(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号
特許第3672917号
(P3672917)
(45)発行日　平成17年7月20日(2005.7.20)　(24)登録日　平成17年4月28日(2005.4.28)

(51)Int.Cl.[7]　F I
C08L 33/14　C08L 33/14
B29C 67/00　B29C 67/00
// B29K 33:04　B29K 33:04

請求項の数 3　(全 24 頁)

(21)出願番号　特願2004-197661(P2004-197661)
(22)出願日　平成16年7月5日(2004.7.5)
(62)分割の表示　特願2002-189286(P2002-189286)の分割
原出願日　平成2年4月20日(1990.4.20)
(65)公開番号　特開2004-314640(P2004-314640A)
(43)公開日　平成16年11月11日(2004.11.11)
審査請求日　平成16年8月3日(2004.8.3)
(31)優先権主張番号　341517
(32)優先日　平成1年4月21日(1989.4.21)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　503405689
ナブテスコ株式会社
東京都港区海岸一丁目９番１８号
(74)代理人　100072604
弁理士　有我　軍一郎
(72)発明者　ジョン・アラン・ロートン
アメリカ合衆国ペンシルベニア州（１９３５０）ランデンバーグ．オーバーンロード．アール・ディー・ナンバー　２．ボックス２８０

審査官　大島　祥吾

(56)参考文献　特開昭６２－２８８４４４（ＪＰ，Ａ）

最終頁に続く

(54)【発明の名称】立体像形成のための光硬化性組成物ならびにそれを用いる立体像形成方法および装置

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有し、前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーとして分子量が少なくとも３００のエチレン性不飽和化合物を含む立体像形成のための液状光硬化性組成物であって、前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーが、ビスフェノールＡビス（２－ヒドロキシプロピル）ジアクリレートであることを特徴とする立体像形成用の光硬化性組成物。

【請求項２】

少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有する液状光硬化性組成物であって、かつ前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーが少なくとも３００の分子量を有するアクリレート化合物の少なくとも１種を含む光硬化性組成物の層を形成し、この層を一層ずつ露光させて三次元剛性物体を製造するに際し、露光のためのレーザ・ビームの出力をパルス状にし、該レーザ・ビームの移動速度にあわせて照射エネルギを制御し、硬化深度を均一にすることを特徴とする立体像形成方法。

【請求項３】

少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有する液状光硬化性組成物であって、かつ前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーが少なくとも３００の分子量を有するアクリレート化合物の少なくとも１種を含む光硬化性組成物の層を形成する手段と、この層を一層ずつ露光させる手段を備えた立体像形成装置であって、露光のためのレーザ・ビームの出力をパルス状にする手段と該レーザ・ビ

ームの移動速度にあわせて照射エネルギを制御して硬化深度を均一にする手段とを有することを特徴とする立体像形成装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は光硬化による三次元物体の造形に関する。さらに詳しくは、比較的高い出力のビーム放射源（例えば、高出力レーザ）を用いて比較的高い速度、精度で三次元物体（立体像）を形成する光硬化性組成物ならびにそれを用いる立体像形成方法および装置に関する。

【背景技術】

【０００２】

光硬化によって三次元モデルを製造する技術は種々提案されている。Ｓｃｉｔｅｘ社のヨーロッパ特許出願公開第0250121号に対応する特開昭63－72526号公報（特許文献１)では、この技術分野に関するHull、Kodama、Herbert による種々の方法を記載した文献について要領良く要約している。付加的な背景技術としては、1988年6月21日にFudim に特許された米国特許第 4,752,498号（特許文献２）に記載されているものがある。

これらの方法は固化させようとしている領域あるいは体積を順次に照射することによって段階的に三次元物体の立体領域を形成することに関する。種々のマスキング技術の他に、直接レーザ描画法、すなわち、光硬化性組成物を所望のパターンに従ってレーザ・ビームで照射し、三次元モデルを一層ずつ重ねて行く方法も記載されている。

【特許文献１】特開昭63-72526号公報

【特許文献２】米国特許第4,752,498号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００３】

しかしながら、これらの方法では、段階的に三次元物体の立体領域を形成するに適した光硬化組成物については何も教示していない。またベクトル走査の利点を露光状態を一定に保ち剛性の三次元物体の本体部を通じて各層毎のすべての硬化部分の最終厚さをほぼ一定にする手段と組合わせて利用する実用的な方法を認識していない。さらに、従来方法は、方法・装置のパラメータを制御して実用的かつ有用に利用する特定の操作範囲内の重要な相互関係も認識していない。このような操作範囲としては、材料の光硬化応答性に依存した一定露光レベルの範囲、光硬化の解像度、深さに依存する最大加速度でのビームの最短移動距離の範囲ならびに光硬化性組成物の感度に依存する最大ビーム強さの範囲がある。

【０００４】

例えば、前記Ｓｃｉｔｅｘ特許は、均一な露光を達成するためにホトマスクあるいはラスタ走査を使用することを示唆しているが、ベクトル走査の場合に露光を一定に保つための手段は示唆していない。ホトマスクを使用すると、時間、費用が過剰にかかるし、ラスタ走査も以下に示す多数の理由のためにベクトル走査に比して望ましいものではない。すなわち、ラスタ走査では、製作しようとしている物体が全体積のほんの小さな部分である場合でも全域を走査する必要がある、たいていの場合に記憶すべきデータ量がかなり大きくなる、記憶したデータの取り扱いが全体として難しい、CAD ベースのベクトル・データをラスタ・データに変換する必要がある、などの問題が残されている。

【０００５】

一方、ベクトル走査の場合には、剛性物体の形状に対応する領域のみを走査すればよく、記憶すべきデータ量が少ない程、データの取り扱いがより容易になり、「CAD ベース機の90％を超える機種がベクトル・データを発生、利用している」(「Lasers & Optronics」1989年１月号、第８巻第１号第56頁参照）。レーザ・ベクトル走査がこれまで広く利用されてこなかった主たる理由は、その利点もさることながら、レーザのような現在のたいていの放射線源のために利用できる偏向システムの光学部材、例えば、ミラーの慣性に関

する問題を内包しているということである。このような偏向システムは、その性質上電気機械式であるから、いかなるビーム速度を達成する際にもそれに伴う加速度には限界がある。速度の不均一性は避けることができないので露光した光硬化性組成物は許容できない厚みのバラツキが生じる。特に、高強度での露光が直前に行われていない層部分の場合には、高いビーム速度を使用する必要があり、したがって、良い加速時間が必要となり、これがまた露光組成物の不均一な厚さの原因となる。低強度のレーザを使用する場合には、立体物体の造形に過剰な時間がかかるので、良い結果が得られない。さらに、本発明について以下の説明で明らかにするような光硬化性組成物の少なくとも前述の深さ、露光レベルの関係が維持されないかぎりベクトル走査の有用性はさらに低下する。

【０００６】

したがって、本発明の主たる目的は、精密に制御された深さ、解像度の三次元モデル層を順次に走査し、形成することによって露光されていない光硬化性組成物上にベクトル・モードで直接レーザ描画を行う方法で使用するのに好適な光硬化組成物を提供することにある。本発明のさらなる目的は、この光硬化性組成物を用いる立体造形方法および装置を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【０００７】

本発明によれば、上述の方法で使用するに適した組成物として、下記の光硬化組成物が提供される。すなわち、本発明に係る組成物は、少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有し、前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーとして分子量が少なくとも３００のエチレン性不飽和化合物を含む立体像形成のための液状光硬化性組成物であって、前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーが、ビスフェノールＡビス（２－ヒドロキシプロピル）ジアクリレートであることを特徴とする立体像形成用の光硬化性組成物である。

【０００８】

また、本発明の立体像形成方法は、少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有する液状光硬化性組成物であって、かつ前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーが少なくとも３００の分子量を有するアクリレート化合物の少なくとも１種（例えば、ビスフェノールＡビス（２－ヒドロキシプロピル）ジアクリレート）を含む光硬化性組成物の層を形成し、この層を一層ずつ露光させて三次元剛性物体を製造するに際し、露光のためのレーザ・ビームの出力をパルス状にし、該レーザ・ビームの移動速度にあわせて照射エネルギを制御し、硬化深度を均一にすることを特徴とする立体像形成方法である。

さらに、本発明の装置は、少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有する液状光硬化性組成物であって、かつ前記光硬化性モノマーまたはオリゴマーが少なくとも３００の分子量を有するアクリレート化合物の少なくとも１種（例えば、ビスフェノールＡビス（２－ヒドロキシプロピル）ジアクリレート）を含む光硬化性組成物の層を形成する手段と、この層を一層ずつ露光させる手段を備えた立体像形成装置であって、露光のためのレーザ・ビームの出力をパルス状にする手段と該レーザ・ビームの移動速度にあわせて照射エネルギを制御して硬化深度を均一にする手段とを有することを特徴とする立体像形成装置である。

【０００９】

本発明において、立体像形成のための光硬化性組成物は少なくとも１種の光硬化性モノマーまたはオリゴマーおよび少なくとも１種の光重合開始剤を含有すべきである。本発明の目的にとってモノマーおよびオリゴマーという用語は実質的に同等であり、それらは交換可能に使用され得る。

本発明者の研究によれば、前記モノマーとして、分子量が少なくとも３００であるエチレン系不飽和化合物が好ましいことが分かった。

【００１０】

上記エチレン系不飽和化合物のなかでも、ビスフェノールＡビス（２－ヒドロキシプロ

ピル）ジアクリレートを含むモノマーは、反応性に富みかつその化学構造から明らかなように分子量に対する二重結合の割合が小さく成形時の収縮が少ないことにより、精度の良い三次元立体像を高速で形成できるので、特に好適である。

【００１１】

上記の特に好適なモノマーは、他のモノマーと組み合わせて使用することもできる。上記モノマーと組み合わせて使用できる他のモノマーとしては、例えば、炭素数２～１５のアルキレングリコールから製造されたジアクリレートまたは１～１０のエーテル結合を含むアルキレンエーテル残基を有するジアクリレート化合物、例えば、ポリオキシエチル化トリメチロールプロパントリアクリレート、ジペンタエリスルトールモノヒドロキシペンタアクリレート、ビスフェノール－Ａのジ（３－アクリルオキシ－２－ヒドロキシプロピル）エーテル、ビスフェノールＡのジ－（２－アクリルオキシエチル）エーテルおよびポリオキシプロピルトリメチロールプロバントリアクリレートから選ばれた少なくとも１種の化合物、ｔ－ブチルアクリレート、ｔ－ブチルメタクリレート、１，５－ペンタンジオールジアクリレートおよびジメタクリレート、Ｎ，Ｎ－ジエチルアミノエチルアクリレートおよびメタクリレート、エチレングリコールジアクリレートおよびジメタクリレート、１，４－ブタンジオールジアクリレートおよびジメタクリレート、ジエチレングリコールジアクリレートおよびジメタクリレート、ヘキサメチレングリコールジアクリレートおよびジメタクリレート、１，３－プロパンジオールジアクリレートおよびジメタクリレート、デカメチレングリコールアクリレートおよびジメタクリレート、１，４－シクロヘキサンジオールジアクリレートおよびジメタクリレート、２，２－ジメチロールプロパンジアクリレートおよびジメタクリレート、グリセロールジアクリレートおよびジメタクリレート、トリプロピレングリコールジアクリレートおよびジメタクリレート、グリセロールトリアクリレートおよびトリメタクリレート、トリメチロールプロパントリアクリレートおよびトリメタクリレート、ペンタエリスリトールトリアクリレートおよびトリメタクリレート、ボリオキシエチル化トリメチロールプロパントリアクリレートおよびトリメタクリレートおよび米国特許第３，３８０，８３１号に開示されたような同様の化合物、２，２－ジ（ヒドロキシフエニル）－プロバンジアクリレート、ペンタエリスリトールテトラアクリレートおよびテトラメタクリレート、２，２－ジ（Ｐ－ヒドロキシフエニル）プロバンジメタクリレート、トリエチレングリコールジアクリレート、ポリオキシエチル－２，２－ジ（ｐ－ヒドロキシフエニル）プロバンジメタクリレート、ビスフェノール－Ａのジ－（３－メタクリルオキシ－２－ヒドロキシプロピル）エーテル、ビスフェノール－Ａのジ－（２－メタクリルオキシエチル）エーテル、ビスフェノール－Ａのジ－（３－アクリルオキシ－２－ヒドロキシプロピル）エーテル、ビスフェノール－Ａのジ－（２－アクリルオキシエチル）エーテル、１，４－ブタンジオールのジ－（３－メタクリルオキシ－２－ヒドロキシプロピル）エーテル、トリエチレングリコールジメタクリレート、ポリオキシプロピルトリメチロールプロバントリアクリレート、ブチレングリコールジアクリレートおよびジメタクリレート、１，２，４－ブタントリオールトリアクリレートおよびトリメタクリレート、２，２，４－トリメチル－１，３－ペンタンジオールジアクリレートおよびジメタクリレート、１－フエニルエチレン－１，２－ジメタクリレート、さらには、トリエチレングリコールカプレート－カプリレート、ジアリルフマレート、スチレン、１，４－ベンゼンジオールジメタクリレート、１，４－ジイソプロペニルベンゼンおよび１，３，５－トリイソプロペニルベンゼン等が挙げられる。

【００１２】

本発明において上記モノマーとともに使用される有用な光重合開始剤は、米国特許第2,760,863号に示されており、ビシナルケトアルドニルアルコール例えばベンソイン、ピバロイン；アクロインエーテル例えばベンゾインメチルおよびエチルエーテル、ベンジルジメチルケタール；α－メチルベンゾイン、α－アリルベンゾインおよびα‐フエニルベンゾインなどのα－炭化水素置換芳香族アシロインが含まれる。

【００１３】

かかる光重合開始剤としては米国特許第2,850,445号、同第 2,875,047号、同第3,097,0

96号、同第3,074,974号、同第3,097,097号および同第3,145,104号に開示されている光還元性染料および還元剤、ならびにフエナジン、オキサジン、キノン群の染料、Michler のケトン、ベンゾフエノン、アクリルオキシベンゾフエノン、ロイコ染料を含む水素ドナーを有する2,4,5 －トリフエニルイミダゾリルダイマーおよび米国特許第3,427,161号、同第3,479,185号および同第 3,549,367号に開示されているようなその混合物も使用できる。また有用な光重合開始剤としては米国特許第4,162,162号に開示されているような増感剤である。

【００１４】

熱的に不活性であるが 185℃以下で活性光線に露光すると有利基を生成する適当な他の光重合開始系としては共役した炭素環系内に二つの環内炭素原子を有する化合物である置換されたまたは置換されていない多核キノン例えば9,10－アントラキノン、２－メチルアントラキノン、２－エチルアントラキノン、２－ｔ－ブチルアントラキノン、オクタメチルアントラキノン、1,4 －ナフトキノン、9,10－フエンナントラキノン、ベンズアントラセン－7,12－ジオン、2,3 －ナフタセン－5,12－ジオン、２－メチル－1,4 －ナフトキノン、1,4 －ジメチル－アントラキノン、2,3 －ジメチルアントラキノン、２－フエニルアントラキノン、2,3 －ジフエニルアントラキノン、レテネキノン、7,8,9,10－テトラヒドロナフタセン－5,12－ジオンおよび1,2,3,4 －テトラヒドロベンズアントラセン－7,12－ジオンが挙げられる。前記の光重合開始剤または光重合開始剤系は光硬化性組成物の全重量の0.05～10重量％で存在する。

【００１５】

光硬化の好ましいメカニズムはラジカル重合であるが光硬化の他のメカニズムの適用も本発明の範囲内にある。ここで言う他のメカニズムとしては、カチオン重合、アニオン重合、縮合重合、付加重合などが挙げられるが、これに限定されるわけではない。

また、光硬化性組成物には、必要に応じ、重合に関与しない物資、例えばコア・シェルポリマーを、フィラーとして配合することもできる。

【発明の効果】

【００１６】

本発明の光硬化性組成物によれば、放射ビームの移動速度の増減にかかわらず、精度よく三次元剛性物体を造形でき、かつ高速での造形が可能という効果を発揮する。また、本発明の方法および装置は、本発明の光硬化性組成物を用いて高速で精度の良い立体造形物を製造できるという効果を有する。

【発明を実施するための最良の形態】

【００１７】

次に、上述した本発明の光硬化性組成物を使用して三次元立体像を形成する方法の好ましい実施形態について、添付図面により詳しく説明する。

なお、以下の説明では、コンピュータ制御手段をテーブルの位置、移動速度を制御する第１のコンピュータ制御手段と放射ビームの変調、偏向を制御する第２のコンピュータ制御手段に分けた例を示しているが、一つのコンピュータ制御手段でテーブルの位置、移動速度および放射ビームの変調、偏向を制御する実施例も当然考えられる。

本発明の光硬化組成物は、光硬化によって三次元物体を造形する方法に使用するものであり、一層詳しくは、比較的高い速度と精度で直接前記造形を行うべく比較的高出力のレーザを制御しながら使用する際に使用すると有利な組成物であるから、本発明は以下の説明によって何ら限定されるものでないことは言うまでもない。

【００１８】

図１に示す放射線装置10（例えば、レーザ）は放射ビーム12を発生する。本発明の目的が高速で立体的な物体11を造形することにあるので、本発明で使用する放射線装置は高出力レーザのような比較的高出力の放射線装置10が好ましい。この高出力レーザは可視領域、赤外線領域あるいは紫外線領域にある主要帯域を持ち得る。ここで、高出力とは、20mWより大きい出力と考えており、好ましくは、放射ビーム12の強さから測定して 100mWを超える出力である。これは現在の光硬化性組成物の感度に合わせてある。しかしながら、も

っと速い組成物を利用できるようになった場合には、ビーム強さについての20mW、100mWの値はそれに応じて低くなることになる。これは組成物の感度と放射ビームの強さが同じ結果を得るには互いに反比例の関係を持つからである。或る種のレーザの選択は、光硬化性組成物の感度がレーザ放射線の波長をうまく一致するように光硬化性組成物の選択と一緒に考えなければならない。他の種類の放射線装置も、そのエネルギ形式から光硬化性組成物の感度と一致し、ビームが発生し、取り扱いについて最適な状態が周知の確立した方法によって観察されるかぎり、利用できる。例えば、電子ビーム、Ｘ線等も利用できる。ビーム横断面形状を任意所望の形状に偏向する手段を設けてもよいが、普通の形状としては円形であり、ビームの強さの分布はガウス分布であり、最高点は円形の中心にある。

【００１９】

放射ビーム12は変調器14を通り、この変調器は音響光学変調器であると好ましい。変調された放射ビーム12′は、次に偏向手段16を通る。この偏向手段は２つのミラー20、22を包含し、各ミラーはＸ方向、Ｙ方向において像形成面46に対してビームを反射させ得る軸（図示せず）を有する。ここで、Ｘ方向、Ｙ方向とは互いに直角でありかつ像形成面46に対して平行である。ミラー20、22はモータ24、26によってそれぞれ対応する軸線まわりに回転して、それぞれ、Ｘ、Ｙ方向において容器44に入っている液状光硬化性組成物40の所定の位置に向かってベクトル走査モードでビームを制御しながら偏向させるようになっている。適当な光硬化性組成物の例は後に示す。ビームが偏向手段16によって偏向されると、このビームはゼロ・レベルから最高値までの加速度と、ゼロ・レベルから最高の一定値までの速度を持つ。ビームの速度および強さは、互いに比例したままであり、その結果、露光がほぼ一定に留まる。ビームはほぼ一定の光硬化深度まで組成物の所定部分の光硬化を生じさせる。光硬化深度は、走査方向に対して直角の横断面で測って、像形成面46と光硬化した薄い層の対向側面の間の最大厚さすなわちピーク厚さとして定義される。後に説明するように、各個々の光硬化層あるいはその一部の厚さは或る走査線上のポイント毎に異なる可能性がある。したがって、混乱を避けるべく、ここで言う光硬化厚さとは前記層の任意のポイントでの厚さのことであり、硬化深度は上記の定義に限定する。容器44内には、可動テーブル41とエレベータ・モータ42のような設定手段が設けてあり、このエレベータ・モータは可動テーブル41に動きを与えて容器44内で可動テーブルの位置を精密に制御するようになっている。可動テーブル41の動きは並進運動、回転運動、無作為運動あるいはそれらの組合わせのいずれであってもよい。ドクターナイフ43のような層形成手段が容器44内で可動テーブル41の上方に設置してあり、これは液状光硬化性組成物の重なった薄い層を形成する。また、第１コンピュータ制御手段30と第２コンピュータ制御手段34も設けてある。第１コンピュータ制御手段30は、制御／フィードバック・ライン52、60、62、58のそれぞれを介入して放射線装置10、設定手段42、層形成手段としてのドクターナイフ43および第２コンピュータ制御手段34と接続している。第２コンピュータ制御手段34は、フィードバック・ライン58を介しての第１コンピュータ制御手段30との接続に加えて、制御／フィードバック・ライン50、54のそれぞれを介入して変調器14と偏向手段16にも接続している。存在の明らかな補助的な装置類は簡略化のために示していない。

【００２０】

上述したように、一定の露光を得るように放射ビームを変調することはアナログ方式でもディジタル方式でも行うことができる。Greyhawk Systems, Inc.の製造する市販のシステム（Greyhawk Systems, Inc., 1557 Center Point Drive,Milpitas, CA 95035）を後述のように改造して露光レベルを一定値に制御する第２コンピュータ制御手段34の一部として使用してもよい。Greyhawkのシステムはモータ24、26の軸に取り付けたエンコーダ（図示せず）の発生したパルス信号を、像空間の存在および所望露光量を考慮してディジタル式に処理し、レーザを直接変調する電気パルス信号に変換する。これらのエンコーダは軸の回転を示し、したがって、像形成面46におけるミラーから反射してきたレーザ・ビームの対応する動きを示す。効果的には、レーザはビームが像平面で動いた個々の距離に対応させてディジタル式に変調する。

【００２１】

レーザの変調にはレーザが１パルスあたり或る特定の時間枠にわたってオン状態にあることが必要なので、像平面でレーザ・ビームが動いた距離あたりのかなり均一な露光が得られる。

【００２２】

非固体素子のレーザの直接的なディジタル変調は、このようなレーザが立体像形成にとって有用なほど高い率でディジタル式に変調され得ないために、現在のところ非実用的である。これらのレーザは連続的にしか作動できない。パルス状に作動する場合、パルス反復率あるいはパルス時間幅またはこれら両方がGreyhawkのシステムの電子機器の発生する変調信号に追従できないからである。この場合、像平面に不均一な露光が生じる。非固体素子レーザのビームをGreyhawkのシステムで要求される高い率で変調するには、固体素子レーザを作動するのに適した電気信号を徹底的に修正して連続波（CW）レーザのビーム経路にある光硬化スイッチを作動させなければならない。光スイッチならびにそこで用いられる変調用電子機器は電気変調信号に追従できなければならないし、「オン状態」で適切な伝送効率を持っていて像形成面46で必要とされる有用なビーム・エネルギを与えなければならない。このような光スイッチ類はアナログ式でもディジタル式でもよいが、最もこの好ましいタイプは音響光学式である。

【００２３】

ここで使用され得る他のスイッチ類の例としては次のものが挙げられる。

まず、電気光学式スイッチであり、これは電圧を印加したときに光学的極性を変える結晶を基礎とするものである。

【００２４】

次に、液晶ゲートであり、可視領域で用いられるものであり、ビーム・ゲートと呼ばれる、Meadowalk Optics(7460 East County Line Road, Longmont, Colorado 80501)製のものがある。これも液晶物質の偏光状態の変化を基礎とする。また、ダイアフラムを動かすことのできる圧電セルもあり、例えば、小ピンホールである。

【００２５】

最後に、偏光状態に依存するいわゆるPLZT(Pb0.9、La0.1 、Zr0.65、Tio.35) ベースのスイッチである。ここでは、２枚の偏光板が互いに90度で交差する軸線をもって設置してあり、それらの間にPLZTフェロエレクトリック結晶が挿入してある。PLZT結晶はそれに電界が与えられているかいないかに依存して通過する光の極性を回転させることができる。現在、オフ位置にあるとすると（すなわち、PLZTが電界を持っていない場合には）、第１の偏光子を通る光はPLZTによって変化せず、第２の偏光子によって阻止される。しかしながら、PLZTが電界の下にある場合には、第１偏光子を通る光はPLZTによって回転させられ、第２偏光子を通過することができる。

【００２６】

この分野では周知のように、実際的な目的のため、より良く理解してもらうため、そして、より良い説明のため、図２にP1、P2、P3、……Pnで示すように、二次元面に位置する像をピクセルと呼ぶ小さな仮想面積単位に分割するのが望ましい。これらのピクセルは通常は正方形であり、Ｘ、Ｙ両方向に同じ寸法を有する。矩形その他の形状の代わりに正方形を選んだ主たる理由は、多くの場合、Ｘ、Ｙ両方向において同じ解像度が得られ、また、それが望ましいからである。同様にして、或る立体像を考えた場合、立体像の体積を図３にV1、V2、V3……Vnで示すようにボクセルと呼ばれる小さな仮想立方体に分割すると良い。上述したと同じ理由で、この立方体は１つのボクセルの好ましい形状であり、したがって、このボクセルはＸ、Ｙ、Ｚのすべての方向において同じ寸法を持つことになる。

【００２７】

本発明方法の製品を走査線間隔、すなわち、光硬化性組成物40の像形成面46上のビーム12″の任意２つの隣り合った走査線（互いにほぼ平行である）の中心間隔に等しい縁寸法を有する立方体ボクセルによって好適に説明される。

【００２８】

二次元像形成技術について簡単な外挿法を使用することによって、立体すなわち三次元

の像形成の動作特性、例えば、走査線の最適間隔を予想できると、普通は考えられよう。しかしながら、それは当っておらず、事態はもっと複雑である。というのは、特に、立体像形成では光硬化深度および厚さのような新しい複雑な変数（二次元像では小さいし、一定値である）が存在し、積極的に関わりを持つからである。光硬化性組成物の表面上の或る線に沿って合焦レーザ・ビームを一回走査した場合（単走査）、単純に考えると、矩形横断面を有する直線立体と受け取られよう。専門家であれば、このような横断面がガウス横断面分布を有する放射ビームから生じるようなガウス形状となると予想するかも知れない。しかしながら、いずれの予想も当っていない。このように形成された直線立体の横断面が予想外にほぼ非ガウス形状であることを本発明者人は発見したのである。

【００２９】

換言すれば、この方法で形成された直線立体をその長さ方向に対して直角に切断した場合、液面で始まる幅が立体の先端付近まで像形成面46から遠くなるにつれてほぼ線形に減少するのである。この横断面特性は走査立体像形成にとっては重要な情報である。なぜならば、通常、層を走査して各横断面薄片領域を部分的に埋めて行くとき、走査は完全な立体面を生じさせるように互いにほぼ平行に隔たった線またはベクトルからなる。各ベクトルの幅が像形成面46から離れるにつれてほぼ線形に減少するという知識があれば、均一な露光ならびに均一な光硬化深度を得るためのベクトル線の適切な間隔を決定することができる。適切な線間隔の場合、各薄層の底における厚さの変化であるリプルが最小限に抑えられ、層のうねり傾向が低減され、部分解像度、公差が保たれ、各層の強度がより大きくなると共に方向による強度の差が小さくなり、層対層の接着性が改善され、走査線の数を最小限に抑えることができる。本実施例で目的とするところは、単走査立体線の横断面がほぼ非ガウス形状となることにある。その理由は、走査中の放射ビームがガウス形エネルギ分布の場合、その立上がり部分が光硬化性組成物の対応した部分を光硬化させる能力に関して無効となるからである。これには多数の原因があり、例えば、次の原因がある。光硬化が生じ得ない領域、この分野では誘導領域として周知の領域内で露光程度が低くなる。

【００３０】

円形ガウスビームの単走査中、移動しているスポットの中心の軌跡に向う部分（このスポットはビームと光硬化性組成物の表面との交差点にある）が、スポットの速度に逆比例して変化するガウス・モードでは、必然的に、この軌跡から遠い部分よりも高い露光を受けることになる。これはビームによって影響を受けるすべての層にもそれ相応に当てはまることになる。ガウス機能とＳ字形の光硬化厚さ対露光関係の組合せ（立体像形成では、深度・露光曲線と定義できる）の１例が実施例１において説明される本発明の好ましい組成物のうちの１つの組成物の作用に関して図４に示してあり、これは単走査線の非ガウス形状を説明している。

【００３１】

光硬化深度ならびに光硬化厚さが光硬化性組成物の性質、ビーム強さおよび直接ビーム入射時刻の関数となるばかりでなく、他のパラメータおよび二次的効果（例えば、走査重複、隣接した部分を照射したときに生じる二次露光等）にも依存するという事実に注目するのも非常に重要である。例えば、１本の走査線の光硬化深度は連続したフイルムを形成する複数本の密接に重なり合った走査線の光硬化深度よりもかなり小さい。同様に、他のすべてが一致に保たれていると仮定すれば、走査線の数が多ければ多いだけ、互いに接近度が大きくなり、それだけ光硬化深度が大きくなる。また、縁が片側だけで隣り合った露光走査線を有するので、全体の露光度が低くなり、正しい段階を踏まないかぎり、光硬化中に中間部分よりも光硬化深度が小さくなる。

【００３２】

上記の現象を原因として、普通の二次元像形成と立体像形成の間には第２の重要な差異（後に詳しく説明する）が現れる。普通の二次元像形成システムで走査線を形成するには、走査線間の距離がガウス強度分布を持つ像形成用ビームの直径1/e＾2にほぼ等しいかあるいはそれより小さいときに、像の目に見えるリプル感覚を排除すべく適切な走査線間隔

が生じるということはこの分野では公知である。立体像形成の場合、この間隔での走査線の設置により、上述した組成物の場合に各層の下面に際立ったリプルが生じることになる。その理由は、露光に対する材料の応答性の非ガウス形状が光硬化した薄層の許容範囲の均一な厚さを与えるほど重なり合うことがないためである。

【００３３】

したがって、走査間隔の決定は、ボクセルの寸法の確定に直接通じ、立体像形成システムの解像度能力を製造しようとしている剛性物体の公差要件に合わせることになるので、非常に重要である。単一の走査線の横断面のすべてのポイントにおける詳細な光硬化厚さとビーム線の対応したガウス形強度分布に対する露光との関係は次の等式に従うことがわかった。

【００３４】

【数１】

光硬化厚さ＝

$$G\{E\}=G\{P\ \exp\ [-2((Y/ro)^2)]/(\sqrt{2\pi}\ v\ ro)\}$$

【００３５】

ここでＧ｛Ｅ｝は露光Ｅ（mJ/ cm^2）応答する材料の深さに良く合った関数を表し、（実施例１の組成物には二次自然対数多項式を用いた。

Ｇ｛Ｅ｝（mm）＝　－0.66＋0.446 ln〔Ｅ〕－0.356(ln〔Ｅ〕^2)

Pは像平面におけるビーム放射束(mW)であり、Ｙは走査中心から離れる可変距離であり、roはガウスビームの1/e^2ビーム半径であり、 vは表面を横切るビーム走査速度である。ここで驚くべ きことには、Ｇ｛Ｅ｝を二次自然対数多項式と関係させる等式における露光単位が無次元でなくても、良くなじむということである。

【００３６】

図５は、ビームが連続的にオンであるときに一定速度単一走査線に対して直角に切断されたビーム・スポットの中心まわりの正規化されたガウス露光と、一定速度の単一ベクトルで走査され、走査方向に対して直角に切断された光硬化物質（実施例１の組成物を含む）の正規化された実際の厚さと、同じ条件の下に走査された予想される正規化光硬化厚さとを示している。

これらの曲線は共通最高相対値１に対して正規化されていて分布の差を良く示している。

【００３７】

ここで、単一走査露光の中心まわりの光硬化厚さの数学的な予測の分布は実際に材料について測定した厚さの分布にほぼ一致し、これは露光分布の形にそのまま基づいて予想されるものとはかなり異なっている。

【００３８】

組成物の露光に対する応答性の決定は、立体像形成システムの解像度ならびに組成物応答性に基づく所望の公差で物体を製造するシステム全体の能力の確定に通じるので、立体像形成にとっては必須である。線、層ならびにそれに続く部分公差を保つ能力に通じる所与の時間・パワー解像度に対してレーザ・エネルギを制御するのが光学システムの能力である。光学走査システムは、所望の寸法、位置に対してレーザ・エネルギを方向付け、合焦するという点で優れた解像度を持ち得る。しかしながら、それは線、層および製造される部分の公差を規定する吸収されたエネルギに対する材料の応答性となる。

【００３９】

単一走査線の分布についての知識によれば、相互の接合を生じさせかつ先端間の領域を埋めるに適した程度に重なり合っている平行な線によって形成される層が連続的にオンのビームで走査される一連の単線の厚さ応答性を単に加えるだけでモデル設計され得ると考えるのが普通である。このような数学的なモデルは次の等式を持つことになる。

【００４０】

【数２】

$$光硬化厚さ = \sum_{Yk=0}^{Yk} G\{E\} =$$

$$\sum_{Yk=0}^{Yk} G\{P \quad \exp\ [-2((Y/ro)\hat{}2)\ ]\ /(\ \sqrt{2\pi}\ \ v\ \ ro)\ \}$$

【００４１】

ここで、Ｙは走査方向に直角で像平面（図１の像形成面46）に対して平行な方向における第１走査ベクトルの中心からの距離を表し、YkはＹ＝０に対する各ベクトル走査中心の、隣り合った線についてその効果を総合した軌跡を表す。しかしながら、本出願人等の研究では、この数学的なモデルは光硬化厚さに関係するような組成物の露光応答性に応じて後に行われる連続走査露光回数の合計に基づくモデルよりもかなり劣ることを見出した。このような数学的モデルは次の等式を持つ。

【００４２】

【数３】

$$光硬化厚さ = G\{\Sigma E\} =$$

$$G\{\sum_{Yk=0}^{Yk} P \quad \exp\ [-2((Y-Yk/ro)\hat{}2)\ ]\ /(\ \sqrt{2\pi}\ \ v\ \ ro)\ \}$$

【００４３】

ここで、位置Ykに沿って位置した各ベクトル走査からの露光貢献度は各個々の位置Ｙについてまず合計され、次いで、露光応答性Ｇ｛｝がこの露光合計に適用される。

前記数３の前記数２以上の精度の決定は図６のグラフから容易に理解できる。この図６では、３本の連続した走査線が或る特定の間隔で引かれた前記数２に基づく数学モデルが、光硬化性組成物の底におけるリプルが同じ間隔をもって３本の走査線を引いた場合に前記数３が示すものよりも２倍の周波数を持つことになることを誤って示している。実施例１に記載された組成物の表面に同じ間隔で互いに平行に延びる走査線によって形成した層の顕微鏡写真から得た測定結果で前記数３で示すリプル周波数が実際の組成物応答性に一致することが確認されている。

【００４４】

前記数３の数学モデルが光硬化性組成物応答性を正確に予測させるものであるというさらなる証拠が図７に示してあり、ここには、このモデルが実質的に光硬化厚さを示していることが明らかにされている。

【００４５】

先に指摘したように、普通の二次元像形成と立体像形成との第２の重要な差異は各層の下面において明らかになる。銀ハロゲンフイルムで用いられるような二次元走査の場合、走査間隔（すなわち、フイルムに像形成しているときの走査線間の距離）が像平面でのビーム焦点の１/e^2直径と同じ幅であることは普通のことである。或る種のスキャナはより密接した走査線間隔を与えるが、まれには、ビームの1/e^0.693 直径未満の場合もある。二次元像形成の場合、この比較的広い間隔はいくつかの理由のために適切である。これらの理由の１つは、裸眼はより密接な走査間隔が粗くなる像暗密度の変化に鈍感であるということである。一方、特に高い解像度部分を得ようとする場合には、立体像形成では、二次元像形成での走査間隔よりも密接な走査間隔を必要とする。これは、露光に対する非ガウス材料厚さ応答性が光硬化性組成物内への均一な光硬化深度を与えるほど重なり合うことがないためである。立体像形成の場合、走査間隔は像平面での像形成ビームの全幅の最大半分すなわち1/e^0.693 に等しいかあるいはそれより小さいことが好ましく、底面のリプルを最小とする。図８の曲線は、前記数３の数学モデルに基づいた予測から導き出した

ものであり、実施例１の組成物の像形成層（この層の最大厚さは0.127 mmとなるべきである）の底面における、連続ビーム走査間隔の変化によるリプルの変化を示している。ここで、1/e スポット直径に等しい走査間隔の場合、層の重要部分が走査中心線の間でセグメント化されていることに注目されたい。

【００４６】

走査中心線間のこのようなセグメント化の効果はもっと論議する価値がある。特徴的なのは、層の剛さが厚さの３乗に比例して変化するということである。すなわち、厚さが２だけ減れば、その層の剛さは先の値の８分の１まで低下することになる。図８において、1/e 直径の間隔で連続的に走査された材料は厚さが最高値の30%まで低下した領域を有する。このような層では、この薄い領域での相対剛さ、したがって、走査線に対して直角の方向における剛さは98.7%の因数で低下することになる。1/e^0.693 ビーム直径の走査間隔でも、走査線に対して直角な方向における層の方向の場合のほんの36%の値となると予想できる。1/e^0.5 の走査間隔では、剛さはこの方向における最大値の65%まで減る。この剛さの差は自立層の脆弱化を招き、材料内の応力の変化により層のうねりを生じさせ、形成された層がその下になんの支えもないとき（すなわち、片持ち支持されるか、架橋支持されるかしたとき）最終部分における公差損失と考えられる。

【００４７】

しかしながら、より密接な走査間隔に移行するにはかね合いを考えなければならない。走査線の密度が高くなるので、層を形成する時間が長くなるのである。この余分な時間は、線に沿った走査が同じ光硬化深度を保つようにスピードアップされるはずなので、幸いにもそれほど重要とはならない。図９の曲線は走査線に対して直角の方向における層形成速度の変化を走査間隔の関数として示している。ここで、層間隔が密接になるにつれて、層形成速度が実際に平らになることに注目されたい。実際に、この速度は各ベクトル走査線の端にベクトル・ミラーを設置することに伴う時間損失について調節されるべきである。

【００４８】

走査間隔の決定は、上述したようにボクセルについての寸法確立に直接通じ、したがって立体像形成システムの解像度、公差能力に関係するので重要である。この寸法確立によれば、１つのボクセルのＸ、Ｙ、Ｚ寸法は互いに等しく、走査線間隔に等しい。光硬化の深度および幅は材料の露光特性ならびにビーム特性に応じて変化する。光硬化深度は単走査線の場合の光硬化幅に匹敵する、換言すれば、それと同じ程度の大きさであると好ましい。したがって、重なり合った多重走査線の場合、光硬化用の露光は走査線間の間隔に応じて変わらなければならない。走査間隔が像平面での露光ビームの1/e^0.693 スポット直径より小さいか、あるいは、それに等しい値であると好ましい。

【００４９】

前述したように、レーザ等のような放射ビームのベクトル走査を行う公知の偏向装置では、任意のビーム速度に達する際に質量加速度を伴う。この避けようのない速度不均一は、特に、層がその下に直接の基層を持たない部分を有する場合には、許容できないほどの厚さの変化を招く。これは、適性露光レベルを高い強さに保つために、高いビーム速度を用いなければならず、したがって必然的に加速時間が長くなるからである。これが、また、加速期間中に露光エネルギが適切に制御されない場合には厚さの不均一を招く。低出力レーザでは、厚さの不均一は加速期間中に幾分無視しえるが、立体物体の製作時間が長すぎることになって低強度レーザを使用しては良い解像度が得られない。

【００５０】

走査方向に対して直角なスライスではなくて走査方向に対して平行でかつ像形成平面に対して直角なスライスを採用して本出願人等が走査露光ならびに材料応答性を調べたところでは、一定速度で行われる連続的な一定出力ビーム走査の場合、材料の光硬化深度が一定となり、リプルもないということがわかった。しかしながら、普通のベクトル・スキャナを用いた場合、走査速度は特殊な設備を用いないかぎり全体的にかなり変化することになる。スキャナ・ミラーが最高角速度まで加速し、次いで、最高角速度から各ベクトルの

終りのスポットまで加速するときに各ベクトルの初めで速度変化が生じる。

【００５１】

スポット速度は走査半径（像平面からの走査ミラーの距離）と共に線形に変化し、図１の光硬化性組成物の像形成面46を横切って非線形に変化する。これは、像平面が立体像形成の際に通常平らであり、ベクトル・スキャナが通常は像平面の上方の距離のところにあるポイントに置かれるからである。これらの影響を避けるべく、スキャナは、通常、像形成面46から適切に遠く離れたところに設置され、非線形速度変化をすべての実用上の目的にとって無視し得るものとしている。光学機器も、露光ビームの焦点深度が充分に長くてビーム12″を像形成面46におけるすべてのポイントでほぼ平行とし得るように選ぶ。

【００５２】

好ましいシステムでの光学機器は、すべて、好ましくは紫外線領域で作動するレーザ・ビームを最適条件で透過させ得るようにコート処理される。まず、放射ビーム（レーザ・ビーム）12は安全インタロックが開かれたときにビームを遮る手段として用いられる機械的シャッタを通る。次に、音響光学式変調器の静的、動的動作にとって最適となる或る直径まで合焦、平行となる。ビーム視準光学機器に続いて、光は、ビーム方向を水平に変えてブラッグ角で音響光学変調器クリスタルに入射させるくさびを通して伝送される。音響光学変調器を通っているときのビーム直径は完全に均一であり、静的なオン状態で第１次までの最大回析効率を許すと同時に第２コンピュータ制御手段34によって制御される切り換え速度で優れた変調効率を与えるサイズのものとなる。切り換え速度は、薄層の製造のためには普通は、２～20メガヘルツのオーダーである。音響光学変調器を通過した後、露光をまったく行うつもりのないゼロ次ビーム（あるいは、露光を行おうとしているときにゼロ次、１次および普通は他の次数のビーム）は別のくさびを通り、このくさびがビームを残りの光路の下方水平方向に再整合させる。このくさびの後、ビームは負レンズで拡散させられる。次いで、第１次ビームを除いて、拡散させられたゼロ次ならびに他の次数のビームは光路下方での別の伝送を阻止される。もし存在するとして、第１次ビームは光路下方で継続させられ、そこにおいて、長焦点距離レンズを通り、X-Y 走査ミラー20、22を通して方向付けられる。これらのミラーはこのビームをビーム12″として光硬化性組成物40の像形成面46に反射する。ミラーから像形成面46までの距離は最終レンズの焦点距離よりやや短い。最終レンズの焦点距離は長く、したがって、走査半径も長くなり、この光学形が像表面全体において完全に均一な焦点直径を持つことを保証し、また、ビームが走査角による低い非点収差を持つことになるのを保証する。所与の切り換え周波数にとって音響光学変調器を通過する最適なビーム直径についての計算はこの分野では周知であり、ここでは簡略化のために詳しく説明しない。

【００５３】

これらの条件が満たされたとき、連続ビーム走査のスポット速度の変化は、直線、走査方向（Ｘ方向）ならびに走査方向に対して直角の方向（Ｙ方向）における光硬化厚さ、光硬化深度の変化に言い換えられる。スポットは、先に説明したように、像形成面46とビーム12″の交点である。走査ビームが連続的である場合、前記数３は像形成面46上の任意の位置１（Ｘ、Ｙ、ｔ）での光硬化厚さを計算するのに用いることができるが、ただし、この位置でのスポット速度が既知であり、この速度がＹ方向に沿って変化しない（すなわち、走査速度が像平面において無限の曲率半径を持つ）としなければならない。

【００５４】

ベクトル走査の場合、一層詳しくは、本発明を説明するのに用いられる装置の場合、偏向手段の最大許容加速度（一回のミラー回転におけるもの）が特定の値にセットされ、それ相当に適切な走査半径が使用される。或る代表的なシステム仕様は次の通りである。

偏向手段で発生したボクセルはＸ、Ｙ、Ｚ寸法が等しく、各ボクセルの所望寸法はそれぞれの寸法で0.0127cm（0.005 ″）である。

ビーム放射照度の関数Ｇ｛ΣＥ（mJ/2cm^2）｝として或る露光を受けた材料を用いて達成される光硬化深度（cm）は次の関数演算子によって表現される。

【００５５】

（数４）

G｛ΣE｝(cm) ＝－0.066＋0.0446 ln〔ΣE〕－0.00356(ln〔ΣE〕)＾2

【００５６】

像平面において単一の走査線で走査される0.0127cm1/e^0.693 直径スポット（すなわちro＝0.0108cm 1/e^2）において 300mWのレーザ出力でＤ＝0.0127cm深さのボクセルを生じさせるＧ｛ΣＥ｝感度の材料の場合、最高走査速度（Vxmax)は前記数１と前記数４を組合せ、その結果生じた二次方程式を解答することによって決まる。

【００５７】

【数５】

$$Vxmax = \exp\ \{(1/2C)((B + 2C \ln[P/\sqrt{2\ \pi}\ \ ro]) - \sqrt{(B+2C\ \ln[P/\ 2\pi ro])^2 - 4C(A-D+B\ \ln[P/\ 2\pi\ \ ro]+C(\ln[P/\ 2\pi\ \ ro])^2))}\}$$

【００５８】

ここで、Ａ、Ｂ、Ｃは材料応答性等式Ｇ｛ΣＥ｝の材料係数を表す（すなわち 、Ａ＝－0.066 ……、Ｂ＝0.0446……、Ｃ＝－0.0356……）こうして、スキャナが最高速度に達するのに採用する時間、距離について容易に解決できる。この場合、約7.02ミリ秒を採るが、適正な露光が達成されるまで4.65cmを移動しなければならない。この時間と移動距離のとき、材料は大きく露出過剰となり、光硬化深度が所望程度よりもかなり深くなる。換言すれば、走査システムは付加的な設備がまったくないとき所望公差の或る部分（この場合、１本の線）を生じさせるのに適した露光エネルギの解像度を与えない。

【００５９】

図10および図11はこの加速期間中の過露出と光硬化深度公差の損失を示す。ここで先に説明したようにベクトル走査システムの場合、 300mW強度を有する。図１のビーム12″のようなビームは大きく改善された走査速度を潜在的に与え、走査中に連続的にオンに留まり、約4.65cm移動距離まで光硬化性材料における所望の露光レベル、したがって、光硬化深度を発生することがない。この過剰な露光が走査の終りで生じ、また、スキャナが１つのスポットまで減速するので、 300mWビームを持つスキャナ・システムは像平面（図１の像形成面46）のあらゆる部分で所望厚さの層を走査することができない。図11は、図10に示す曲線の開始部分の拡大図であり、走査中に連続的にオンである15mWビームでも各走査線の始まりで過剰露光を生じさせることを示している。同様の過剰露光は各ベクトルの終りでも生じよう。影響を受けるのは、所望露光点での光硬化深度だけでなく、走査線を囲む領域における光硬化の厚さも影響を受ける。

【００６０】

個々のベクトルの始まりと終りでのこの公差の喪失は部分横断面を表す層を盛るように互いに隣り合った一連のベクトルでも明らかである。この層はベクトル盛り分の始まりと終りに対応する縁のところで余分な光硬化深度を得ることになる。縁のところでこの余分な光硬化深度が生じるという事実は、外面のところでの公差コンプライアンスについて通常は部分的な測定が行われるので、部分全体または剛性物体の公差喪失に通じる。したがって、この部分は各横断面で望まれるよりも幅が大きくなり、孔が所望程度よりも直径が小さくなり（ベクトル走査では孔がベクトルの別の始まり、終りを表わす）、片持ち部分、架橋部分あるいは傾斜部分において望まれるよりも深くなる。上述した15mWビームの場合には、それで作られる剛性物体は公差セット限度に依存してかろうじて許容できる程度であるが、 300mWで作った部分または剛性物体が過剰に大きくゆがめられることになることは確かである。

【００６１】

一方、露光制御を利用すれば、より高い出力のレーザを使用でき、したがって、より速い走査速度を利用でき、露光解像度がかなり改善され、かなり緊密な部分公差に合わせた能力を得ることができる。基本的には、本発明の好ましい実施例では、露光制御はスポットが光硬化性組成物の表面上を移動する単位距離あたりの或る設定時間にわたってレーザ

・ビームを確実にオンにすることによって走査ベクトルにわたって均等な露光を与える。先に説明したように、レーザ・ビームは各ボクセルに対して多数回の露光に分けるように変調される。各露光中のビームの出力すなわち強さは同じであり、露光パルスの時間も同じである。（ただし、後述するように各ベクトルの始まりと終りを除く）。これはベクトル走査線に沿って実質的にもっと均一な露光を与える。

等しい時間幅（w)のディジタル方形波時間パルスを有し、ストップから最高速度まで加速するこのような変調ベクトル走査システムのための一般化した露光方程式は次の通りである。

【００６２】

【数６】

$$1/(\pi ro^2)\sum_{Yk=0}^{Yk}\sum_{Xp=0}^{Xp}\exp(-2((Y-Yk)/ro)^2)*$$

$$*\int_{t}^{t+w} P\ \exp[-2((0.5\,a\,t^2-Xp)/ro)^2]\,dt$$

【００６３】

ここで、ｔはベクトルの始まりの時刻を表し、Ykは走査線Yoから出発して走査方向に対して直角の距離のところで各走査の中心線を表し、XpはXoのところで出発して走査線に沿って各パルスが位置する距離を表し、「ａ」は走査方向におけるスポットの加速を表す。前記数４は積分すると、Ｘの点から幾分処理が容易になり、次の形に書き直すことができる。

【００６４】

【数７】

$$\int_{Xp}^{Xp+w(2Xp\,a)^{0.5}+0.5a\,w^2}(P/(2X\,a)^{0.5})\exp\{-2((X-Xp)/ro)^2\}\,dx$$

【００６５】

代表的には、前記数６の積分の代わりに前記数７の積分を用いて像平面の或るポイントでの露光を計算する場合、このポイントからの1/e^2(３～４シグマ）半径の半分から２倍に存在するパルスの露光分担量を合計しなければならない。このポイントについてひとたび全露光量が計算されたならば、前記数４に記載されている演算関数を用いてそのポイントでの露光値を予測することができる。

ディジタル・コンピュータ近似法を用いて、各寸法でのボクセル・サイズが0.0127cmであるビーム・スポットの1/e^0.693 直径の間隔で他のベクトル走査で囲まれたベクトル走査について光硬化厚さを計算した。このスポットのパルスはボクセルあたり、スポットから加速されたビームの４倍で生じる。走査半径は大きくして、1.27*10^6cm/sec^2のスポット加速度を与えた。スポットはパルスあたりw＝3.93*10^ －6secにわたってディジタル式にパルス化し、像平面でのビーム出 力は 150mWであった。

【００６６】

図12はこのような走査について予測される光硬化深度を示す。この曲線は走査線の中心に沿った予測深度を示しており、これが定義によれば光硬化深度となる。ここで走査線に沿って光硬化深度が１ボクセルについて移動した後の、すなわち、走査間隔に等しい距離にわたる所望一定値を達成することに注目されたい。各ベクトル始まりと終り、すなわち、各充填平面の始まりと終りで１ボクセル長分の損失は、露光制御を行った場合、連続ビーム走査を利用したときに得られるもの以上の重要な改良を表す。より高い出力の露光ビームを利用した場合、露光制御ではもっと速い走査速度を可能とする。しかしながら、始まりと終りでの１ボクセル分の損失は或る部分についての所望の寸法におけるセット公差に関してそれ以上の損失になお移行する。

【００６７】
第１ボクセルの損失についての理由を明確に理解するためには、プリセット公差に合わせるように露光制御を利用するベクトル走査システムの能力をさらに改善しなければならない。前記数６ならびに隣り合ったスポットの露光量を合計して或るポイントでの全露光量を計算しなければならないという事実を考えると、ベクトルの始まりでは、隣り合った露光が走査の背後に存在せず、走査の前方にのみ存在するということが実現され得る。これは、或る走査の最初のボクセルが後に続くボクセルによって受け取られる露光量の約半分の量を受け取ることを意味する。これは、さらに、パルスを発生するための情報を与える、ミラーに取付けられたエンコーダが信号の発生の前に約１パルス分移動しなければならないという事実と組み合わされる。こうして、普通は、図12に示す場合の第１ボクセルは計算した露光量よりも４分の１少ない露光量を受け取ることになる。

【００６８】
１ボクセルあたりのパルス量を増大させ、エンコーダ内のパルス損失によるパルス露光損失のパーセンテージを減らすことはできる。これには、パルス回転率限界によるスキャナの速度を最終的に制限することのできるエンコーダ上のパルス密度の増大が必要となる。これには、また、パルス時間幅が比例して減り、ビーム・スイッチの光学的効率を最終的に低下させ、ビームの全出力を低下させかつ最高ビーム速度すなわち走査速度を短縮することが必要となる。

【００６９】
走査半径（図１のビーム12′の長さ）の短縮はパルス密度を増大させるが、大きなフィールドの走査を許さず、パルス時間幅が比例的に減少して露光量を減らすときのシステムの光学効率の損失のために最終的に自滅することになる。
好ましい解決策は、走査線の始まりの最初のボクセルと終りの最後のボクセル内の最初の２、３のパルスに長いパルス時間を与えることである。これが走査システムの速度を低下させることはないし、走査システムの任意他の部分になんら負の影響を与えることもないが、各ベクトルの始まりと終りでボクセルの回復を許すことになる。

【００７０】
作動に際して、図１に示す放射線装置10（好ましくは高出力レーザである）は前述したような強さを有する放射ビーム12を与える。この放射ビーム12は変調器14を通過し、その強さがゼロ強さレベルからエネルギの損失により未変調ビーム強さのそれよりも低い値を有する最大ビーム強さまで変調を受ける。ディジタル、アナログ両方のタイプの種々の変調器が使用し得る。ディジタルタイプは、システムの電子的な安定性、融通性を高めるので好ましいものであり、音響光学式変調器が好ましい。高エネルギ非固体レーザの場合、上述したように、特殊な変調器配置をなさなければならない。次いで、損失により幾分減少した強さを有する変調された放射ビーム12″はミラー20、22組立体の形をしたベクトル・スキャナのような偏向手段16を通過する。各ミラーはそれぞれ異なったモータ24、26によって個別に駆動される。モータ24によって駆動されるミラー20はＸ方向にビームを偏向し、ミラー22はＸ方向にビームを偏向する。ここで、Ｘ方向はＹ方向に対して直角である。放射ビーム12″は、付加的な損失により幾分強さは低いが、光硬化性組成物40の表面に最も近い薄層48に向けられる。この光硬化性組成物は容器44に入っており、ここで、薄層48の所定の部分の光硬化が生じる。ビームの複合運動はベクトルタイプの運動であり、ビームはベクトル・モードで運動すなわち走査されると言える。電気機械式偏向手段16の慣性により、薄層48上でのビーム12″の速度は偏向手段16の慣性ならびに電気機械的特性によっても制限を受ける。

【００７１】
２つのミラー20、22のモータ24、26を介しての偏向は第２コンピュータ制御手段34によって制御され、一方、製造中の立体物体の形状に対応する図形データは第１コンピュータ制御手段30内に記憶される。
第２コンピュータ制御手段34は変調手段14、偏向手段、第１コンピュータ制御手段30にそれぞれ制御／フィードバック・ライン50、54、58を介して接続している。第１コンピュ

ータ制御手段30に記憶された図形データは第２コンピュータ制御手段34に送られ、処理された後、モータ24、26を回転させ、ミラー20、22を移動させ、放射ビームを薄層48上の所定位置に向って偏向する。ミラー20、22の相対運動に関する電気的フィードバックは偏向手段によってライン54を介して第２コンピュータ制御手段34に与えられる。このフィードバックは薄層48の所定部分でのビームの速度ならびに平均残留時間に相互関係があり、第２コンピュータ制御手段34によって処理されてから、ライン50を通して制御指令として変調器14に送られて放射ビーム12の強さを変調し、その結果、放射ビーム12の強さと薄層48の所定部位のうち各部位での平均残留時間の積がほぼ一定に留まる。こうして、これら２つのパラメータの積として定義される露光レベルがほぼ一定に留まる。この露光レベルを各隣り合った薄層の所定部分にわたって一定に維持することによって、光硬化深度もほぼ一定に保たれる。この補正は、膨らんだ縁が上述したようなベクトル走査における縁のところの低い初期速度による過剰露光の結果として現れる薄層の不支持部分で特に非常に重要である。放射ビーム12″の強さが高ければ高いほど、あるいは、光硬化性組成物の光感度が高ければ高いほど、露光レベルを一定に保つ手段がない場合にはこの問題はそれだけ厳しいものとなる。また、光硬化性組成物40の感度が大きければ大きいほど、或る種の露光制御手段なしには問題はそれだけ厳しいものとなる。

【００７２】

可動テーブル41は、当初、光硬化性組成物40内の像形成面46から短い所定距離のところに設置され、像形成面46と可動テーブル41の間に薄層48を与える。テーブル位置決めは設定手段42によって行われ、この設定手段は第１コンピュータ制御手段30によってそこに記憶されたデータに従って制御される。剛性物体の形状の第１層に対応する図形データは第１コンピュータ制御手段30から第２コンピュータ制御手段34へ送られ、そこにおいて、偏向手段16から得られたフィードバック・データと一緒に処理され、変調器14に送られてそれを制御し、その結果、ビームが薄層48の所定部分上をベクトル・モードで移動するときに、露光量が一定に留まる。

剛性物体の第１層が完了したならば、可動テーブル41を第１コンピュータ制御手段30からの指令を介して設定手段42によって所定の短い距離だけ下降させる。第１コンピュータ制御手段30からの同様の指令により、層形成手段、例えば、ドクターナイフ43が像形成面46を拭って平らにする。次いで同じ手順が繰り返され、第２の、第３、そしてそれに続く層を製造し、最終的に剛性物体が完成する。

【００７３】

先に述べたように、変調器は放射ビームの強さをほぼゼロの強さから最大強さまでアナログあるいはディジタル・モードで変調する。変調器では或る程度の光学的な損失があり、また、偏向手段でも或る程度の付加的な損失がある。最大強さは未変調ビームの強さマイナス全光学的損失に等しい。本発明の好ましい具体例では、最大ビーム強度は光硬化性組成物の感度その他のパラメータに依存して或る種の値を超える。したがって、放射ビームの最大強度が次の式よりも大きい光硬化深度を与えることが好ましい。

【００７４】

【数８】

$$\text{光硬化厚さ} = G\{\Sigma E\} = G\left\{\sum_{Yk=0}^{Yk} P \exp\left[-2((Y-Yk/ro)^{\wedge}2)\right] / (\sqrt{2\pi}\ v\ ro)\right\}$$

【００７５】

ここで、Ｇ｛ΣＥ｝は露光Ｅの合計で演算する関数Ｇ｛ ｝を表し、この関数演算子は或る特定のポイントあるいは領域で受け取られる露光量の合計（mJ/ cm^2)に対して或る特定の材料光硬化深度応答性（cm）を関係付ける。普通は、この 関数演算子は次の形の自然対数二次多項式適合である。

【００７６】

（数９）

Ｇ｛ΣＥ｝＝光硬化深度＝Ａ ＋Ｂ ln〔Ｅ〕＋Ｃ（ln〔Ｅ〕）＾２

【００７７】

ここで、Ａ、Ｂ、Ｃはこの関係について良好な数学的適合性を与える或る特定の材料についての係数であり、Ｙは像平面における走査方向に対して直角の方向における任意の該当位置（cm）を表し、Ykは像平面における位置Ｙ＝０に対する走査線の任意の中心位置（cm）を表し、roはビームと光硬化性材料の像平面との交差点におけるビームの1/e ＾２ 半径（cm）であり、ｖは像平面における表面上のビーム・スポットの速度（cm／sec)である。

【００７８】

ベクトル走査のベクトルは複数の走査線からなり得る。これらの走査線は１グループあるいはそれ以上のグループの走査線を含み得るし、その場合、各グループの走査線は互いに平行でcmある。或るグループ内の２つの隣り合った走査線の距離は、一定であるときには走査線間の走査間隔となる。しかしながら、或る状況では、走査間隔が線毎に大きく変わる可能性はある。この場合、ビームが任意最初の線を走査しているとき、前記最初の線に関係する走査間隔は第１線と第２線との距離に等しい。この第２線とは、他の隣り合った線のうちでも、第１線に最も近く、第１線を走査した後に走査される線を言う。

【００７９】

最大加速度で走査線上を放射ビームが移動してゼロ速度レベルから最大一定速度に到達するまでの距離は走査間隔より大きいことが好ましく、もっとも好ましくは、走査間隔の５倍、さらに好ましくは走査間隔の10倍である。

変調器14は、好ましくは第２コンピュータ制御手段34を介して制御されてほぼ方形波パルスの形で放射ビームをオン、オフする。各パルスは、通常は、ほぼ同じ振幅あるいは強さならびに同じ持続時間を有する。ビームが光硬化性組成物40の像形成面46を走査するにつれて、パルス周波数は像形成面46上をビームが移動する速度に比例するように第２コンピュータ制御手段34、走査システム16、フィードバック手段54によって設定される。

【００８０】

【数１０】

$$G\{1/(\pi ro\hat{}\ 2)\sum_{Yk=0}^{Yk}\sum_{Xp=0}^{Xp}\exp\{-2((Y-Yk)/ro)\hat{}\ 2\}*$$

$$*\int_{t}^{t+w} P\ \exp\{-2((0.5\ a\ t\hat{}\ 2-Xp)/ro)\hat{}2\}\ dt)$$

【００８１】

ここで、Ｇ｛ΣＥ｝は露光Ｅの合計について演算する関数Ｇ｛｝を表しており、この関数演算子は或る特定のポイントまたは領域で受け取られる露光量の合計（mJ/ cm＾２)に或る特定の材料光硬化深度応答性（cm）を関係付けるものである。通常は、この関数演算子は前記数９と同じ自然対数二次多項式適合である。

【００８２】

ここで、Ａ、Ｂ、Ｃはこの関係について良好な数学的適合性を与える或る特定の材料についての係数であり、roはビームと光硬化性材料の像平面との交差点におけるビームの1/e ＾２ 半径（cm）であり、P は時間積分によって示されるようには変調されない場合に他のパラメータによって示される状況の下で望まれるよりも大きい重合深度を与える、像平面におけるビームの最大放射照度（mW）であり、Ｘ、Ｙは像平面における光硬化性液体の表面の位置（cm、cm）を表わし、Yk は像平面における位置Ｙ＝０に対する走査線の任意の中心位置（cm）を表わし、Xpはビーム・パルスを受ける像平面における位置Ｘ＝０に対する走査線に沿った任意の初期位置（cm）を表わし、t は像平面において或るパルスが照

射を開始する時刻(sec) を表わし、w は像平面において照射パルスが持続する時間(sec) を表わし、「ａ」は反射ミラー式スキャナの各加速度能力と走査半径とによって決められる、像平面におけるスポットの加速度（cm/sec^ 2)を表す。

【００８３】

露光制御手段を通しての被走査層の周縁領域における光硬化公差の制御は特に重要である。ベクトルの始まりと終りからなり、ベクトルの分担露光量が隣接の平行なベクトルよりも少ない周縁領域では、露光量が少ないため、Z 方向での光硬化深度は浅くなり、X、Y方向での光硬化深度も浅くなる。立体像形成過程では、前述のように、物体が層状に形成される場合、光硬化深度が浅いということは直ちにX、Y、Z方向における寸法公差の損失を招く。加えて、Z方向における光硬化深度の損失は物体の層間の剥離現象の可能性を高める。

【００８４】

この層剥離現象はZ方向における光硬化材料の成形が光の層との接合を行うには不適当なために生じる。立体像形成過程では、層間の接合は図１に48で示す先行して光硬化した領域上方の液体層の深さに等しい深さの光硬化層を形成するに必要とするよりもやや高い露光を行うことによってなされる。この層剥離は物体の周縁で生じ、薄い壁部分を作る積層体に重要な影響を与える。

【００８５】

層剥離を防ぐように制御されなければならない変数としては、像平面におけるビーム出力Ｐ（mW）、露光時刻ｔ(sec)、スポット・サイズro（cm）、走査間隔　Y(k ＋1)－Yk(cm)、パルス間の距離X(p ＋1)－Xp（cm）および再走査技術がある。層剥離ならびに公差損失を防ぐには、ビーム出力をアナログ手段（例えば、前述の音響光学式変調器）を介して高めて隣接の露光による影響が少ない領域における正味露光量の損失を補正するとよい。あるいは、前記のディジタル・パルス化音響光学変調器のようなディジタル制御手段によって個々のビーム出力パルスの時間幅を増大させることによって露光時間を延ばして隣接の露光による影響が少ない領域における正味露光量の損失を補正してもよい。再走査技術というのは、光硬化層を平行な走査線で形成する前か後にこの層の任意の周縁部分を走査する技術であり、物体あるいは層の任意の周縁部分で受け取られる低い露光量を補正することになる。

【００８６】

スポット・サイズを大きくし、走査間隔を縮めるかあるいはパルス間隔を縮めると、露光量が一層均一となり、より確かな接着領域が達成されるので層間の接着性を改善するが、層剥離を防ぐために周縁領域でこのような方法を使用すると、物体公差について悪影響があるかも知れない。

本発明の好ましい具体例では、隣接の露光による影響が少ない領域での交差の損失ならびに層接着性の低下は、これが先に述べたようにベクトルの始まりと終りでの影響によるものであろうと、隣接のベクトル走査による影響のない走査線によるものであろうと、ディジタル・パルス化音響光学式変調器の露光時間幅パルス制御によって補正される。

【００８７】

放射ビーム12の好ましい変調方法はディジタル式であるが、アナログ・モードあるいはアナログ、ディジタル・モードの組合せでの変調も本発明の範囲内にある。ビーム12は紫外線であると好ましいが、赤外線でも、可視光線でも、赤外線あるいは可視光線と紫外線の組合せでもよいし、他の放射線、例えば、Ｘ線、電子ビーム、イオン・ビーム等であってもよい。

最後に、可動テーブル41の運動は並進運動、回転運動、無作為運動あるいはそれらの組合せであってもよい。

【実施例】

【００８８】

本発明の好ましい光硬化組成物を実施例１に示す。なお、組成物を構成する各成分の数値は特に断らない限り重量部を意味する。

[実施例１]
Novacure 3704 〔ビスフェノール－Ａビス（２－ヒドロキシプロピル）ジアクリレート〕：29.6
TMPTA （トリメチロールプロパントリアクリレート)：29.6
Plastha11 4141 (CP ta11社) （トリエチレングリコールカプレート－カプリレート)：14.8
Triton X-100 (オクチルフエノールポリエーテルアルコール)：0.78
Iragacure 651 （２，２－ジメトキシ２－フエニルアセトフエノン）：1.6
コア－シエルポリマー*（RCP 1674)： 26.0
上記のコア－シエルポリマー*は、ブチルアクリレート 70%、ブチレングリコールジアクリレート、5%アリルメタクリレート 25%からなるコアとメチルメタクリレート 100%からなるシエルを有する。
上記の光硬化性組成物を用いて、上述の如き方法で立体像を形成すると、精度良く三次元立体像を造形することができ、かつ造形速度も向上し、良好な部物性の造形物が得られる。

【００８９】
当該コア－シエルポリマーは以下のように調製した。
（コアの製造）
脱イオン水2388ｇおよびドデシルスルホン酸ナトリウムの30%水溶液37.5ｇを機械式攪拌機、凝縮器、加熱マントル、添加用漏斗、温度計および窒素取入口を備えた５ｌの４ツ口フラスコに入れた。フラスコの内容物を室温下窒素で30分間パージして、次いで80℃に加熱した。この温度でブチルアクリレート（BA)1046g、アリルメタクリレート(AMA)279gおよび 1,4－ブチレングリコールジアクリレート(BGD)70gからなるモノマー材料の８分の１を一度に加えた。続いて直ちにリン酸水素ナトリウムの７％溶液19 および過硫酸アンモニウムの５％溶液20 （いずれも水溶液）を一度に加えた。加熱を中止し、反応混合物の発熱にまかせた。発熱により84℃のピークとなった時、残りのモノマー材料を90分かけて反応温度が80～85℃に維持するように断続的に加熱しながら加えた。モノマーの添加（全モノマー材料1345ｇ）が終了したら、さらに反応混合物を 2.5時間80～85℃で加熱した。最終生成物は青みを帯び、固形分35.1%を有する乳化液であり粒径0.097ミクロンを有した。

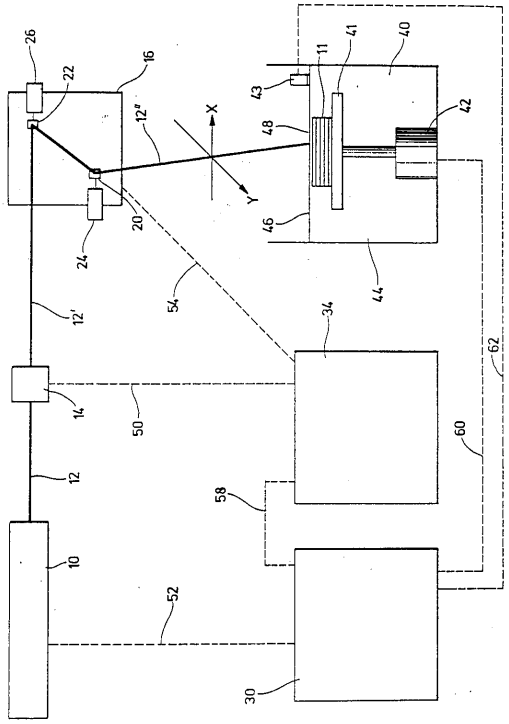
【００９０】
（シエルの製造）
上述のコア乳化液2000g をコアを調整するときに使用したのと同じ装置を備えた５ｌのフラスコに入れた。フラスコ内容物を窒素により室温で30分間パージした。窒素パージの後、過硫酸アンモニウム1.45ｇ、ドデシル硫酸ナトリウム30%水溶液 2.9ｇおよび脱イオン水 332ｇからなる混合物を撹拌しながらフラスコに30分かけて加えた。次いでフラスコの内容物を85℃に加熱して、メチルメタクリレート179gを60分間かけて加えた。すべてのモノマーを加えて、更に反応混合物を２時間加熱した。最終生成物は青みを帯び、固形分36.2%を有する乳化液であり、粒径0.107ミクロンを有した。コア：シエルの比率は実質的に４：１であった。

【００９１】
青みを帯びた乳化液をフリーザー中に３日間置いて、次いで解凍し濾過し脱イオン水で洗浄し、そして室温で約３日間乾燥した。試験工場またはプラントでのバッチの場合のような大きな試料のために、100 ～150 ℃ の熱風などのスプレー ドライ法を用いてもよい。

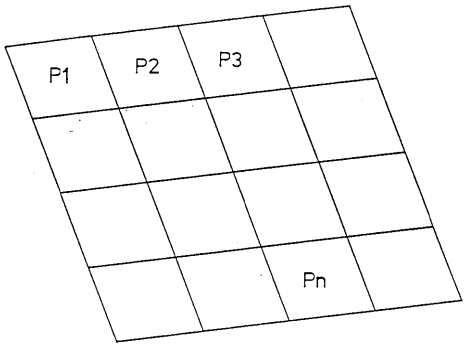
【図面の簡単な説明】
【００９２】
【図１】本発明の装置の好ましい具体例のブロック図である。
【図２】ピクセル、ボクセルそれぞれの表面ならびに体積の分割を説明する図である。
【図３】ピクセル、ボクセルそれぞれの表面ならびに体積の分割を説明する図である。

【図４】実施例１の光硬化性組成物の光硬化層の深さと露光対ビーム放射の関数との関係を示す図である。
【図５】露光分布対走査線を横切る方向の計算深さ、実深さの正規化曲線を比較した図である。
【図６】３つの隣あった走査線を横切る方向の光硬化深度を示すことを目的とする２つの計算曲線を比較した図である。
【図７】走査線を横切る方向における実際の厚さと計算厚さとを比較する図である。
【図８】横断面方向の光硬化厚さについての走査間隔の影響を示す図である。
【図９】走査線速度対走査間隔の関係を示す図である。
【図１０】露光レベルを一定に保つ設備が設けられていないときにストップから最大加速度の下で最小一定光硬化深度に到達するまでに必要なベクトル走査距離についてビーム強さが影響する大きな差を示す図である。
【図１１】露光レベルを一定に保つ設備が設けられていないときにストップから最大加速度の下で最小一定光硬化深度に到達するまでに必要なベクトル走査距離についてビーム強さが影響する大きな差を示す図である。
【図１２】露光レベルをほぼ一定に保つ設備が設けられているときの光硬化深度対走査方向に沿った距離の関係を示す図である。
【符号の説明】
【００９３】
１０　放射線装置
１１　立体物体
１２　放射ビーム
１２’　変調済みの放射ビーム
１４　変調器
１６　偏向手段
２０、２２　ミラー
２４、２６　モータ
３０　第１コンピュータ制御手段
３４　第２コンピュータ制御手段
４０　光硬化性組成物
４１　可動テーブル
４２　設定手段（エレベータ・モータ）
４３　ドクターナイフ
４４　容器
４６　像形成面
５２、６０、６２、５８　制御／フィードバック・ライン

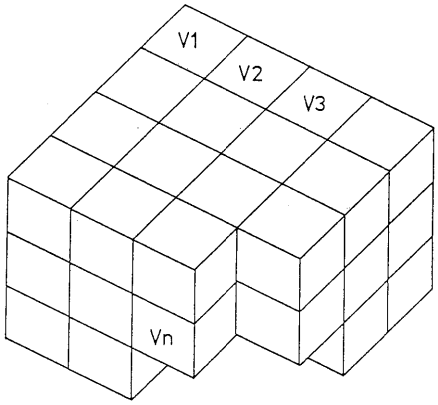
【図１】


26
22
16
12'
X
Y
43
48
11
41
40
42
46
20
24
54
44
12'
34
62
14
50
60
12
58
10
52
30

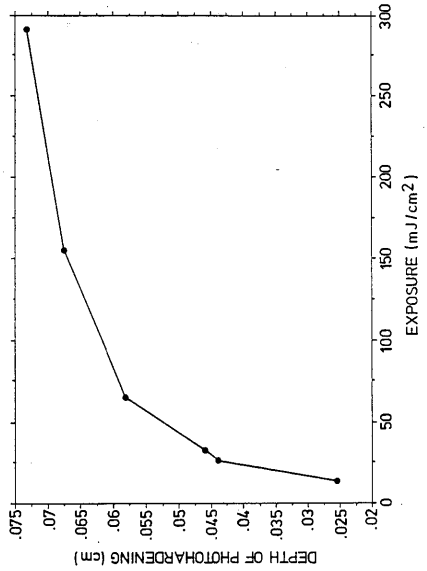
【図２】


P1
P2
P3
Pn

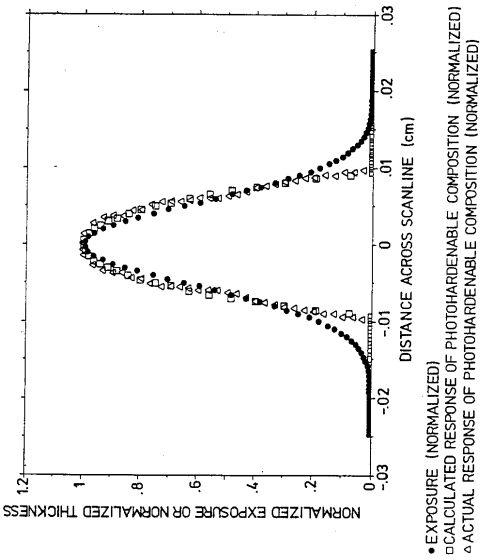
【図３】


V1
V2
V3
Vn

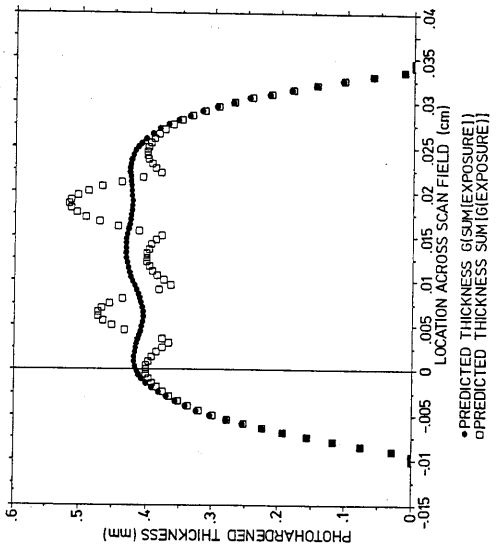
【図４】


EXPOSURE (mJ/cm2)
0
50
100
150
200
250
300
DEPTH OF PHOTOHARDENING (cm)
.02
.025
.03
.035
.04
.045
.05
.055
.06
.065
.07
.075

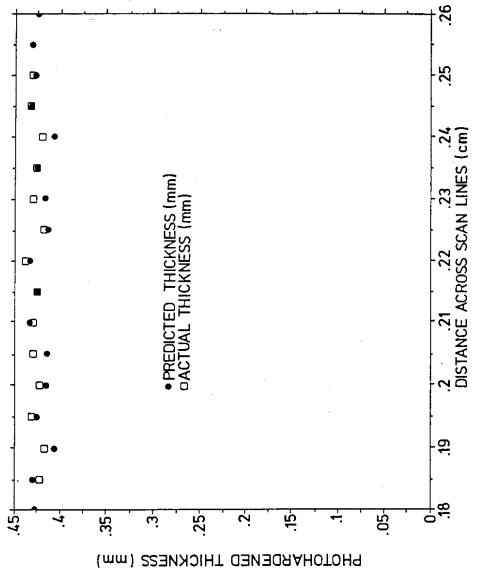
【図５】


NORMALIZED EXPOSURE OR NORMALIZED THICKNESS
0
.2
.4
.6
.8
1
1.2
DISTANCE ACROSS SCANLINE (cm)
-.03
-.02
-.01
0
.01
.02
.03
•EXPOSURE (NORMALIZED)
□CALCULATED RESPONSE OF PHOTOHARDENABLE COMPOSITION (NORMALIZED)
△ACTUAL RESPONSE OF PHOTOHARDENABLE COMPOSITION (NORMALIZED)

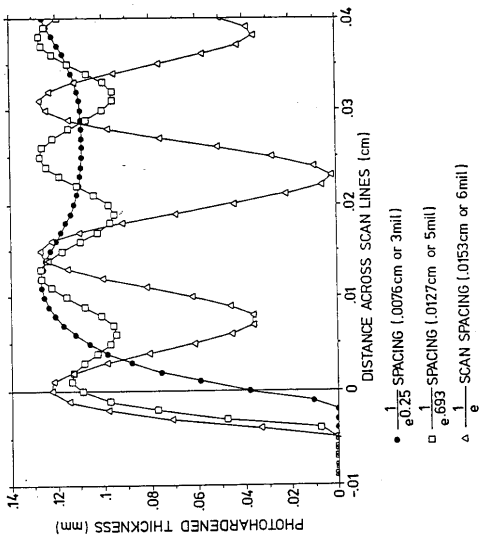
【図６】


PHOTOHARDENED THICKNESS (mm)
LOCATION ACROSS SCAN FIELD (cm)
•PREDICTED THICKNESS GI SUM[(EXPOSURE)]
□PREDICTED THICKNESS SUM[G(EXPOSURE)]

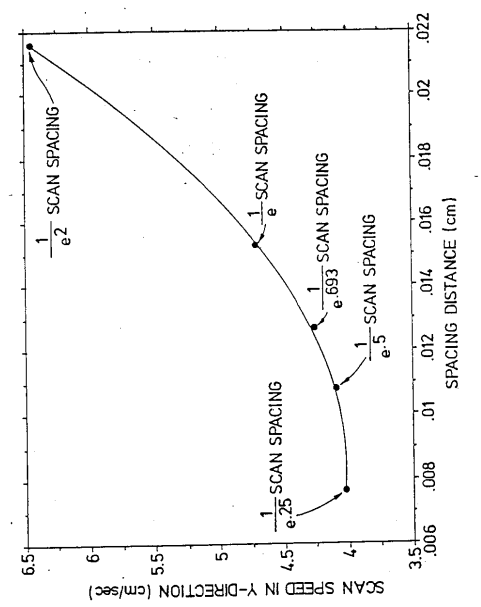
【図７】


PHOTOHARDENED THICKNESS (mm)
DISTANCE ACROSS SCAN LINES (cm)
•PREDICTED THICKNESS (mm)
□ACTUAL THICKNESS (mm)

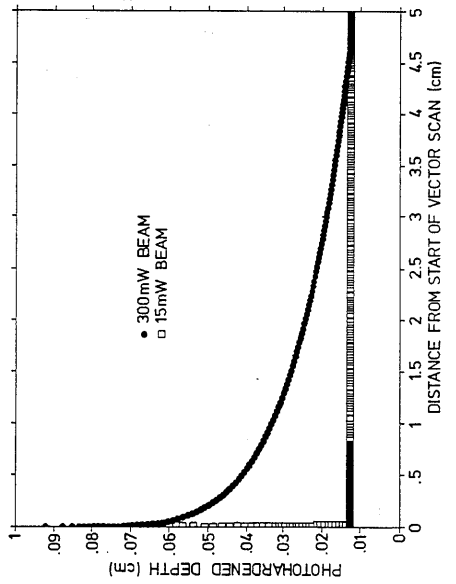
【図８】


PHOTOHARDENED THICKNESS (mm)
DISTANCE ACROSS SCAN LINES (cm)
• 1/e^0.25 SPACING (.0076cm or 3mil)
□ 1/e^.693 SPACING (.0127cm or 5mil)
△ 1/e SCAN SPACING (.0153cm or 6mil)

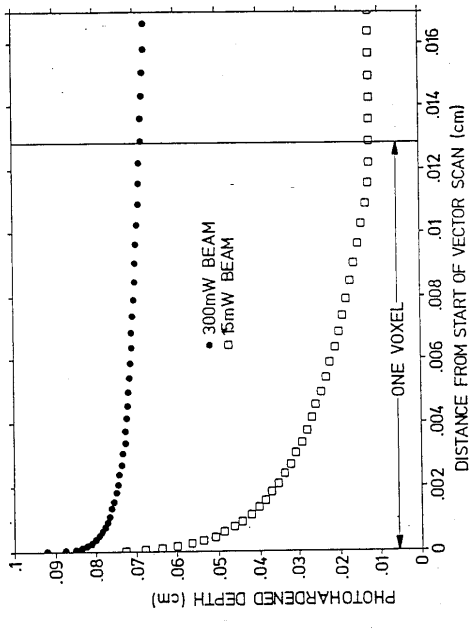
【図９】


SCAN SPEED IN Y-DIRECTION (cm/sec)
SPACING DISTANCE (cm)
1/e^2 SCAN SPACING
1/e SCAN SPACING
1/e^.693 SCAN SPACING
1/e^.5 SCAN SPACING
1/e^.25 SCAN SPACING

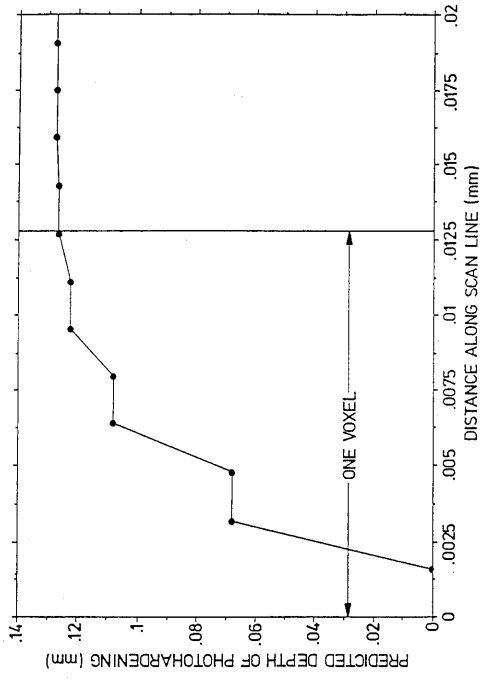
【図１０】


300mW BEAM
15mW BEAM
DISTANCE FROM START OF VECTOR SCAN (cm)
PHOTOHARDENED DEPTH (cm)

【図１１】


300mW BEAM
15mW BEAM
ONE VOXEL
DISTANCE FROM START OF VECTOR SCAN (cm)
PHOTOHARDENED DEPTH (cm)

【図１２】


ONE VOXEL
DISTANCE ALONG SCAN LINE (mm)
PREDICTED DEPTH OF PHOTOHARDENING (mm)

フロントページの続き

(58)調査した分野(Int.Cl.[7], ＤＢ名)
ＣＯ８Ｌ３３／１４
ＣＯ８Ｆ１０／００－２４６／００
Ｂ２９Ｃ６７／００
ＣＡ（ＳＴＮ）
ＲＥＧＩＳＴＲＹ（ＳＴＮ）