

# 光造形システム制御のためのソフトウェアアルゴリズムの開発から並列処理計算機の試作へ

大分大学 工学部

教授 大河内茂美

(平成6年度研究開発助成 AF94-003)

## 1. 研究の背景と目的

光エネルギーの化学作用によって素材のある部分になんらかの変化を起こし、流動性素材を部分的に固体化すれば、求める形状の立体物を構成することができる。この基本思想を基にして、光造形システムを設計することができる。実際に製品として、ウシオ電機株式会社のUNIRAPID、シーメット株式会社のSOUP、帝人製機株式会社のSOLIFORM、株式会社デーメックのSCS、デンケンエンジニアリング株式会社のSolidLDPlotterSystem、三井造船株式会社のCOLAMNをはじめとしておおくのシステムが提案されている。国外に眼をむければ尚さらである。

これらに共通に行なわれているのは、造形すべき対象物体の3次元数値データが与えられているとき、それをもとに、(x,y,z)座標軸、例えば軸方向、にそって輪切りにした薄い物体を逐次作成し、それらを積み上げた物として造形物を作成する。例えば、地形を考えたときに、等高線に沿って高さが低い部分から、光造形装置を利用して作成する。次に、その上により高度の高い部分を積み上げる形で作成する。

この手続きを繰り返して、初めに造形しようとしていた物体を作成する訳である。

このとき、以下のことが問題点として発生してくる。

- (1) CADから得られるデータは正しいか？
- (2) どの軸に関してスライスするのが望ましいか？
- (3) レーザーをどのように制御するのが造形物精度向上のために望ましいか？

我々の当初の目的は(3)であって、それは厚さの薄いスライス状の物体を作るためのデータの作成及びそのデータを基にレーザーの位置を制御するアルゴリズムおよびプログラム作成であった。レーザーの集光の形が樹脂表面において楕円形状であることを考慮に入れ、樹脂が固体あるいは硬化した段階で、指定した境界に密接に接続する形でアルゴリズムを作ることは予想よりも短期間で完成した。それとともに、研究対象が変化していった。

むしろ、そのとき我々の間で発生した疑問は、(1)であるが、CADから作成したデータが手入力の場合には誤っている可能性があるのではないかということであった。視覚的に入力したデータは計算機の中で確認する必要があるであろうということであった。また、(2)に関して

も、地形の場合には不要であるかも知れないが、本来的な3次元物体の場合には、スライス状にデータを作成する場合にどの座標軸で切るのがよいのか判定する必要があると考えられる。より正確な言い方をすれば、座標変換で適当な座標軸を求める必要があるということである。そこでは、レーザー移動量あるいはそれに伴う樹脂硬化に伴う変形量が最小化されるような座標軸である。ラピッドプロットタイピングという以上は、そのような計算をも、光造形装置のなかに組み込むべきであろうと考えられるようになった。

この光造形システムと計算機を結合することにより、我々の思考の中の3次元物体を数値データとして与えることにより、その実物を実際の造形物として手に入れるツールを手に入れることができるようになったことになる。当初は、造形物の数値データが与えられたときを出発点と考えていたが、CADから出発するのではなく、数式で与えられる、あるいは、最適化問題の解答として与えられる形状をこの装置によって作成することを視野に入れるとき、数値計算を実行しながら、その計算結果を最適な順序で取り出す事ができて、それを光造形装置で作成させる事ができるような計算能力のある計算機の必要性を感じた。

その結果、初期の目的である「光造形システム制御のためのソフトウェアアルゴリズムの開発」が終了していたこともあって、計算機で我々の光造形研究のための十分な処理能力のある計算機を試作することを目標にした。その際、処理能力とともに重要なことは従来よりも安価であることと光造形装置との一体化を今後の課題とすることから形状があまり大きくならないことをも考慮に入れる必要があった。

## 2. 並列処理計算機の試作

並列計算に関しては、これまでに様々な提案が各方面からなされてきている。我々は、それらを検討するなかで並列計算および分散処理に関して有益な示唆を得ることができた。そして、我々の目的を勘案し、PVMシステムを採用することにした。それは仮想並列計算システムとして、ネットワークで結ばれたコンピューターを単一の並列処理化する考えである。専用機材を用いないで並

列処理をするという考えである。そこには、様々なCPUが混在しているはずである。それらの状況を排除し、CPU能力を均一化し、専用のPVMシステムを構築することにより、処理速度の高速化と中小の製造業での光造形装置の連動環境を実現しようと考えた。

PVM (ParallelVirtualMachine) の開発および基本思想は、1989年から米国のオークリッジ国立研究所とテネシー大学で開始され、1991年に発表されたものである。1993年にはバージョン3がリリースされ、様々な領域に広範に広がり、現在も改良を重ねられている。PVMは移植性が高く、ハイパーキューブのような超並列マシンからメモリ共有型のマルチプロセッサのワークステーションまでの機種に移植されている。

PVM (ParallelVirtualMachine) システムとは、コンピューターネットワークに接続された複数の異なる機種のコンピューター群を、仮想の単一並列コンピューターシステムとして利用することを目的としたシステムソフトのことであって、これによって、多数の異なった能力と機種のコンピューターのもつ計算能力を単一のプログラム処理に集中して活用することが可能になる。PVMを利用することによって、コンピューターやそのオペレーティングシステムの差違を考慮せずに、同一のPVMのプログラミングインターフェイス環境で、共通のソースコードによる分散処理アプリケーションを作成可能な環境が実現できることになる。

この概念図にしたがって、CPUに能力差がない形で構成し、計算処理の負荷を均等に分散させる方式で高速化を実現できるという考えから、クリーンPVMシステムをローコストで実現するための試作をおこなった。

また、その際の仕様は以下のものである。

表1 試作機の仕様

仕様	
CPU	DEC社 Alpha21164A
CPU形式	64bitRISC
メインメモリバス幅	256bit
CPU数	2or4
メモリ容量	64から512MB
外部記憶装置	1.2から2.4GB
1次キャッシュ(オンチップ)	データキャッシュ8KB 命令キャッシュ8KB
2次キャッシュ(オンチップ)	96KB
3次キャッシュ(オンボード)	1or2MB
VRAM	2or4MB
ネットワーク	CPU間データ通信用 10/100BASET Fast Ethernet 4ポート PVMと外部データ通信用 10/100BASET Fast Ethernet 1ポート
CD-ROM	SCSI規格
フロッピーディスクドライブ	3.5インチ720KB/1.4MB
電源	100V
最大消費電力	800W
外形寸法	320(W),650(H),540(H)
重量	40KG

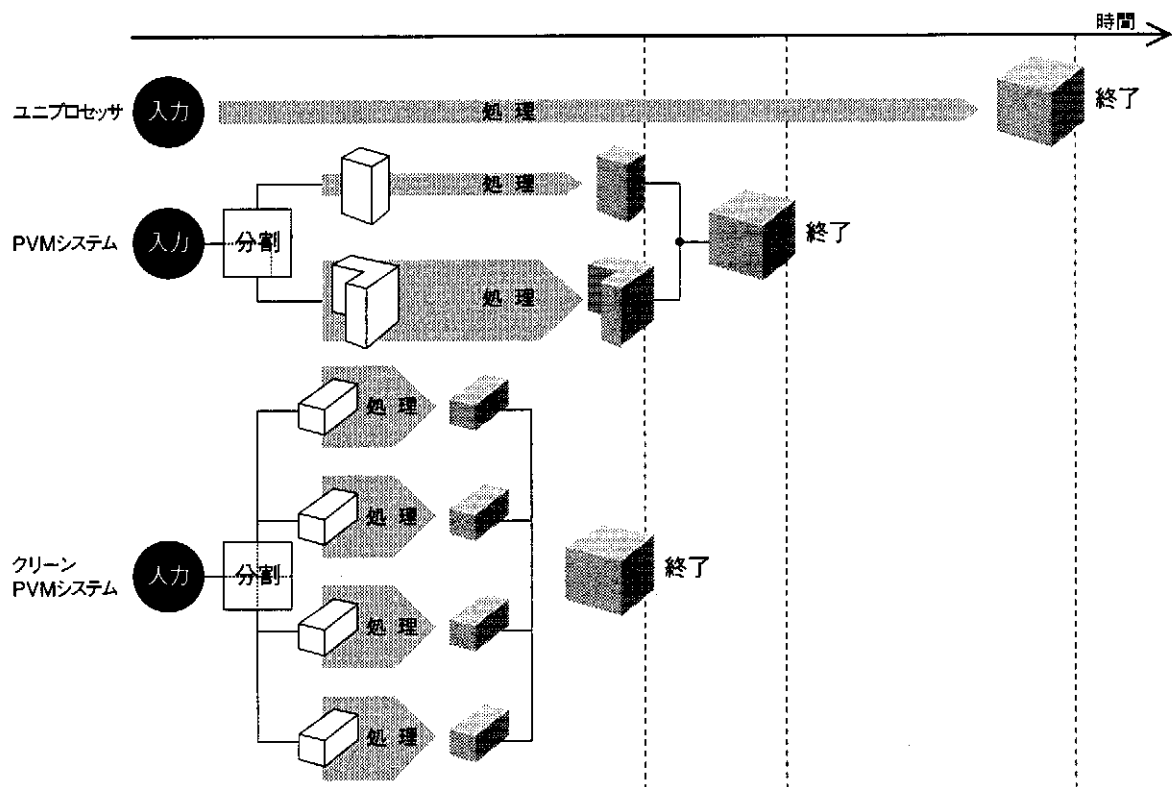


図1 LAN環境と処理能力

また、試作の際の撮影写真は以下のものである。

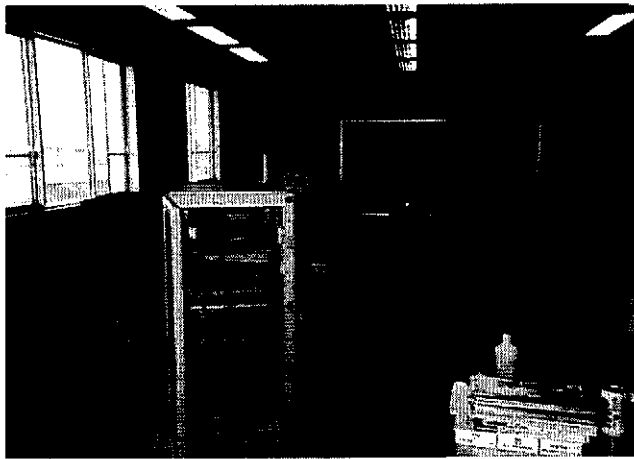


写真1

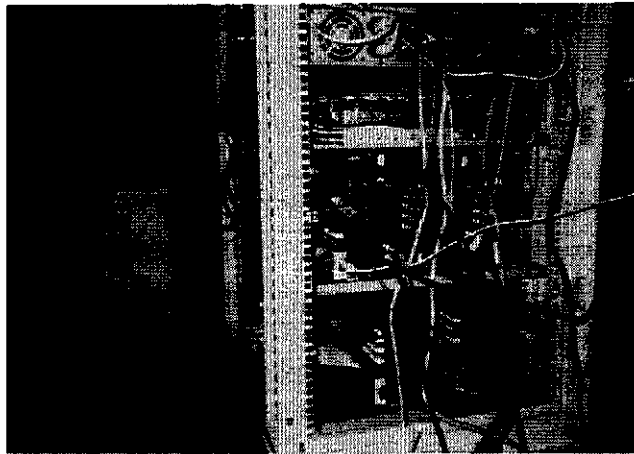


写真2

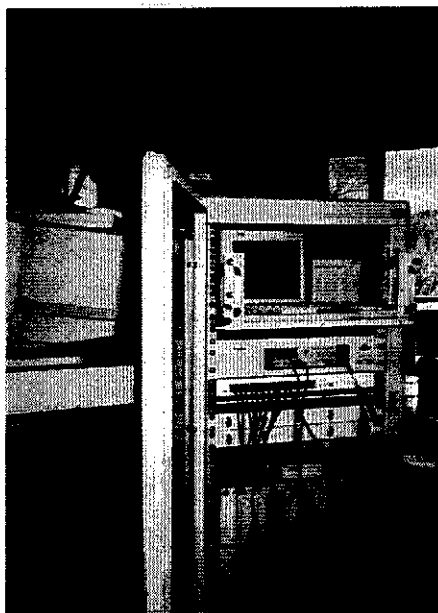


写真3

また、処理時間に関しては、連立一次方程式の計算を並列処理プログラミングを行ない実行した結果、次のような結果が得られた。(密な行列の場合で、メインタスク数1でサブタスク数4に固定したときの性能)

表2 計算結果

条件	CPU	ベンティアム150MHz			
	メモリ	32MB			
	ネットワーク	10BASE-T			
	OS	FREEBSD			
PVM数	1CPU	2CPU	3CPU	4CPU	
MATRIX数	1	1 (秒)	1	1	1
	2	2	1	1	1
	4	1	1	1	1
	8	4	2	1	1
	16	5	3	1	1
	32	33	6	7	2
	64	107	11	9	3
	128	221	19	19	18
	256	632	55	78	67
	512	1575	133	203	226
	768		600	387	437

注：4CPUの768マトリックスでは30秒程度のスワップ時間が含まれる

### 3. 積層による歪みモデルの構成と今後の課題

これまでは、並列計算機に重点をおいてきたが、それに関しては終了したため、今後は積層による歪みを考慮に入れた光造形のソフトウェアアルゴリズムを取り扱いたいと考えている。それは、レーザーの移動速度の反応に及ぼす影響を考えたいということであり、レーザーが移動するとき、動きはじめの加速状態と等速度のとき、あるいは減速して回転する場合に異なる影響を樹脂表面に与えることになる。それを解析し、その結果を歪み是正に適用したいと考えている。相当に複雑な計算量をかかえる課題であるが、計算の負荷に耐えられる計算道具をこれまでに準備してあることから、充分解決可能な問題であると考えている。また、このことに関して、レーザーが等速度で移動する場合のモデルを以下のように構成できる。今後は、レーザーが加速度運動あるいは反転の場合を構築し、実験的確認を実行すればよいと考えている。以下では、単純な等速度移動の場合を説明する。

光の強度をIとすると、重合反応量は

$$P = \frac{bI}{1+aI}$$

で近似されるものとしておく。

それは、以下のような理由からである。重合反応速度は、光の強度に比例するとともに、未反応な樹脂量にも

比例する。したがって

$$\frac{dP}{dt} = \alpha I \left(1 - \frac{P}{K}\right)$$

の微分方程式で支配されると考えられる。ここで、Kは反応されるべき樹脂の総量である。これを積分して

$$P(t) = K - C \exp\left[-\frac{\alpha I t}{K}\right]$$

また、時刻 $t=0$ では反応が始まらないものとして $P(0)=0$ の初期条件を考慮して

$$P(t) = K - K \exp\left[-\frac{\alpha I t}{K}\right]$$

である。これを、一定時間内で光の強度Iの関数と考えて

$$P = \frac{bI}{1 + aI}$$

で近似する事にする。

樹脂の表面を基準にその深度をxで表すこととして、光の樹脂の内部における強度は

$$I(x) = I_0 \exp[-cx]$$

と考えられる。これは一定の光の吸収率 $c>0$ で光の強度が減衰して行くことを表している。

$I_0$ は樹脂表面に置く光の強度の変化を表している。樹脂の表面の一点において、レーザー光から与えられる光強度であるから、その集光が楕円形になることから、その時間が十分にわずかであるとしても（それをTとしておく）、

$$I_0 = I_0(t) \quad (0 \leq t \leq T)$$

であたえられる。つまり、 $t=0$ で樹脂表面の一点を通過し始め、 $t=T$ でその点を通過し終わるわけである。

$0 \leq x \leq y$ の深度の部分で重合反応を行なう部分とすると、光のエネルギーを外部から供給された部分は固体化のために、そのエネルギーを消費するとともに、熱としても消費することになる。その単位面積あたりの熱発散率を一定 ( $\alpha \neq 0$ ) と仮定し、熱の放出はその硬化物体の表面積に比例するものとするとき、その熱放出は十分に長い時間 $0 \leq t \leq T < T_0$ の間に行なわれるとして、樹脂が固体化するためのエネルギー量 (F) は

$$\begin{aligned} F &= \int_0^\infty \int_0^y (P(x,t) - \alpha y) dx dt \\ &= \int_0^T \int_0^y \frac{bI_0(t)e^{-cx}}{1 + aI_0(t)e^{-cx}} dx dt - \alpha y^2 T_0 \end{aligned}$$

によって与えられる。

レーザー光の効率的利用という側面から考えると、このFが最大となる樹脂硬化深度yが最も望ましいものであると考えられる。そのため、この関数をyの関数と考えることにする。したがって、

$$\frac{dF}{dy} = \int_0^T \frac{bI_0(t)e^{-cy}}{1 + aI_0(t)e^{-cy}} dt - 2\alpha y T_0$$

ここで

$$\begin{aligned} \lim_{y \rightarrow 0} \frac{dF}{dy} &= \int_0^T \frac{b}{1+a} dt > 0 \\ \lim_{y \rightarrow \infty} \frac{dF}{dy} &< 0 \end{aligned}$$

であって

$$\frac{d^2 F}{dy^2} = \int_0^T \frac{-cbI_0(t)e^{-cy}}{(1 + aI_0(t)e^{-cy})^2} dt - 2\alpha T_0 < 0$$

であるから $\frac{dF}{dy}$ は単調減少関数である。したがって、 $y=y_0$ が存在して、 $P(y_0)$ は最大となる。このとき

$$\frac{dF}{dy} = \int_0^T \frac{bI_0(t)e^{-cy_0}}{1 + aI_0(t)e^{-cy_0}} dt - 2\alpha y_0 T_0 = 0$$

つまり

$$\int_0^T \frac{bI_0(t)e^{-cy_0}}{1 + aI_0(t)e^{-cy_0}} dt = 2\alpha y_0 T_0$$

となる $y_0$ である。

いま、光の樹脂表面に照射するレーザーの集光した形が楕円であることを考慮してそれを

$$I_0(t) = I_0 \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \quad (0 \leq t \leq T)$$

とすると、上の積分の左辺は

$$\int_0^T \frac{bI_0(t)e^{-cy_0}}{1 + aI_0(t)e^{-cy_0}} dt = \int_0^\pi \frac{T}{\pi} \frac{B \sin x}{1 + A \sin x} dx$$

また

$$\begin{aligned} &\int_0^\pi \frac{B \sin x}{1 + A \sin x} dx \\ &= \frac{2B}{A\sqrt{-1+A^2}} \left( \tanh^{-1} \left( \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2}\right) + a}{\sqrt{-1+A^2}} \right) - \tanh^{-1} \left( \frac{\tan\left(\frac{\pi}{2}\right)}{\sqrt{-1+A^2}} \right) \right) \\ &\quad \frac{2B}{A\sqrt{-1+A^2}} \left( + \tan^{-1} \left( \tan\left(\frac{\pi}{2}\right) \right) \sqrt{-1+A^2} \right) \end{aligned}$$

ただし、ここで

$$A = aI_0 \exp[cy_0], B = bI_0 \exp[cy_0]$$

である。

計算結果をわかりやすくするために、より単純な形で近似する。

$$I_0(t) = I_0 \left( \frac{2}{T} \right) t \quad (0 \leq t \leq \frac{T}{2})$$

$$I_0(t) = I_0 \left( \frac{2}{T} \right) (T - t) \quad (\frac{T}{2} \leq t \leq T)$$

とすると

$$\begin{aligned} & \int_0^T \frac{bI_0(t)e^{-cy_0}}{1 + aI_0(t)e^{-cy_0}} dt \\ &= \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{B \left( \frac{2}{T} \right) t}{1 + A \left( \frac{2}{T} \right) t} dt + \int_{\frac{T}{2}}^T \frac{B \left( \frac{2}{T} \right) (T - t)}{1 + A \left( \frac{2}{T} \right) (T - t)} dt \\ &= \frac{B}{A} T - 2 \frac{B}{A^2} \log \left( 1 + A \frac{T}{2} \right) \end{aligned}$$

したがって

$$\frac{B}{A} T - 2 \frac{B}{A^2} \log \left( 1 + A \frac{T}{2} \right) = 2\alpha y_0 T_0$$

である。この右辺は $T_0$ は $T$ と比較して充分大きいとして、左辺が一定である範囲でさだまるものとするれば、光の移動速度できまる $T$ によって、

反応を起こす樹脂の深さは対数的な変化をもたらすものといえる。

以上のモデルによる解析から、レーザーの移動速度の反応深度に及ぼす影響は対数的であることがわかった。今後は、造形のさいのレーザーの移動において速度変化を起こす箇所を調べつくし、その中で歪みを最小とする移動パターンを計算機により検出することが次の課題である。それは困難な課題ではなく、実現可能な課題である。

## 参考文献

丸谷洋二、大川和夫、早野誠治、斉藤直一郎、中井孝  
光造形法日刊工業新聞社¥1990

天野英晴並列コンピューター昭晃堂 1996

Al.Geist,A.Beguelin,J.Dongarra,W.Jiang,R.Manckek,V.S  
underarm

PVM3ユーザズガイド&リファレンスマニュアル1994