMDの視点に合わせてボリュームレンダリングし、実空間で表示するシステムである。ハードウェア構成は図1とほぼ同様だが、HMDやトラックなどは新しくなった。大きく変わったのはソフトウェアで、実験1ではオフラインだった3次元データ再構築アルゴリズムがオンラインになった。つまり、Pixel-Planes 5 上で再構築アルゴリズムとVol2とが非同期・並列に実行された。

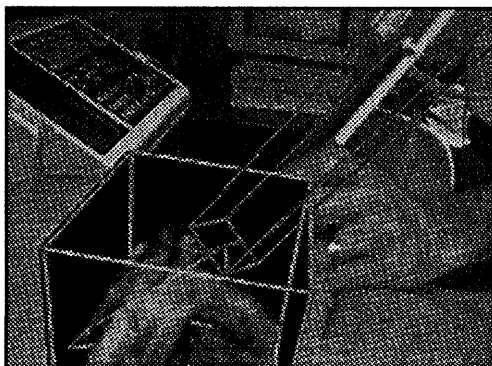


図4. 実時間で画像を取り入れ、再構成、視覚化し、実時間・実空間で表示するシステムで生成された画像。

我々は、1993年1月、妊娠末期の被験者と産婦人科医師の協力を得て実験を行った。図4はシースルーHMDに送られるビデオ信号を記録したものである。黒い立方体は再構築ボリュームを示している。立方体中の雲のようなものが再構築・視覚化された超音波画像である。画像によっては胎児を思わせるものがあったが、子供が見て「赤ちゃんだ！」とわかるにはとても至らなかった。この実験の結果、我々はシステムの処理能力および機能が決定的に不足していることを痛感した。主な問題点としては以下があげられる。

- 1) 超音波画像の取り込み速度が3フレーム/秒と遅く、時間的かつ空間的にサンプリング不足になった。このため胎児の細かい特徴が捕えられなかった。
- 2) 仮想画像内の物体間の位置合わせ精度、および仮想画像と実画像間の位置合わせ精度が動的および静的に低かった。
- 3) 再構築が遅かった。粗い再構築（サイズは 100^3 Voxels）にもかかわらず、入力2次元フレーム1枚の再構築に1秒近くかかった。
- 4) ボリュームレンダリング画像の質が低かった。10フレーム/秒を実現するため、Vol2の持つadaptive refinementを使用した。この結果、視点変更中には高々 65×81 ピクセルでレンダリングし、これを補間して 640×480 pixelのイメージを生成した。
- 5) ビデオカメラの光学系の歪が十分に補正されていないかった。

3. 実験3：仮想時間・実空間ボリューム視覚化システム

実験2の反省をふまえて、我々は次の実験3を計画した。1994年1月に行った実験3の目的は「もし実時間処理の必要上生じる多量の計算が十分高速に処理できたとすると、視覚化の結果はどのようになるのだろうか？」という問

いに答えることである。したがって、最も手間のかかる処理、たとえば3次元データの再構築やレンダリング等がオフラインで行われるよう計画した。また、仮想画像と実画像の位置合わせ精度を向上させる努力もした。

仮想時間・実空間合成画像生成の手順は次のようになる。

1) 較正：静的な位置合わせの向上には、電子光学トラッカの採用に加え、較正手法の改善で対応した。

a) 超音波画像ピクセルから世界座標への変換の較正。計算機制御した2次元アームの先に超音波プローブを付けて動かしつつ水槽中の4mm径のビーズ玉の画像を取得し、超音波画像ピクセルの3次元サンプル関数の位置と形を測定した。(図6)

b) シースルー用ビデオカメラの光学系の較正。格子パターンを撮像し視野角と歪を測定した。歪は光軸対称と仮定して5次多項式で近似し、これに従ってピクセルごとに ray-casting の光線の変えてレンダリング結果を歪ませた。図7は補正後の参照格子の仮想画像と実画像の合成画像である。

2) 画像および位置情報取得：トラッキングには電子光学トラッカ [Wang, 1990 #55] を使い、[Gottschalk, 1993 #389] の方法で較正した。録画はソニーD2デジタルVTRをUNIXワークステーションからオンラインで制御して行った。後に各画像と位置情報が関係付けられるよう、位置情報にVTRのタイムコードを付けた。

a) 2次元超音波画像と超音波プローブ位置情報の取得。図8は医師が電子光学トラッカの付いた超音波プローブを操作しているところである。

b) シースルーHMD着用者の視点からのビデオカメラ画像と、シースルーHMDの位置情報の取得。図9では、シースルーHMD着用者が実画像のみに頼って(胎児の画像が見えるであ

ろう位置を想像して)被験者の腹を見ている。

3) 実空間画像生成：シースルーHMD着用者の視点から見た実空間融合画像を生成する。

a) ノイズを減らすため、位置情報に non-causal、位相遅れなしのローパスフィルタをかけた。(遮断周波数はHMDで6Hz、超音波プローブで1Hz。)

b) 3次元超音波画像データを再構築した。図10の画像では、455枚の超音波画像から大きさ165x165x150Voxels (8.2Voxels/cm) のデータを再構築した。

c) 再構築したデータを人手で編集し、胎盤など胎児を隠す部分を取り除いた。

d) 記録されたHMDの視点から仮想画像を生成する。これにはVOL2にポリゴンレンダリング機能を追加したものを用いた。ここで、胎児の画像を母親の体内に見せるため、腹にポリゴンで仮想の「穴」を作り、この中に胎児の画像を置いた。この穴の入り口の形状はあらかじめ測定した腹の表面形状に合わせた。

e) 実画像(HMDのカメラでとったもの)と仮想画像(HMDの視点からレンダリングしたもの)を合成した。これはSonyのビデオミキサのクロマキー機能を使った。

こうして生成した仮想時間・実空間合成画像が図10である。

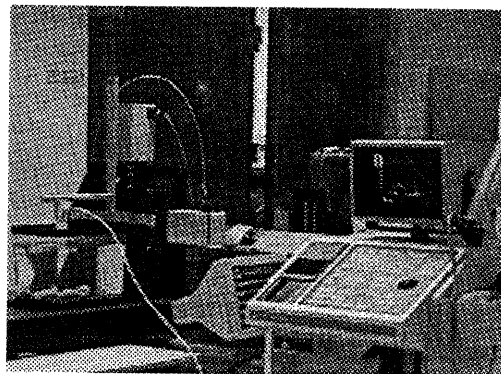


図6. 超音波断層像装置の3次元サンプル関数を測定する装置。

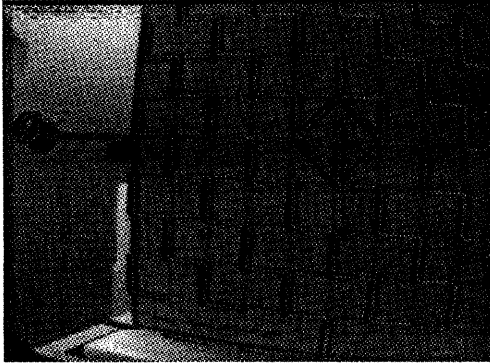


図7. ビデオカメラ光学系の歪および視野角の較正後、実画像と仮想画像を重ねたもの。どちらも同じように歪んでいる。



図10. 実画像と仮想画像を合成した最終結果。胎児が中にあるように見せかけるため、ポリゴンで穴を掘った。

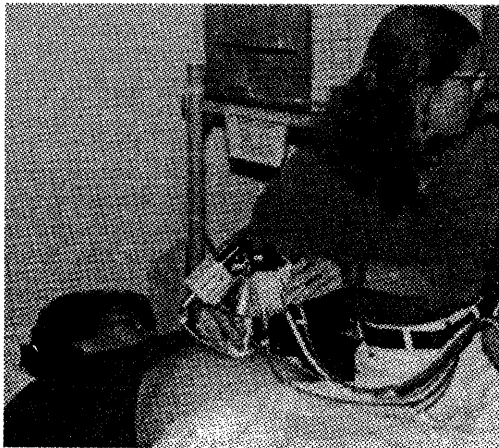


図8. 医師が被験者を走査している。プローブのトラッキングには電子光学トラッカを用いた。

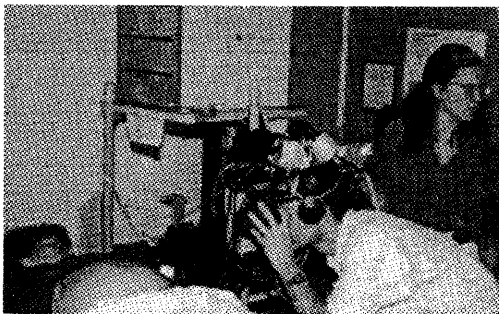


図9. シースルーHMDの視点からの実画像を録画し、この時、やはり電子光学トラッカを用いてHMDの位置情報を測定し記録する。

4. まとめと考察

本実験の結果、十分な計算能力と記憶容量さえあれば、われわれの目指すような視覚化の質は明らかに向上することがわかった。

過去の実験と比べると、動的位置合わせ精度（つまりHMDやプローブが動いている場合の位置決め精度）が格段に向上した。これはオフライン処理によってシステム遅れの影響を回避したこと、また位置情報のノイズをローパスフィルタしたことによると思われる。もちろん静的位置決め精度も良くなっているが、これには各種の較正の改善が大きく寄与している。また、仮想画像の質も、時間をかけることで大きく改善された。これらの改善により、全体として、表示がずいぶん実空間らしくなった。

さて、実時間・実空間の視覚化を実現を目指して何をしたら良いだろう？筆者が最も重要と考えるのは、システムに内在する各種の遅れの削減である。今までのインタラクティブ・グラフィクスでは、スループット（例えばフレームレート）を上げることを目指してきた。しかし、実時間・実空間表示のためのハードウェア・ソフトウェアでは、高スループットに加えて短い遅れを目指すことが重要だろう。また、加速度計を使った予測トラッキングなどの技法により

[Azuma94]、見かけ上の遅れを減らす努力も重要と考える。

もう一つ重要なのは、人間の視覚その他知覚の特性を学び、これに基づいた視覚化、表示法を考えることだろう。たとえば、不透明な物体の中を覗くためのより「自然」なメタフォが欲しい。しかし人間は本来不透明な物体の中を覗く能力を持ち合わせていないため、真似の対象となる「自然」なメタフォは無い。物体の隠蔽による3次元cueは両眼ステレオ視等に比べても強い [Arthur93] ので、これに逆らわない「中を覗く」メタフォを考える必要がある。また、システム遅れをゼロにすることはタイムマシンでもない限り不可能である。したがって、有限の遅れが存在しても有効に動作するシステムを作るため、人間の「遅れ」に対する反応をもっと研究するべきである。

参考文献

- [Arthur, 93] Arthur, K. W., Booth, K.S., and Ware, C. "Evaluating 3D Task Performance for Fish Tank Virtual Reality." ACM TOIS. 11(3): 239-265.
- [Azuma, 94] Azuma, R., and Bishop, G. "Improving Static and Dynamic Registration in an Optical See-through HMD." To appear Proc. SIGGRAPH'94. 27(3):
- [Bajura, 92] Bajura, M., Fuchs, H., and Ohbuchi, R. "Merging Virtual Object with the Real World: Seeing Ultrasound Imagery within the Patient." Proc. SIGGRAPH' 92. 26(2): 203-210.
- [Dave, 94] Dave, S. "New realities in Aircraft Design and Manufacture." IEEE CG&A. 14(2): 91.
- [Deering, 1992] Deering, M. "High Resolution Virtual Reality." Proc. SIGGRAPH' 92. 26(2): 195-201.
- [Edwards, 93] Edwards, E. K., Rolland, J.P., and Keller, K.P. "Video See-through Design for Merging of Real and Virtual Environments." IEEE VRAIS'93.
- [Feiner, 93] Feiner, S., MacIntyre, B., and Seligmann, D. "Knowledge-based augmented reality." CACM. 36(7): 52-62.
- [Ganapathy, 92] Ganapathy, U., and Kaufman, A. "3D acquisition and visualization of ultrasound data." VBC'92. Chapel Hill, NC, 1808: 535-545.
- [Gottschalk, 93] Gottschalk, S. "Autocalibration for Virtual Environment Tracking Hardware." Proc. SIGGRAPH' 93. 27: 65-72.
- [Holmgren, 92] Holmgren, D. E. Design and Construction of a 30-Degree See-Through Head-Mounted Display. UNC Chapel Hill Dept. of Computer Science technical report, TR92-030
- [Lalouche, 89] Lalouche, R. C., Bickmore, D., Tessler, F., Mankovich, H.K., and Kangaraloo, H. "Three-dimensional reconstruction of ultrasound images." SPIE' 89, Medical Imaging. 59-66.
- [McCann, 88] McCann, H. A., Sharp, J.S., Kinter, T.M., McEwan, C.N., Barillot, C., and Greenleaf, J.F. "Multidimensional Ultrasonic Imaging for Cardiology." Proc.IEEE. 76(9): 1063-1073.
- [Ohbuchi, 92] Ohbuchi, R., Chen, D., and Fuchs, H. "Incremental volume reconstruction and rendering for 3D ultrasound imaging." VBC'92. Chapel Hill, NC, 1808: 312-323.
- [Ohbuchi, 94] Ohbuchi, R. Incremental Acquisition and Visualization of 3D Ultrasound Images. Doctoral dissertation, UNC-Chapel Hill, Department of Computer Science.
- [Pini, 90] Pini, R., Monnini, E., Masotti, L., Novins, K. L., Greenberg, D. P., Greppi, B., Cerofolini, M., and Devereux, R. B. "Echocardiographic Three-Dimensional Visualization of the Heart." 3D Imaging in Medicine. Travemunde, Germany, F 60: 263-274.
- [Smith, 91] Smith, S. W., Pavy, Jr., S.G., and von Ramm, O.T. "High-Speed Ultrasound Volumetric Imaging System - Part I: Transducer Design and Beam Steering." IEEE Trans. Ultrason. Ferr. and Freq. Cont. 38(2): 100-108.
- [Sutherland, 68] Sutherland, I. E. "A head-mounted three-dimensional display." 1968 Fall Joint Computer Conference. 33: 757-764.
- [Taylor, 93] Taylor, R. M., Robinett, W., Chi, V.L., Brooks, F.P., Wright, W.V., Williams, R.S., and Snyder, E.J. "The Nanomanipulator: A Virtual-Reality Interface for a Scanning Tunneling Microscope." Proc. SIGGRAPH'93. 128-134.
- [Tomographic Technologies, 93] Tomographic Technologies, G. 4D Tomographic Ultrasound, A clinical study. Product Brochure,
- [Wang, 90] Wang, J., Chi, V., and Fuchs, H. "A Real-Time Optical 3D Tracker for Head-Mounted Display System." Computer Graphics (Proc 1990 Symposium on Interactive 3D Graphics). 24(2): 205-215.
- [Watkin, 93] Watkin, K. L., Baer, L.H., Mathur, S., Jones, R., Hakim, S., Diouf, I., Nuwayhid, B., and Khalife, S. "Three-dimensional Reconstruction and Enhancement of Arbitrary Oriented and Positioned 2D Medical Ultrasonic Images."
- [Yoo, 92] Yoo, T. S., Neumann, U., Fuchs, H., Pizer, S.M., Cullip, T., Rhoades, J., and Whitaker, R. "Direct Visualization of Volume Data." IEEE CG&A. 12(6): 63-71.