

TR-O-0129

29

リアルタイムレーザマイクロビジョン

下田平 寛

1996. 3.15

ATR光電波通信研究所

リアルタイムレーザマイクロビジョン

目次

1. はじめに	1
2. 従来のレーザマイクロビジョン	1
2.1 レーザマイクロビジョンの構成要素と動作	1
2.2 リアルタイム化実現のための課題	2
3. リアルタイムレーザマイクロビジョン	2
3.1 高速波長可変光源	2
3.2 並列処理化	2
3.3 実験例	3
4. まとめ	3

1 はじめに

当研究所で開発中のレーザマイクロビジョンは、 $1\ \mu\text{m}$ オーダの3次元構造を持つ物体内部を非接触、非破壊で診断、検査することを目的としたレーダの一種である。通常のレーダでは、物体にパルスを照射してエコーの遅延時間、すなわちインパルス応答を測定することにより物体内部の反射点位置を検出する。しかしこのパルス法(時間領域法とも呼ばれる)で μm オーダの空間分解能(定義 1.1)を得るには、時間幅およそ 10^{-15} 秒のパルスを発生させる複雑な光学系が必要となるため実用化には適さない。

定義 1.1 空間分解能：或る測定法によって分離識別可能な二反射点間の最小距離を測定法の空間分解能といい、記号 Δx で表す。簡単のため本論文では分解能とも呼ぶ。

そこで、レーザマイクロビジョンでは、上記インパルス応答とフーリエ変換の関係で結ばれる周波数応答を測定した後、信号処理によってインパルス応答を構成する周波数領域法を採用した。本測定法実現の鍵となる波長可変光源には半導体レーザを利用できるので、パルス法と比較して低価格で $10\ \mu\text{m}$ オーダの分解能を有するコンパクトな装置を実現可能となる($1\ \mu\text{m}$ オーダの分解能を実現するための信号処理法については [1][2] を参照)。

レーザマイクロビジョン実用化のためには、高分解能化と共に測定、物体像表示のリアルタイム化が必要である。本論文では物体2次元断面像を数秒以内で測定、表示可能なリアルタイムレーザマイクロビジョンの実現に関して述べる。第2節で、従来のレーザマイクロビジョンの構成、および測定から物体像表示までの流れを説明し、リアルタイム化実現のための課題を指摘する。第3節でトロント大学で開発されたリアルタイムステップ周波数レーダと、NTT光エレクトロニクス研究所で開発された高速波長可変光源を応用したリアルタイムレーザマイクロビジョンについて述べる。第3.3節では構築したシステムの実験例を交えて紹介する。

2 従来のレーザマイクロビジョン

2.1 レーザマイクロビジョンの構成要素と動作

レーザマイクロビジョンの構成要素と各要素の機能を下表に示す。

構成要素	機能
1. 波長可変光源	互いに異なる波長を有する複数個の光を発生
2. 干渉光学系	測定対象物からの反射光の振幅、位相をヘテロダイン干渉法により測定
3. 信号処理系	振幅、位相データから物体像を構成
4. 全体の制御系	全体の制御と物体像の表示

表 1: レーザマイクロビジョンの構成要素と各部の機能

これらの構成要素を用いて、データ測定から物体像表示までの流れを以下に示す。

step 1. 測定条件の設定 測定対象物に照射する光の波数範囲 $k_1 \leq k < k_2$ 、および波数ステップ数 N を決定。照射光は、波数 k_1 を始点に等波数間隔 $\Delta k = (k_2 - k_1)/N$ ずつ、ステップ状に変化させる。ここで波数 k は波長 λ と $k = 2\pi/\lambda$ の関係で結ばれる物理量。

step 2. 振幅、位相データの測定 波数 $k_i = k_1 + i \times \Delta k$, $i = 0, 1, \dots, (N-1)$ の光を物体に照射して、反射光の振幅 $a(i)$ 、位相 $\phi(i)$ を測定。

step 3. 物体像の構成 各波数 k_i において測定された複素振幅 $z(i)$

$$z(i) = a(i) \exp(\sqrt{-1}\phi(i)), \quad i = 0, 1, \dots, (N-1)$$

を元に、位置 $x_j = j \times \Delta x$, $j = 0, 1, \dots, (N - 1)$, ただし $\Delta x = \pi / (N \Delta k)$ における反射率 $r(j)$ を

$$r(j) = \sum_{i=0}^{N-1} z(i) \exp\left(\sqrt{-1} \frac{2\pi}{N} ij\right), j = 0, 1, \dots, (N - 1) \quad (1)$$

により計算. 式 (1) の評価は, 高速フーリエ変換法 (FFT: Fast Fourier Transform) を用いて高速に実行可能.

step 4. 物体像の表示 物体像, すなわち反射率分布 $r(j)$, $j = 0, 1, \dots, (N - 1)$ を表示.

付記 ヘテロダイン干渉法による反射光位相の測定

図 1 にヘテロダイン干渉光学系の実施例を示す. 測定に用いる光の波長を λ と置く. 光路 1 (プローブ光: 実線), 2 (参照光: 破線) を伝搬する光の間には音響光学変調器 (AOM: Acousto Optic Modulator) によって, その駆動周波数に等しい周波数差 Ω が付与されている. これらを合波することにより得られる周波数 Ω の信号と AOM の駆動信号との位相差 ϕ を測定する. ϕ が反射光の位相, より正確には光路 1, 2 を伝搬する光の間の位相差となる. 1, 2 の光路長差 $\Delta l < \lambda$ の場合, 位相差 $0 \leq \phi < 2\pi$ と $0 \leq \Delta l < \lambda$ が一対一に対応するので, 一波長以下の光路長差をも高い精度で測定することが可能になる.

2.2 リアルタイム化実現のための課題

従来のレーザマイクロビジョンにおける測定時間の大半は, 上記 step2 において波数をステップ状に変化させることに費されている. これは測定に用いる波長可変光源がレーザの共振器長を機械的に変化させることにより発振波長を制御する方式を採るためである. 高速に波長を変化させるためには, 共振器長を電気的に変化させる機構を実現する必要がある.

次に測定対象物の 2 次元断面像を観察するために, プローブ光の照射点を走査しながら測定, 像表示を行う状況を考える (図 2-(a)). 従来のレーザマイクロビジョンでは上記 step2, 3, 4 が直列的に行われるため, 処理の流れをタイムチャートに示すと図 2-(b) となる. これを図 2-(c) に示すように並列処理することができれば大幅な測定, 表示時間短縮化が達成されることになる.

以上をまとめると, リアルタイムレーザマイクロビジョン実現のためには

- 1 高速波長可変光源の開発
- 2 データ測定, FFT 処理, および像表示の並列処理化

が必要であることが分かる.

3 リアルタイムレーザマイクロビジョン

3.1 高速波長可変光源

NTT 光エレクトロニクス研究所では, 半導体レーザ (LD: Laser Diode) 活性領域の前後に周期的変調を施した回折格子 (SSG: Super Structure Grating) を設け, SSG への注入電流を制御することで LD 共振器長を電気的に変化させる方式により, 高速, 広帯域の波長可変光源 (SSGLD) を実現した [3]. 当研究所では, SSGLD の考案者である NTT 光エレクトロニクス研究所吉国博士のご厚意により SSGLD をレーザマイクロビジョンの光源として使用させていただいた.

3.2 並列処理化

レーザマイクロビジョンに関する共同研究を行っているトロント大学は, 地中探査レーダへの応用等を目的としてマイクロ波領域において第 2 節, step1~4 を高速に実行可能なリアルタイムステップ周波数レーダ (RTSFR: Real Time Step Frequency Radar) の開発実績を持つ [4]. 本装置をレーザマイクロビジョンの測定, 制御部として用いることにより課題である並列処理化を実現する.

図 3 に RTSFR とヘテロダイン干渉光学系を組合せたリアルタイムレーザマイクロビジョンの構成を示す. RTSFR の構成要素と各部の機能を下表に示す. リモートからホストへのデータ転送は両コンピュータ

に搭載された SCSI (Small Computer System Interface) 制御器が担当する。また、FFT 処理はホストに搭載された DSP (Digital Signal Processing) ボードにより行う。したがって、データ転送、FFT 処理の間も両コンピュータの CPU (Central Processing Unit) は測定や像の表示といった他の処理を実行することが可能となっている。図 4 に本システムにおける並列処理のタイムチャートを示した。構成したリアルタイムレーザマイクロビジョンは、周波数ステップ数 128 点の場合、30 msec 毎に物体像、すなわちプローブ光照射点における深さ方向の反射率分布を測定、表示する性能を持つ。

構成要素	機能
ホストコンピュータ	FFT 処理, 物体像の表示
リモートコンピュータ	ヘテロダイン検波装置および SSGLD の制御
ヘテロダイン検波装置	AOM 駆動信号の発生, 受信信号のヘテロダイン検波 (反射光の振幅, 位相の検出)

表 2: RTSFR の構成要素と各部の機能

3.3 実験例

本節では、リアルタイムレーザマイクロビジョンを用いた実験例を紹介する。下表に示す実験条件の元で、一走査線当たりの測定に 4 秒、すなわち対象物の 2 次元断面像を得るのに要する時間が 4 秒、これを 80 回繰返して物体の 3 次元像を測定するのに約 5 分を要する。図 5 に 3 次元像測定の流れを示した。ホストコンピュータ上には、一走査毎に走査線下における 2 次元断面像が表示される。80 本分の測定結果をまとめてワークステーション (WS) 上で表示する。図 6, 7 にそれぞれ GaAs (111)A 面上に作成された LD 電極パターン、マイクロ波集積回路電極パターンのレーザマイクロビジョンによる測定結果を示す。(a), (b), (c) は測定対象の顕微鏡写真、レーザマイクロビジョンにより得られた (a) の像、WS 上に表示した 3 次元像である。

波長掃引範囲	1.53 ~ 1.56 μm
波数ステップ数	128 点
一走査線当たりのサンプリング点数	128 点
走査線本数	80 本

表 3: 実験条件

4 まとめ

リアルタイムステップ周波数レーダと SSGLD を利用したリアルタイムレーザマイクロビジョンの構成と実験例を示した。構築したシステムは物体 2 次元断面像を 4 秒以内で測定、表示する性能を持つ。本研究によりレーザマイクロビジョンはその実用化に向けて大きく前進したものと考えられる。

謝辞 SSG-LD を御貸与いただいた NTT 光エレクトロニクス研究所吉国博士に感謝いたします。日頃御指導頂くトロント大学飯塚教授, Sun-Chun Chu 氏, 北海道大学大鐘助教授, ATR 光電波通信研究所猪股社長, 小川室長に感謝いたします。測定試料を作成していただいた大西研究員と有益な議論をしていただいた多賀研究員に感謝いたします。

参考文献

- [1] 下田平, “レーザマイクロビジョンの信号処理,” ATR テクニカルレポート
- [2] 多賀, “レーザマイクロビジョンの高速高分解能信号処理法,” ATR テクニカルレポート, TR-O-0106

- [3] 石井, 田野辺, 近藤, 吉国, 狩野, 東盛, “SSG-DBR レーザの疑似連続波長可変性,” 信学技報 OPE94-111(1995-02)
- [4] Sun-Chun Chu, “Real Time Step Frequency Radar,” Master Thesis in the department of Electrical Engineering, University of Toronto, 1992.

図索引

- 図 1 ヘテロダイン干渉光学系の実施例.
- 図 2 物体 2 次元断面像測定時の直列処理と並列処理.
- 図 3 リアルタイムレーザマイクロビジョンの構成.
- 図 4 リアルタイムレーザマイクロビジョンにおける処理の並列化.
- 図 5 3 次元像測定の流れ.
- 図 6 GaAs (111)A 面上に作成された LD 電極パターンの測定結果
- 図 7 マイクロ波集積回路電極パターンの測定結果

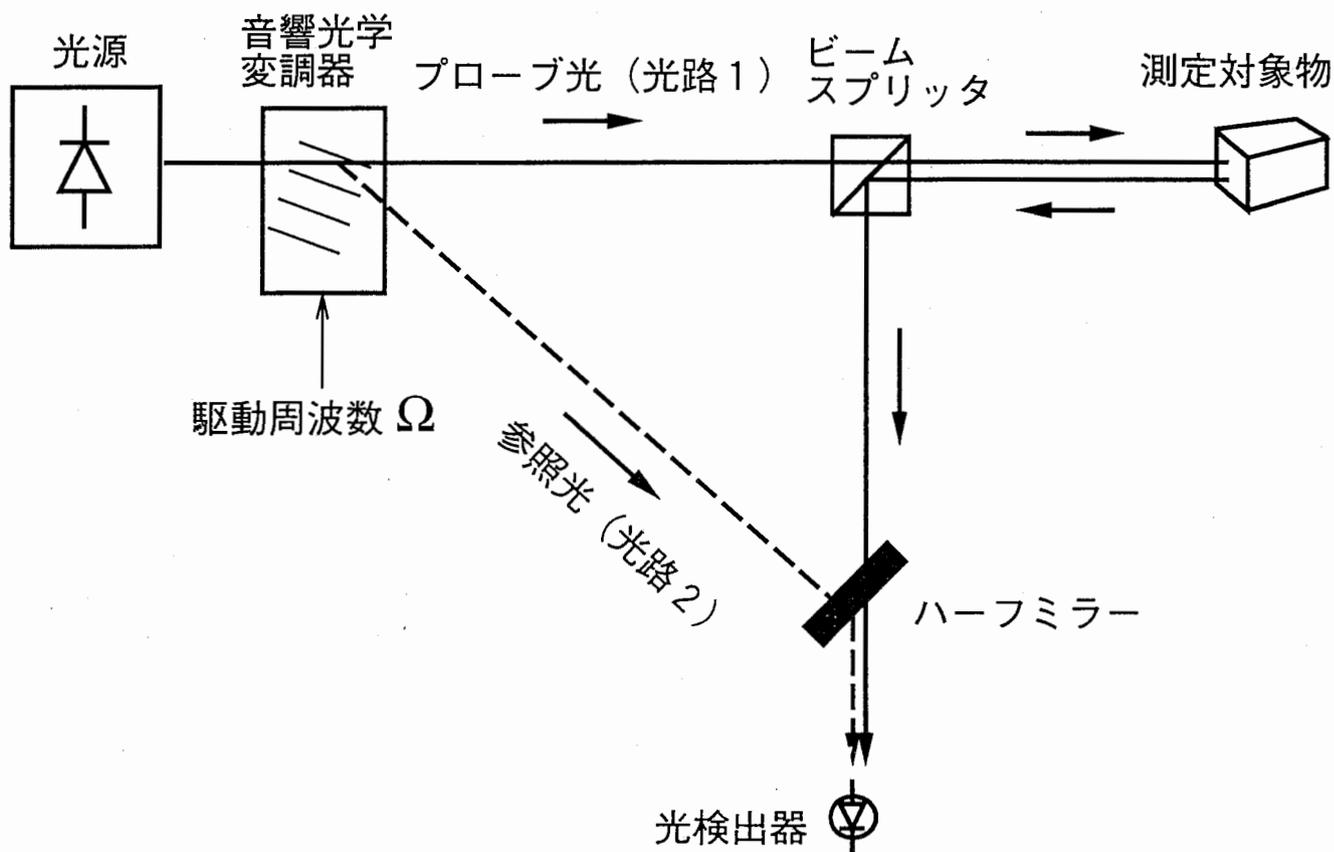
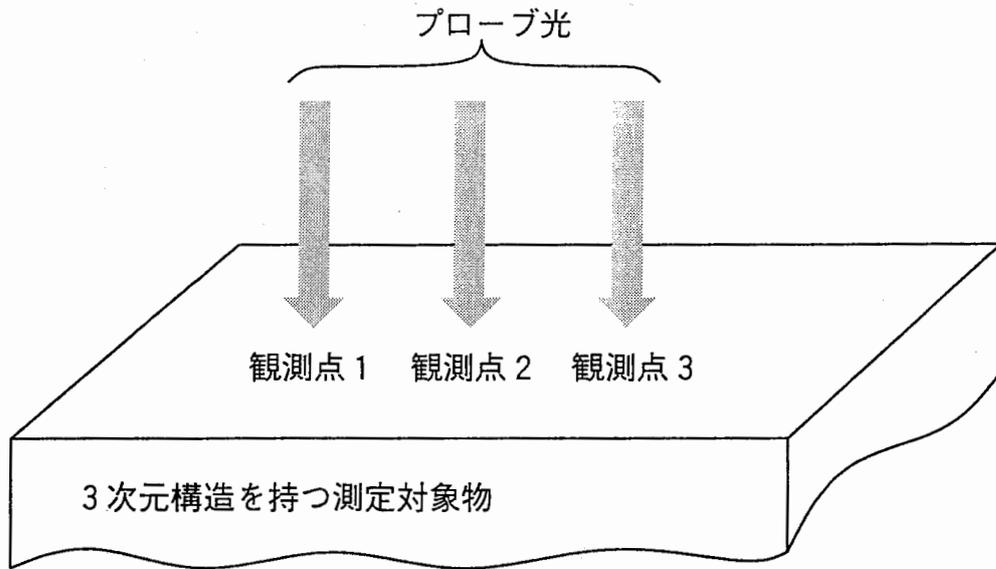
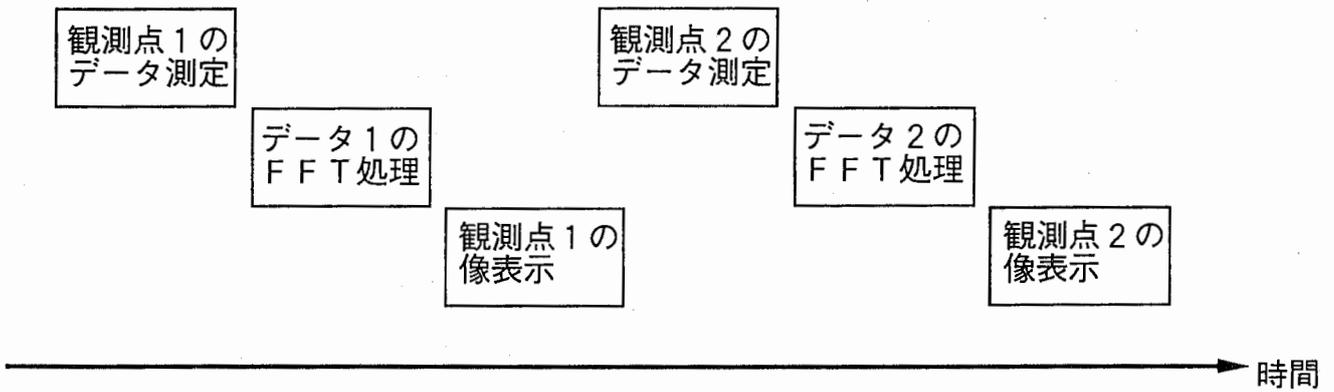


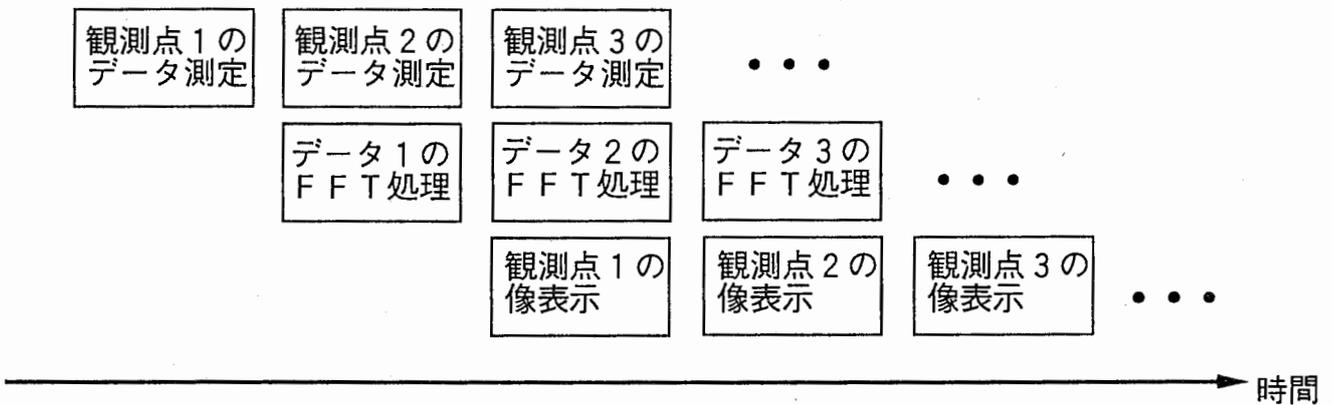
図1：ヘテロダイン干渉光学系の実施例



(a) プローブ光照射位置を走査しながら測定する



(b) 従来のレーザマイクロビジョンにおけるタイムチャート、直列処理



(c) 並列処理のタイムチャート

図 2 : 物体 2 次元断面像測定時の直列処理と並列処理

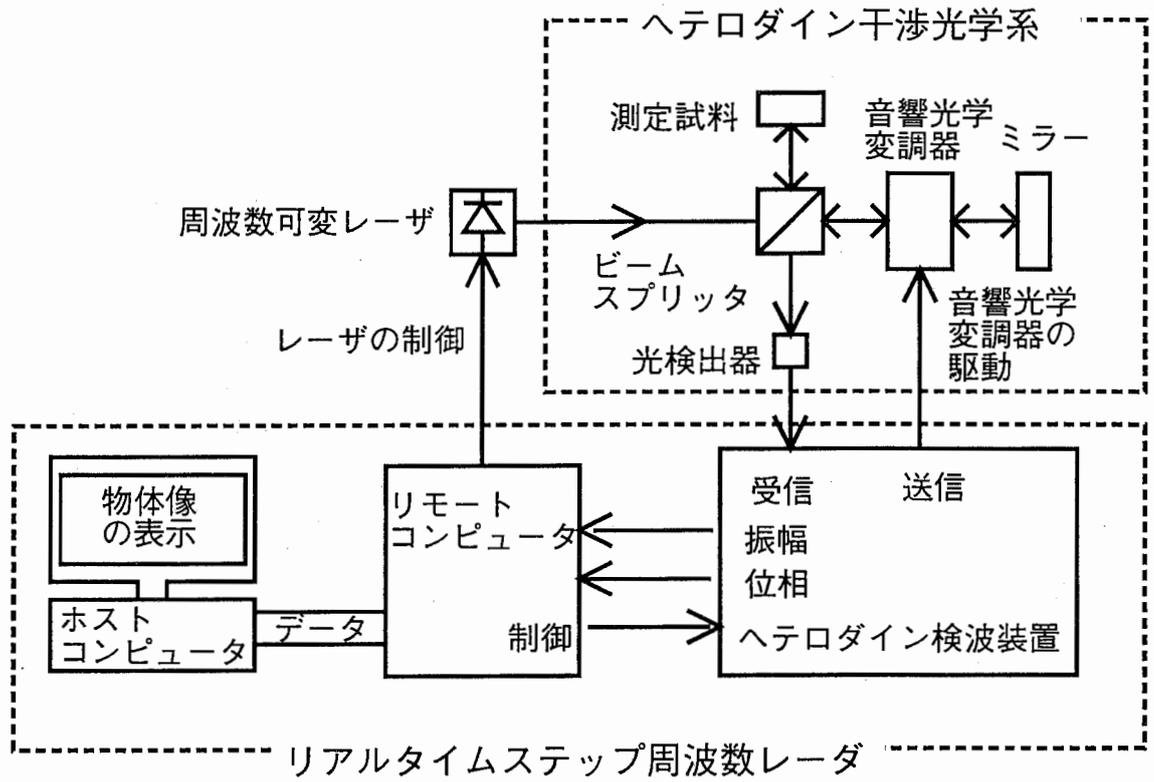


図3：リアルタイムレーザマイクロビジョンの構成

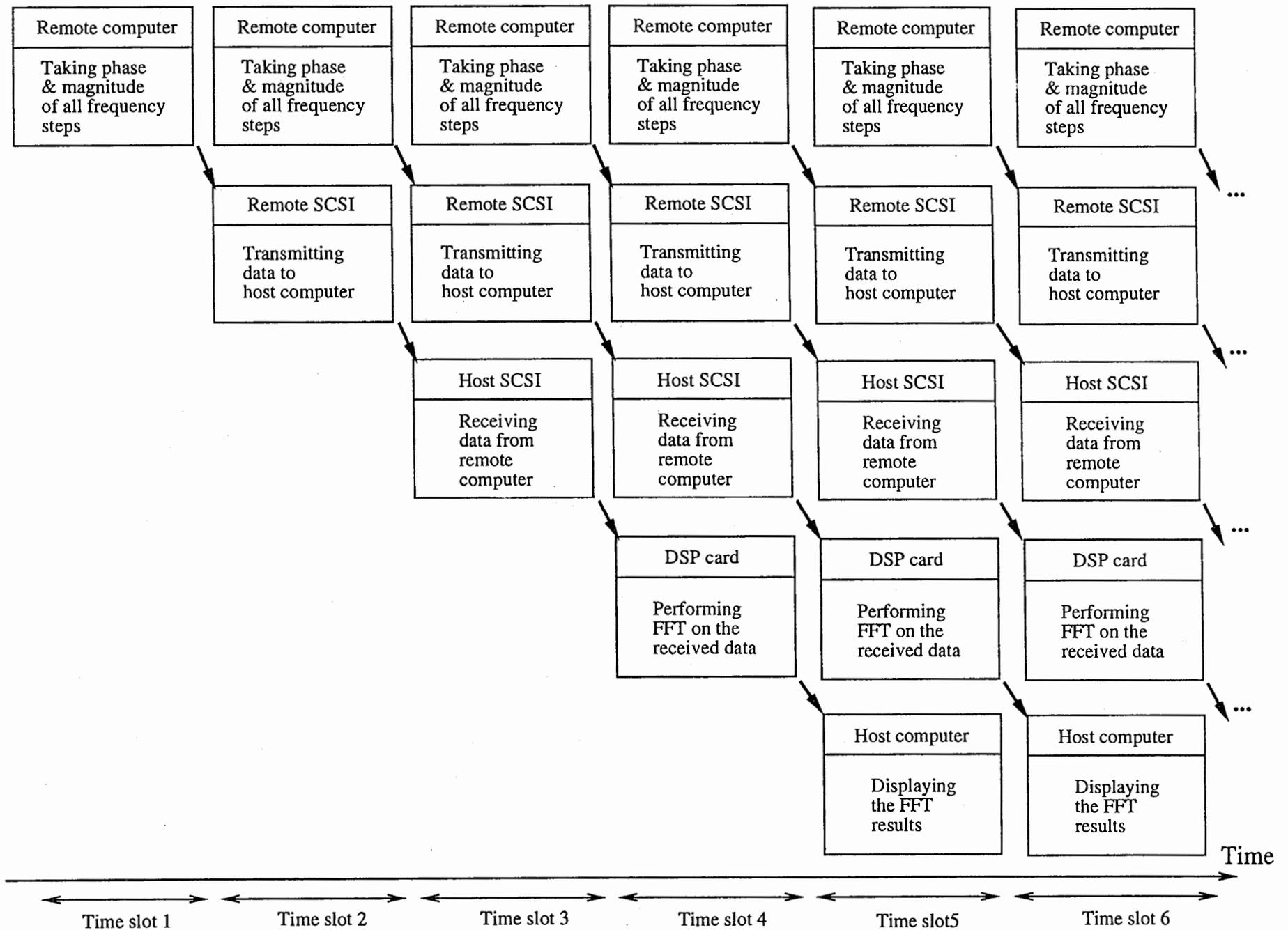
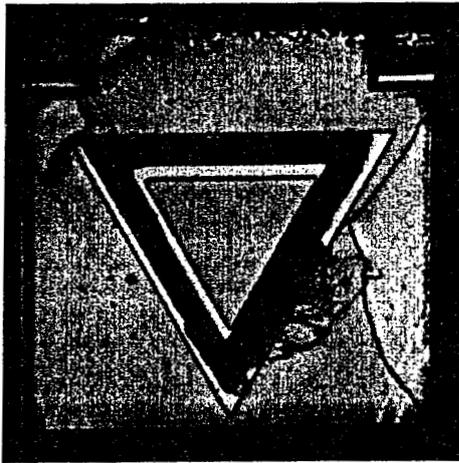
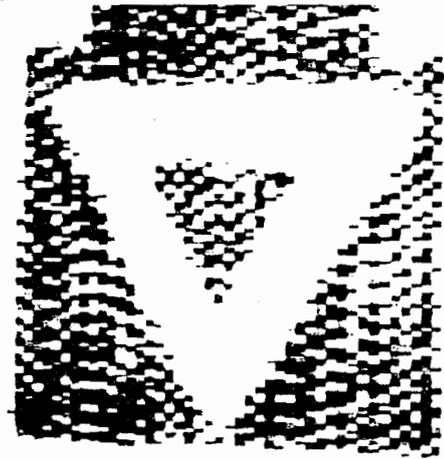


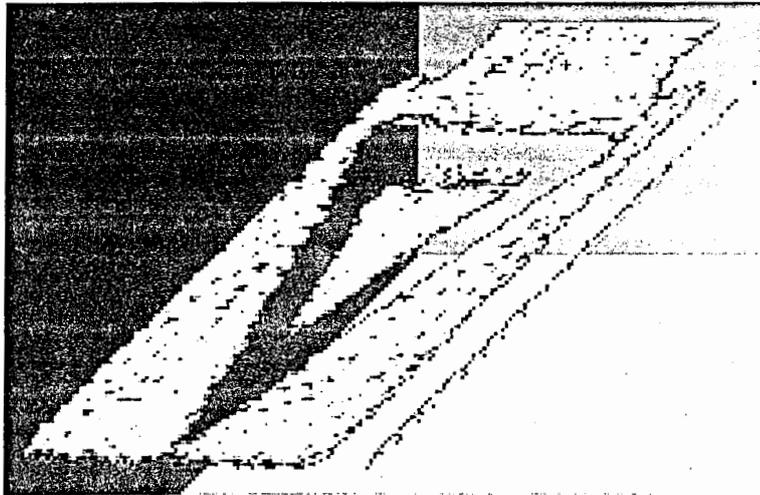
図 4 : リアルタイムレーザマイクロビジョンにおける処理の並列化



| ← 500 μm → |

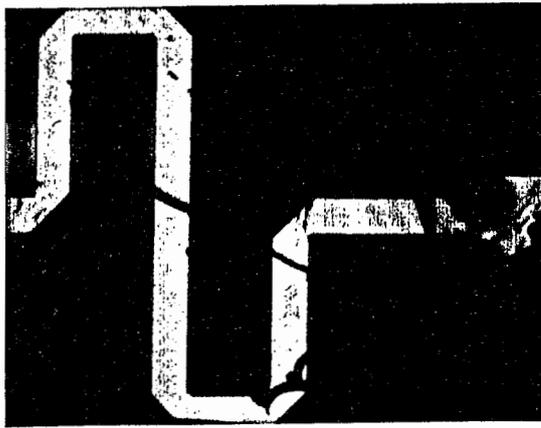


(a) GaAs (111)A 面上に作成された LD 電極パターンの顕微鏡写真 (b) レーザマイクロビジョンにより得られた (a) の像



(c) WS 上での 3 次元像の表示

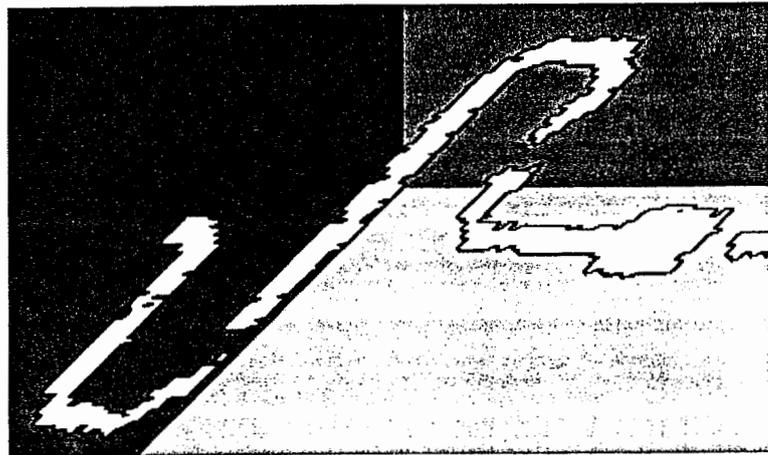
図 6: レーザマイクロビジョンによる GaAs (111)A 面上に作成された LD 電極パターンの測定結果



(a) マイクロ波集積回路電極パ
ターンの顕微鏡写真



(b) レーザマイクロビジョンにより
得られた (a) の像



(c) WS 上での 3 次元像の表示

図 7: レーザマイクロビジョンによるマイクロ波集積回路
電極パターンの測定結果