

サインスリットによる時空間画像から 3D 直線の抽出

汪平涛 池内克史 坂内正夫
東京大学大学院工学系研究科
wang@sak.iis.u-tokyo.ac.jp

3次元時空間画像から各種のスリットでこれを切断することにより2次元時空間画像を生成できる。生成された2次元時空間画像はより少ないデータでありながらも、時間情報と空間情報を含むため、元の3次元情報を復元することが可能である。

本稿では、3次元時空間画像から2次元時空間画像への生成理論を示し、3次元直線の2次元時空間画像への射影変換を説明する。さらに、2次元時空間画像上の点と3次元直線のパラメータの間の線形関係を利用し、2次元時空間画像より3次元直線のパラメータを推定する手法を提案する。特に、パラメータの推定が最小2乗法で行われるので、最小2乗法により生成された行列の条件数が最後の推定精度を左右する。このことより、3次元時空間画像から2次元時空間画像への変換は2次曲線スリットよりもサインスリットで行われる方が良いとの結論も導く。最後、提案する手法の有効性を実験結果とともに示す。

3D Line's Extraction From 2D Spatio-temporal Image Created by Sine Slit

Pingtao Wang Katsushi Ikeuchi Masao Sakauchi

University of Tokyo

wang@sak.iis.u-tokyo.ac.jp

This paper describes a new method for extracting 3D line parameters from a three-dimensional(3D) Spatio-Temporal Images(STIs). This method assumes that images are densely sampled so that its temporal continuity from a frame to next frame is approximately equal to the spatial continuity in an individual image. The method utilizes the knowledge of camera motion to slice a 3D STI with a given slit, thereby forming a two-dimensional(2D) STI which contains much less data than that of the original 3D STI. The significant 3D lines in the scene can be reconstructed from only one 2D STI without the corresponding process, which is necessary in general methods based on 3D STI. For lateral camera motions, a 2D STI has a linear structure in 3D line parameters that makes them easier to analyze. The process computes the position and direction vectors of 3D lines and determines all their apexes. In this paper, we first describe the creation of a 2D STI from a 3D STI and the loci of 3D lines in the 2D STI, then give the algorithm for calculating 3D line parameters from the 2D STI. We also describe that the condition number of a measure matrix will affect the solution of a linear equations, and that better results can be obtained with a sine slit than a quadratic curve slit. Some experimented results on both synthetic and real images are presented to verify the effectiveness of the method.

1 はじめに

画像の系列或は動画から3次元情報の復元に
関しては種々の提案がある。例えば、Tomasi と
Kanade[1] らは正投影に基づく因子分解法を利用
して、動画から3次元物体の形状とカメラの運動を
ロバストに復元した。Azarbayejani と Pentland[2]
らは画像の系列上の特徴の対応によって、形状と
カメラの運動及び焦点距離を計算できる回帰的な
アルゴリズムを提案した。他に多くの手法も提案
されている [5]。

一般的に、カメラから撮った一つの2次元画像
に含まれている情報は、3次元シーンの回復に対
しては不十分である。そこで、カメラの移動によ
って得られた動画または複数のカメラからのステ
レオ画像から3次元シーンを復元しなければならない。
3次元時空間画像は、カメラから撮った画像を
時間順に並べて得られたものであり、且時間軸
の連続性がほぼ画像の空間上の連続性と同じである。
ただ、3次元時空間画像は3次元シーンの復元
としては情報が十分である一方、データ量が多い
ため、処理には時間がかかる。

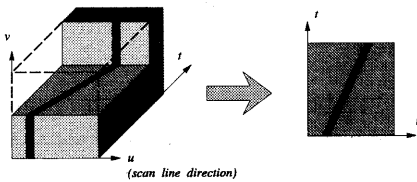


図 1: EPI: sliced STI

複数の画像を処理するには、画像間の特徴の対
応付けが不可欠である。難しい対応付けを避けるた
め、Bolles と Baker らは3次元時空間画像を多くの
EPI(Epipolar-Plane Image) 画像へ変換してか
ら3次元シーンを復元する方法を提案した [3][4]。
一つのEPI 画像は3次元時空間画像の平面による
スライスだと考えてよい(図 1)。3次元空間の点
は、EPI 画像上に軌跡を残し、ある種のカメラの
運動によりその軌跡は直線になる。この軌跡によ
り、カメラから3次元点までの距離が計算できる。
これらのEPI 画像を解析することによって、3次
元シーンを再構築することができる。この手法は、
3次元点の復元を2次元のEPI 画像上の直線の抽
出に変更することによって、処理は簡単になる一

方、データ量が全く減少せず、且復元できるのは
3次元の点だけである。3次元の直線の抽出は、3
次元空間で行わなければならない。

本稿では、カメラがシーンに対して横方向に平
行移動する場合、得られた3次元時空間画像から3
次元空間の直線分の復元する手法を検討する。複
数の画像から3次元空間の直線分の抽出手法は多
く提案されているが、いずれも画像の系列上の直
線分の対応付けは不可欠である [7] [6]。この直線分
の対応付けと追跡は普段容易ではない。簡単のため、
ここで提案する手法はEPI 手法と同じく、カメラ
の姿勢が既知的であるとする。この場合、シー
ンの形状とカメラの運動の同時解析ではなく、シー
ンの形状だけの復元を目的とする。ただし、抽出
するのはEPI 手法のような3次元点ではなく、3
次元空間の直線分である。そのため、EPI 画像の
ように平面を切るのではなく、カメラの全ての走
査線と交差する曲線スリットを採用し、3次元時
空間画像を2次元時空間画像へ変更する。これによ
り、シーンの全ての特徴を捕まえることができる。

生成された2次元時空間画像から3次元直線の
パラメータの推定は、基本的には2次元時空間画像
をセグメント化してから最小2乗法で行われる。一
方、最小2乗法でパラメータを推定する場合、パラ
メータの推定誤差は推定行列の条件数 (condition
number) に大きく左右される。ここで、推定行列
はスリットの形に依存するため、推定誤差を小さ
くするようなスリットを求めて、図 2に示すような
サインスリットを提案する。

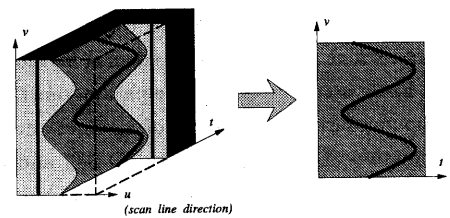


図 2: Sliced STI with sine slit

本稿では、第 2節で3次元時空間画像から2次
元時空間画像への一般的な変更手法を述べるとと
もに、2次元時空間画像から3次元空間の直線分
のパラメータの抽出方法を説明する。第 3節は、3
次元直線パラメータの推定行列の条件数により、ス
リットの選択を論じる。第 4節は幾つかの実験を挙

げて、提案する手法の有効性を証明する。最後に第5節で結論をまとめる。

2 3次元時空間画像から2次元時空間画像への変換

この節では、座標系とスリットの一般的な表現を与えると共に、3次元直線の2次元時空間画像への射影を解明しながら、2次元時空間画像より3次元直線パラメータの推定手法を提案する。

2.1 座標系と像平面への3次元点の射影

図3に示すように、ワールド座標は $OXYZ$ とし、カメラの向きを X 軸、移動方向を Z 軸とする。点 O はカメラの初期位置である。平面 cuv はカメラの像平面で、 f はカメラの焦点距離である。カメラの小さいピッチ、ロール、とヨーが補正できるため、ここでは論じない。考えなければならないのはカメラの移動である。透視投影によって、3次

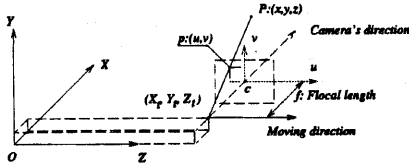


図3: Coordinate system and the projection of a 3D point

元空間の点 $P(x, y, z)$ を2次元の像平面に射影すると、

$$\begin{aligned} u &= f \frac{z - Z_t}{x - X_t} \\ v &= f \frac{y - Y_t}{x - X_t} \end{aligned} \quad (1)$$

となる。ここで、 $(X_t, Y_t, Z_t)^T$ は時刻 t におけるカメラの位置である。

2.2 スリットの一般的な表現

ここで3次元時空間画像から2次元時空間画像への変更のアプローチを説明する。通常、2次元時空間画像は以下のステップにしたがって生成される：(1) 適当なスリットを選ぶ；(2) 選ばれたスリットで3次元時空間画像を切る（スキャンする）；(3) 切られたのは一般的に曲面であるため、その曲面

を平面にする。任意のスリットは数学的に以下のような点列で表すことができる。

$$S = \{(u_{it}, v_{it}) : 0 \leq i < N, 0 \leq t < F\} \quad (2)$$

ここで、 u と v はカメラの像平面の横軸と縦軸であり、 t は時間軸である。且、 N はスリットの点数で、 F は画像の枚数でもある。スリットの形状は時間によって変化する場合、 S は時間 t の関数となる。ここでは、時間に不変なスリットを静的スリット、時間によって変化するスリットを動的スリットと呼ぶ。以下では、静的スリットと仮定する。一方、3次元時空間画像は一般的に3次元関数 $f(u, v, t)$ で表すことができる。3次元時空間画像に対して、(2)のスリットで2次元時空間画像へ変換すると、得られた2次元時空間画像は下式になる。

$$g(i, t) = f(u_{it}, v_{it}, t), \quad (u_{it}, v_{it}) \in S \quad (3)$$

2.3 3次元空間での直線とその像平面への射影

3次元空間で、ある直線はその直線の傾きベクトル $\{m, n, l\}^T$ と位置ベクトル $\{x_0, y_0, z_0\}^T$ で記述でき、数学的に下式で表される。

$$\begin{cases} x = x_0 + \alpha m \\ y = y_0 + \alpha n \\ z = z_0 + \alpha l \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 α は変化パラメータである。傾きベクトルを正規化し、位置ベクトルを傾きベクトルと垂直するようにすれば、以下の制約条件が成立する。

$$\begin{aligned} m^2 + n^2 + l^2 &= 1 \\ mx_0 + ny_0 + lz_0 &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

即ち、一つの3次元直線に対して、独立的なパラメータは四つしかない。

直線上の点 $\{x, y, z\}^T$ に対して、(4)より、

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \frac{m}{n}(y - y_0) \\ z &= z_0 + \frac{l}{n}(y - y_0) \end{aligned}$$

が得られる。さらに、(1)より、カメラの位置 $(X_t, Y_t, Z_t)^T$ と直線のパラメータ（傾きベクトルと位置ベクトル）と v と u との関係が

$$[(X_t - x_0) - \frac{m}{n}(Y_t - y_0)]u$$

$$\begin{aligned}
& + \left[\frac{m}{n}(Z_t - z_0) - \frac{l}{n}(X_t - x_0) \right] v \\
& = f(Z_t - z_0) - \frac{l}{n}(Y_t - y_0) \quad (6)
\end{aligned}$$

で与えられる。(6)により、もし t が定数なら、 u と v との間に線形関係が存在する。これは3次元直線を像平面に投影しても像平面上で直線になるという意味である。一方、 u と v と t との間に線形関係は存在していない。すなわち、3次元直線は3次元時空間画像上の曲面に投影される。

2.4 2次元時空間画像中の3次元直線

2次元時空間画像を生成する時に、一フレームから一行しか得られない。言い替えば、ある時刻 t において、カメラが一フレームしか撮れないため、2次元時空間画像の一行しか得られない。2次元時空間画像は必ず時間軸 t に関する軸が存在する。もう一つの軸はスリットによって異なり、像平面上のピクセル位置と関係があるので、空間軸と呼ばれる。3次元直線の2次元時空間画像上での表現を調べるため、まず(6)を下式に書き換える。

$$\begin{aligned}
fZ_t - uX_t & = f\left(z_0 - \frac{l}{n}y_0\right) + u\left(\frac{m}{n}y_0 - x_0\right) \\
& + (vZ_t - uY_t)\frac{m}{n} + v\left(\frac{l}{n}x_0 - \frac{m}{n}z_0\right) \\
& + (fY_t - vX_t)\frac{l}{n} \quad (7)
\end{aligned}$$

(7)より、3次元空間の直線が2次元時空間画像上の曲線になることがわかる。その曲線は五つのパラメータ $(z_0 - \frac{l}{n}y_0)$ 、 $(\frac{m}{n}y_0 - x_0)$ 、 $\frac{m}{n}$ 、 $(\frac{l}{n}x_0 - \frac{m}{n}z_0)$ 、と $\frac{l}{n}$ で決められ、且各パラメータは直線の傾きベクトルと位置ベクトルの組み合わせである。これらの五つのパラメータの間に線形関係は存在する。

2.5 直進カメラの場合

カメラが側面に向かって直進する場合、一般性を失わず、カメラの移動方向を Z 軸とし、カメラの光軸を X 軸とすることができる。そして、カメラが Z 軸上で移動しているため、カメラの位置については、 $X_t = Y_t = 0$ が存在し、 Z_t だけが残される。よって、(7)より

$$\begin{aligned}
fZ_t & = f\left(z_0 - \frac{l}{n}y_0\right) + u\left(\frac{m}{n}y_0 - x_0\right) \\
& + vZ_t\frac{m}{n} + v\left(\frac{l}{n}x_0 - \frac{m}{n}z_0\right) \\
& \equiv f \cdot p_1 + u \cdot p_2 + vZ_t \cdot p_3 + v \cdot p_4 \quad (8)
\end{aligned}$$

が得られる。ここで、得られた2次元空間画像はカメラ像平面の縦軸 v と時間に関する Z 軸に対するカメラの位置 z_t を軸とされている。3次元直線が射影され、形成された2次元空間画像上の曲線は四つのパラメータ p_1, p_2, p_3, p_4 で表すことができる。四つのパラメータが3次元直線の両ベクトルとの関係は下式になる。

$$\begin{aligned}
p_1 & = z_0 - \frac{l}{n}y_0 \\
p_2 & = \frac{m}{n}y_0 - x_0 \\
p_3 & = \frac{m}{n} \\
p_4 & = \frac{l}{n}x_0 - \frac{m}{n}z_0 \quad (9)
\end{aligned}$$

2.6 3次元直線のパラメータの推定

(8)より、3次元直線の両ベクトルの推定は2次元時空間画像上の曲線の四パラメータの推定となる。従来、四パラメータの推定は4次元のハフ変換で行われている。多次元のハフ変換の例は図形上の円や楕円などのパラメータの抽出に使用される[8]。

ハフ変換で得られるのは(9)の四つのパラメータ p_1, p_2, p_3 と p_4 である。3次元直線の傾きベクトルと位置ベクトルに関する制約条件(5)と合わせて、両ベクトルは

$$\begin{aligned}
n & = \frac{1}{1+p_3^2 + \frac{(p_1 p_3 + p_4)^2}{p_2^2}} \\
m & = np_3 \\
l & = -n \frac{p_1 p_3 + p_4}{p_2} \\
x_0 & = p_3 y_0 - p_2 \\
y_0 & = (p_2 p_3 - \frac{l}{n} p_1) n^2 \\
z_0 & = p_1 - \frac{p_1 p_3 + p_4}{p_2} y_0 \quad (10)
\end{aligned}$$

で与えられる。

3 スリットの選択

ここでは各種のスリットと得られるパラメータの関係について考察する。すなわち、行列の条件数によって、スリットの選択問題を検討する。

3.1 簡単なケース：直線スリット

まず、簡単なケースから考えてみる。もし像平面上のある直線をスリットとすると、3次元直線は2次元時空間画像上にどんな形になるだろう。ここ

で、スリットとする直線を $u = av + b$ で表し、 a と b はスリットの係数である。(8)より、

$$fZ_t = (fp_1 + bp_2) + (vZ_t)p_3 + v(p_4 + ap_2) \quad (11)$$

が得られる。上式より以下の三つのパラメータしか求められないことがわかる。

$$(fp_1 + bp_2), p_3, \text{ と } (p_4 + ap_2).$$

前述したように、ある3次元直線が四つのパラメータがあるので、これらの三つのパラメータから完全に3次元直線の傾きベクトルと位置ベクトルを計算することはできない。直線スリットによって生成された2次元時空間画像よりもとの3次元直線を復元することができなくなる。

(8)より、四つのパラメータを全て求めるため、各々の係数は線形相関ではないようにしなければならない。直線スリットがだめであったのは、直線スリットの場合、係数 u と係数 v は線形関係があるためである。

3.2 スリット形の選択

上記四つの係数を線形相関しないようにできるスリットはいろいろとある。例えば、2次曲線(楕円、放物線、双曲線など)をスリットとしてよい。さらに、スリットは図4に示すようなサインスリットも線形相関しない。サインスリットは

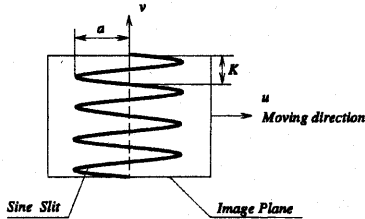


図4: Sine slit in image plane

$$u = a \sin\left(\frac{2\pi v}{K}\right) \quad (12)$$

で与えられる。ここで、 a はサインスリットの振幅で、 K は周期である。両方の単位はカメラ像平面のピクセルである。サインスリットを選ぶ理由は以下のように挙げられる。

1. 直線スリットと2次曲線スリットなどと同じく、サインスリットは全ての epipolar 平面と

クロスし、像平面に流れてきた全ての情報をもれなく捕まえることができる。

2. 直線スリットと2次曲線スリットなどとは違い、サインスリットは像面上の幅広い範囲の情報を取れる。言い替えれば、ある時刻 t において、サインスリットを使えば、同じデータ量で、直線スリットよりも2次曲線スリットよりも多くの情報を把握できる。

2次曲線スリットよりサインスリットを好む理由に関しては、最後の3次元直線のパラメータに対する推定誤差によって判断させていきたい。ここで、行列の条件数と推定誤差の関係から考えてみる。

3.2.1 行列の条件数と推定誤差

推定というのは、ある測定できる量によって直接測定できない量の計算することである。方程式で書けば、

$$Ax = b \quad (13)$$

となる。ここで、測定できる量 b と測定行列 A で直接測定できない量 x を計算するのである。もし測定量 b を正確に測れば、測定行列 A に依存せず、正確な解 x が求められる。しかし、実際の測定量は必ず誤差を含まれている。したがって、 x の誤差が測定行列 A に左右される。例えば、ある測定したい量ベクトル $x = \{1, 1, 1\}^T$ に対して、二つの測定行列

$$A_1 = \begin{pmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} \end{pmatrix}, \quad A_2 = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

で行うとする。測定行列 A_1 と A_2 について測定できた b_1 と b_2 は

$$b_1 = \left\{ \frac{11}{6}, \frac{13}{12}, \frac{47}{60} \right\}^T, \quad b_2 = \left\{ -\frac{1}{3}, \frac{5}{3}, \frac{1}{3} \right\}^T$$

である。勿論、測定誤差のない場合、 $A_1 x_1 = b_1$ と $A_2 x_2 = b_2$ によって、求めた解は $x_1 = x_2 = \{1, 1, 1\}^T$ で、両方とも正確な結果である。しかし、 b_1 と b_2 の測定誤差が 0.1 とすれば、得られた結果は $x_1 = \{0.60, 2.40, 0.00\}^T$ と $x_2 = \{1.10, 0.90, 1.00\}^T$ となってしまう。 x_1 は真の解と大差がある。同じく b_1 と b_2 の測定誤差が 0.01 とすれば、得られた結果は $x_1 = \{0.99, 1.08, 0.90\}^T$ と $x_2 = \{1.01, 0.99, 1.00\}^T$ となる。ほぼ同じ精度が得られたと分かった。

この例により、誤差が存在する場合、測定行列が最後の精度を左右していることがわかる。実は、測定誤差が存在する場合、(13)が

$$A(x + \Delta x) = b + \Delta b$$

となる。ここで、 Δb は b の測定誤差、 Δx は x の誤差である。 $Ax = b$ により、 $\Delta x = A^{-1}\Delta b$ が得られる。ついに、 $\|\Delta x\| = \|A^{-1}\Delta b\| \leq \|A^{-1}\| \cdot \|\Delta b\|$ が得られ、且 $\|b\| \leq \|A\| \cdot \|x\|$ があるので、

$$\frac{\|\Delta x\|}{\|x\|} \leq \|A^{-1}\| \cdot \|A\| \cdot \frac{\|\Delta b\|}{\|b\|} = K(A) \frac{\|\Delta b\|}{\|b\|} \quad (14)$$

ここで、 $\|\cdot\|$ はノルム (norm)、 $K(A)$ は行列 A の条件数である。上式より、測定行列の条件数が大きいときに最後の相対誤差は大きくなるということがわかる。特異値分解 (SVD) で両行列 A_1 と A_2 の条件数を求めて、行列 A_1 の条件数は 524.055 であり、 A_2 の条件数は 1.000 である。

3.2.2 各スリットに対応する行列の条件数及び推定誤差

2次元時空間画像上で、 N 点 $\{(Z_{t_i}, v_i(u_i)), i = 1, 2, \dots, N\}$ は同じパターンに属すると分解されたとする。(8)より、最小2乗法でパラメータ p_1, p_2, p_3 と p_4 を求めると、

$$\begin{pmatrix} \sum_i f^2 & \sum_i fu_i & \sum_i fv_i Z_{t_i} & \sum_i fv_i \\ \sum_i fu_i & \sum_i u_i^2 & \sum_i u_i v_i Z_{t_i} & \sum_i u_i v_i \\ \sum_i fv_i A_{t_i} & \sum_i u_i v_i A_{t_i} & \sum_i (v_i Z_{t_i})^2 & \sum_i v_i v_i A_{t_i} \\ \sum_i fv_i & \sum_i u_i v_i & \sum_i v_i^2 Z_{t_i} & \sum_i v_i^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i f^2 Z_{t_i} \\ \sum_i fu_i Z_{t_i} \\ \sum_i fv_i Z_{t_i}^2 \\ \sum_i fv_i Z_{t_i} \end{pmatrix}$$

である。ここでの測定行列は

$$A = \begin{pmatrix} \sum_i f^2 & \sum_i fu_i & \sum_i fv_i Z_{t_i} & \sum_i fv_i \\ \sum_i fu_i & \sum_i u_i^2 & \sum_i u_i v_i Z_{t_i} & \sum_i u_i v_i \\ \sum_i fv_i A_{t_i} & \sum_i u_i v_i A_{t_i} & \sum_i (v_i Z_{t_i})^2 & \sum_i v_i v_i A_{t_i} \\ \sum_i fv_i & \sum_i u_i v_i & \sum_i v_i^2 Z_{t_i} & \sum_i v_i^2 \end{pmatrix}$$

である。スリットの形によって、 u_i と v_i との関係が変わり、 Z_{t_i} にも影響が存在している。だから、行列 A の条件数はスリットによって変化する。以下はシミュレーションによって、直線スリット、2次元曲線スリット及びサインスリットに対する行列 A の条件数を調べ、3次元直線のパラメータの推定誤差を計算する。

シミュレーションする各スリットは図5に示す。まず、エッジ検出の精度が順番に 2, 1, 0.1, 0.001 ピクセルと仮定する。各々のエッジ検出精度について、行列 A の条件数を計算して、図6に示す。こ

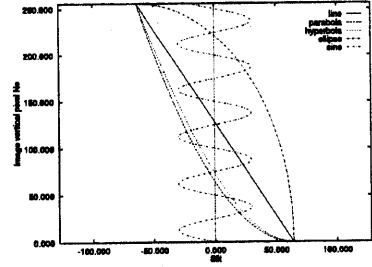


図 5: 四つのスリット

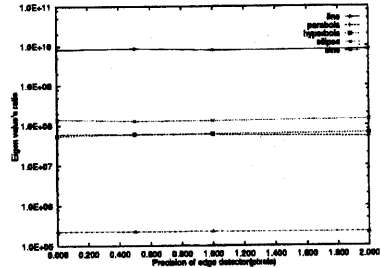


図 6: 固有値の最小値と最大値の比

ここで、横軸はエッジ検出の精度であり、縦軸は各行列の条件数である。2次元曲線スリットによる行列 A の条件数はサインスリットのより約 100 倍大きく、直線スリットによる行列 A の条件数は 2次元曲線のものの 100 倍を越えている。即ち、サインスリットによる行列 A の条件数はもっとも小さい。勿論、各スリットのパラメータによって条件数は違うが、サインスリットのはもっとも小さくて、2次元曲線スリットのは中ぐらいで、直線スリットのはもっとも大きいという順は変わらない。

次に、3次元直線の推定誤差を以下のように定義して、各スリットによる推定誤差を比較してみる。ここで以下の二種類誤差を定義する。

- 傾きベクトルの誤差は、元の傾きベクトルと推定された傾きベクトルとの角度と定義される。推定誤差がない時にこの誤差は 0 になる。
- 位置ベクトルの誤差は、元の位置ベクトルと推定された位置ベクトルの頂点との距離と、両ベクトルの平均長さとの比と定義される。同じく推定誤差が存在しない限り、位置ベクトル誤差は 0 になる。

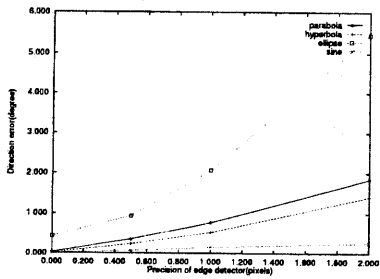


図 7: 傾きベクトル推定誤差の比較

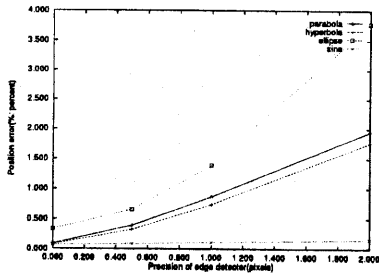


図 8: 位置ベクトル推定誤差の比較

これによって、各スリットによる推定誤差は図 7 と図 8 に示す。両図ともに、横軸はエッジ検出の精度で、縦軸は誤差である。図から見ると、エッジ検出は誤差がない限り、スリットの形に関わらずほぼ同じ正確な結果が得られる。しかし、エッジ検出に誤差が存在する場合、2 種類誤差ともサインスリットの方が 2 次曲線スリットの方より良いということが分かった。ここで、シミュレーションとした 3 次元直線は 4 パラメータの数十種類ある。直線スリットでは推定できなかったため、誤差曲線に表示されない。条件数の場合と同じ、図 7 と図 8 は図 5 に示すようなスリットに対する結果であるが、各種のスリットのパラメータが変わっても、誤差の大きさの順は変わらないことは分かった。

4 実験結果

上述の理論に基づき、サインスリットによる 3 次元直線分の復元を行った実験結果を示す。

図 9 に示すのは、あるモデルハウスに対して動画を撮った画像である。動画からサインスリットで生成された 2 次元時空間画像は図 10(a) に示し、それより抽出されたエッジ画像とセグメント画像

はそれぞれ図 10(b) と (c) に示す。そして、提案した手法で復元できた 3 次元直線分のビューは図 11 に示す。

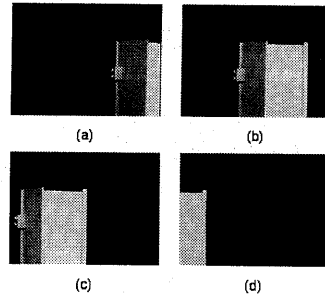


図 9: 実験画像：ハウス

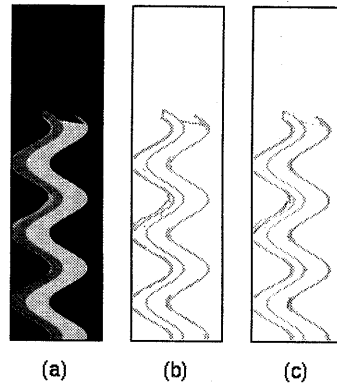


図 10: (a) 2 次元時空間画像, (b) エッジ画像, (c) ハフ変換によるセグメント画像

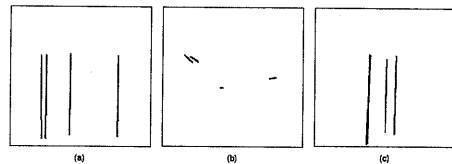


図 11: 結果: (a) front view, (b) top view, (c) side view

次に、図 12 に示すのは、四本の棒に対して撮った画像である。サインスリットによって生成された 2 次元時空間画像は図 13(a) に示し、エッジ画像とセグメント画像はそれぞれ図 13(b) と (c) に

示す。復元できた結果は図 14 に示す。

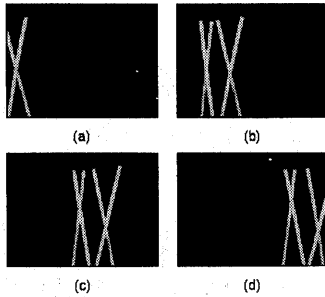


図 12: 実験画像：棒

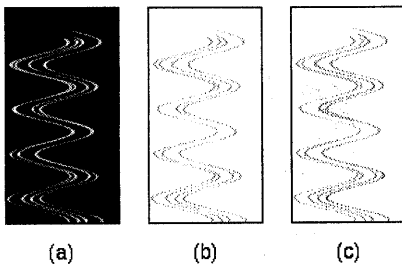


図 13: (a) 2次元時空間画像, (b) エッジ画像, (c) ハフ変換によるセグメント画像

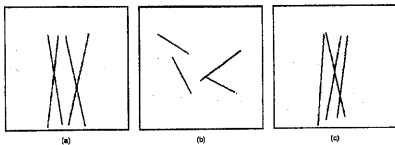


図 14: 結果:(a) front view, (b) top view, (c) side view

5 おわりに

本稿では、2次元時空間画像の生成理論を論じ、一つの2次元時空間画像から3次元直線分の復元方法を示した。また、2次元時空間画像を生成する時、用いられるスリットの形によって、捕獲できる情報量が異なり、3次元直線分の推定にも影響が存在することを説明した上、2次元曲線スリットより推定に安定であるサインスリットを提案した。最

後、本手法の有効性を実験結果とともに示した。

参考文献

- [1] C. Tomasi and T. Kanade, "Shape and Motion from Image Streams under Orthography: a Factorization Method", Intern. Journal of Comput. Vision, Vol.9, No.2, pp.137-154(1992).
- [2] A. Azarbayejani and P. Pentland, "Recursive Estimation of Motion, Structure, and Focal Length", IEEE Trans. PAMI, Vol.17, No.6, pp.562-575(1995).
- [3] R. Bolles, H. Baker, and D. Marimont, "Epipolar-Plane Image Analysis: An Approach to Determining Structure from Motion", Intern. Journal of Comput. Vision, Vol.1, No.1, pp.7-55(1987).
- [4] H. Baker and R. Bolles, "Generalizing Epipolar-Plane Image Analysis on the Spatiotemporal Surface", Intern. Journal of Comput. Vision, Vol.3, No.3, pp.33-49(1989).
- [5] T. S. Huang and A. N. Netravali, "Motion and structure from feature correspondences: A Review", Proceedings of the IEEE, vol.82, no.2, pp.252-268(1994).
- [6] Z. Y. Zhang, "Estimating motion and structure from correspondences of line segments between two perspective images", IEEE Trans. PAMI, vol.17, no.12, pp.1129-1139(1995).
- [7] J. Y. Weng, T. S. Huang, and N. Ahuja, "Motion and structure from line correspondences: closed-form solution, uniqueness, and optimization", IEEE Trans. PAMI, Vol.14, no.13, pp318-336(1992).
- [8] Robert. A. McLaughlin, "Randomized Hough Transform: Improved Ellipse Detection with Comparison", Technical Report, University of Western Australia(<http://ciips.ee.uwa.edu.au/Reports/>).
- [9] Lei Xu and Erkki Oja, "Randomized Hough Transform(RHT): Basic mechanisms, algorithms, and computational complexities", CVGIP: Image Understanding, Vol.57, no.2, pp131-154(1993).
- [10] Y. L. Yao and G. R. Cao, "On Criteria of Rationality in Interferogram Data Processing", ACTA Opt. Sinica, Vol.10, No.6, pp.508-513(1990)