

未校正カメラによるビジュアル・インターフェイス

加藤 真弓

佐藤 淳

名古屋工業大学 電気情報工学科

〒 466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町

katoma@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

あらまし：現在、コンピュータはキーボードやマウスなどのインターフェイスで制御を行なっている。例えば、CRT 画面上のウィンドウ制御はユーザが手でマウスポインタを移動させてからクリックするなどして行なっている。これに対し、本研究ではカメラから取得した画像を用い、ユーザの視線の動きを判断してアクティブにマウスポインタなどを制御するビジュアル・インターフェイスを提案する。従来のビジュアル・インターフェイスはカメラやシステムの校正が必要であった。しかし、カメラやシステムを正確に校正することは非常に難しい。そこで、本研究ではこれらの校正をすることなく、それでいて的確に動作するビジュアル・インターフェイスを提案する。特に、ユーザの視線の移動をもとにアフィン基底を設けることで、これらの基底をもとにユーザの投影像から CRT 画面上で注視している点が決定できることを示す。これにより、カメラが未校正であっても正しい視線方向にマウスポインタなどを制御することができる。

さらに、提案したビジュアル・インターフェイスを実際に用いて位置決め精度などの評価を行ない、本手法の有効性を示す。

キーワード：ビジュアル・インターフェイス、未校正カメラ、モーション・パララックス

Visual Interface from Uncalibrated Cameras

Mayumi Kato

Jun Sato

Nagoya Institute of Technology

Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya 466-8555, JAPAN

katoma@hilbert.elcom.nitech.ac.jp, junsato@elcom.nitech.ac.jp

Abstract: We usually use keyboards and mice for controlling the display of computers. However, since keyboards and mice are both manipulated by hands, they cannot be manipulated simultaneously. Thus, in this paper, we propose a visual interface which enables us to control the computer display from the direction of face projected into uncalibrated cameras. However, it is very difficult to compute the direction of face from uncalibrated cameras. In this paper, we show that, by introducing the affine bases with respect to the display coordinates and the image coordinates, it is possible to compute the face directions from uncalibrated cameras. We also show the result of some experiments, and show that the proposed method is very efficient.

Keywords: visual interface, uncalibrated cameras, motion parallax, image rectification.

1 はじめに

一般にコンピュータに対する入力インターフェイスとしては、キーボードやマウスなどを使用する。例えば CRT 画面上のウィンドウ制御はユーザが手でマウスポインタを移動させてからクリックするなどして行なっている [13, 14].

しかし、マウスもキーボードも手で操作するものであるため、ユーザはキーボードとマウスとの間で手を行き来させなければならず非効率である。また、手などを使用せずにマウスポインタの移動やキー入力などができれば、体の不自由な人々の大きな助けとなると考えられる。そこで本研究ではコンピュータが視覚認識によりユーザの意志を積極的に認識してアクションを取るビジュアル・インターフェイスを提案する。

これまでユーザが手によって操作を行っていたコンピュータインターフェイスに対し、本研究では未校正カメラを用いて取得した画像によりユーザの動きを判断してインターフェイスを制御する。特にユーザの視線方向に着目してマウスポインタの制御などを行なう。

このようなビジュアルインターフェイスの例として、[10] などがあるが、これらの研究ではカメラの位置や姿勢や焦点距離などのカメラパラメータをあらかじめ校正した状態で、視線方向を計算していた。また、[3] では顔の 3 次元的な形状をあらかじめ既知として視線方向の計算を行なった。しかし、カメラを校正することは非常に難しく、手間のかかる作業である。また、顔の 3 次元的な形状は人によって異なるため、ある特定の顔形状でしか正常に動作しないのも好ましくない。そこで本研究では、カメラの校正を必要とせず、また顔の形状などに依存することなく、的確に動作するビジュアル・インターフェイスを提案する。

しかし、カメラが未校正である場合、カメラパラメータであるカメラ位置やカメラ姿勢、焦点距離などが未知であるため、得られた画像から視線方向を計算することは非常に難しい。本稿では近年注目されている未校正カメラ [2, 4, 5] に関する成果を基にこの問題を解決する方法を示す。3次元空間中の方向の変化を 2次元画像から安定に計算するには motion parallax [6, 1] が有用である。しかし、カメラパラメータが分からない場合、motion parallax からでは方向の変化の具合を完全に計算することはできない。そこで本稿では、ユーザの動きを

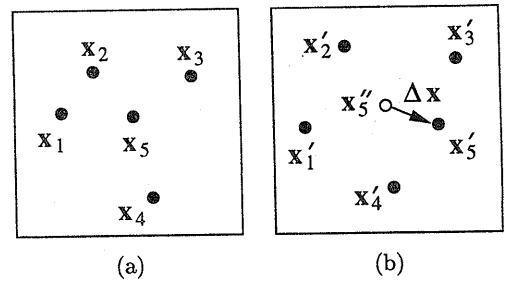


図 1: Motion parallax

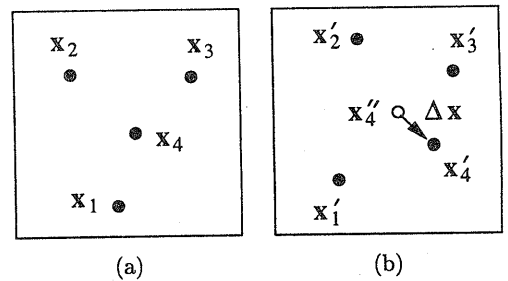


図 2: アフィン Motion parallax

もとにアフィン基底を設定し、このアフィン基底をもとにユーザの投影像から CRT 画面上でユーザが注視している点が計算可能であることを示す。

以下ではまず、motion parallax について説明する。次に、未校正のカメラがユーザの正面においてある場合の視線方向の計算方法について説明する。次に、外部パラメータも内部パラメータも未知なカメラにより視線方向を求め、ウィンドウを制御する方法について述べる。最後に、提案したビジュアル・インターフェイスによりマウスポインタを制御する実験を行ない、その性能について評価する。

2 Motion Parallax

視線方向 (顔の方向) を計算する上で、motion parallax [6, 1] は非常に有用である。motion parallax とは、ある視点において同一の点に投影された空間中の 2 点が視点を変えた時に異なる 2 点に投影された時の位置の差分であり、視点と対象物との相対的な運動に関する情報を含んでいる。

今、空間中に異なる 2 点 X_1, X_2 が有り、これらが画像上で重なって一点 $x_1 = x_2$ に見えていたとする。カメラを並進および回転させると、これら 2 点はそれぞれ別の点 x'_1, x'_2 に投影される。この時、 $\Delta x = x'_2 - x'_1$ を motion parallax と呼ぶ。カメラから 2 点までの距離をそれぞれ Z_1, Z_2 とす

ると、motion parallax は次のように表せる。

$$\Delta \mathbf{x} = \left(\frac{1}{Z_2} - \frac{1}{Z_1} \right) \begin{bmatrix} fU_X - xU_Z \\ fU_Y - yU_Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{U} = [U_X, U_Y, U_Z]$ はカメラの並進運動であり、また f はカメラの焦点距離である。(1) から明らかなように、motion parallax は点の相対的な奥行きとカメラ運動の内の並進運動のみに依存し、回転運動の影響を受けない。さらに $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x, \Delta y]$ の x 成分と y 成分の比を取ると、点の奥行きの項が消えて次のようにカメラの並進のみに依存することがわかる。

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{fU_Y - yU_Z}{fU_X - xU_Z} \quad (2)$$

motion parallax $\Delta \mathbf{x}$ の方向は、画像上でのカメラの並進運動の方向と一致する。また、カメラが運動する代わりに対象物が回転運動する場合には、 $\Delta \mathbf{x}$ の方向は回転軸の投影像に直交する方向、すなわちチルト角を表す。

異なる2点が画像上で重なって投影されるのは非常に稀であるが、平面上の4点とこの平面上にはない1点が存在する場合には、仮想的に重複投影される点を求めることで簡単に motion parallax $\Delta \mathbf{x}$ を計算することができる。今、空間中に5点 $\mathbf{X}_i (i = 1, \dots, 5)$ が有り、この内の4点 $\mathbf{X}_i (i = 1, \dots, 4)$ が同一平面上に有り、残りの1点 \mathbf{X}_5 がこの平面上にないとする。図1に示すように、カメラ運動の前後でこれらの点が $\mathbf{x}_i (i = 1, \dots, 5)$ および $\mathbf{x}'_i (i = 1, \dots, 5)$ に投影されたとすると、 $\mathbf{x}_i (i = 1, \dots, 4)$ を $\mathbf{x}'_i (i = 1, \dots, 4)$ に変換する平面射影変換 \mathbf{H} が求まる。もしも \mathbf{X}_5 がその他の4点と同一の平面上に有ったとするとカメラ運動後にこの点が投影される点 \mathbf{x}'' が次のように予測できる。

$$\tilde{\mathbf{x}}''_5 \sim \mathbf{H}\tilde{\mathbf{x}}_5 \quad (3)$$

ここで (\sim) は斉次座標を表し、 (\sim) は定数倍の不定性を除いて等しいことを表す。しかし、実際には \mathbf{X}_5 は平面上にはないので、図1に示すように実際の投影像 \mathbf{x}'_5 との間以下に差分 $\Delta \mathbf{x}$ を生ずる。

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}'_5 - \mathbf{x}''_5 \quad (4)$$

これが先に述べた motion parallax である。

次に、カメラによる投影が弱透視投影 [12, 7, 8] で近似できる場合を考える。図2に示すように、今度は空間中の4点 $\mathbf{X}_i (i = 1, \dots, 4)$ が画像上で



(a) 正面



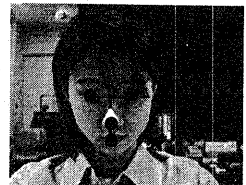
(b) 左向き



(c) 右向き



(d) 上向き



(e) 下向き

図3: 視線方向と motion parallax

$\mathbf{x}_i (i = 1, \dots, 4)$ に投影されているとし、カメラの運動によりこれら4点の像が $\mathbf{x}'_i (i = 1, \dots, 4)$ に移動したとする。また、点 \mathbf{X}_4 は3点 $\mathbf{X}_i (i = 1, \dots, 3)$ が定義する平面上にはないものとする。この時、 $\mathbf{x}_i (i = 1, \dots, 3)$ を $\mathbf{x}'_i (i = 1, \dots, 3)$ に変換するアフィン変換 \mathbf{A} を求めれば、motion parallax は

$$\Delta \mathbf{x} = \mathbf{x}'_4 - \mathbf{x}''_4 \quad (5)$$

により求まる。ここで、

$$\tilde{\mathbf{x}}''_4 = \mathbf{A}\tilde{\mathbf{x}}_4 \quad (6)$$

である。対象となる面がカメラの画像面と平行に置かれている場合には、 $\Delta \mathbf{x}$ の方向から面の回転の方向 (チルト角) が求まり、 $\Delta \mathbf{x}$ の大きさ $|\Delta \mathbf{x}|$ から回転の大きさ (スラント角) を求めることができる。

3 正面カメラによる視線方向の決定

本節では、内部パラメータが未校正のカメラがユーザの正面に有るかその画像面が CRT 平面と平行である場合の視線方向の決定方法について考える。

ユーザの目、口の3点と、この3点が定義する平面上にない鼻や耳などの点を考える。するとこ

れら4点より先の motion parallax が計算できる。顔が CRT 正面を向いている時の画像と、顔を回転して視線を移動させた時の画像との間で motion parallax Δx を計算すると、顔の回転軸は Δx に直交する方向として求まり、回転量は Δx の大きさに比例する。しかし、カメラの内部パラメータがわからないので顔の絶対的な回転量はわからない。また CRT 画面とユーザの距離や CRT 画面の一面素の大きさもわからないので、このままでは CRT 画面上のどの画素に視線があるのかがわからない。

そこで、あらかじめ画素位置のわかっている3点を順番に CRT 画面上に表示し、ユーザがこれらの点に視線を持って行くことにより、motion parallax と CRT 画面の画素との間の関係を直接的に求めることにする。Motion parallax Δx の集合が成す2次元の空間を motion parallax 空間と呼ぶことにしよう。今、CRT 画面上で $Y_i (i=1, \dots, 3)$ の3点を表示した時の motion parallax 空間における座標を $\Delta x_i (i=1, \dots, 3)$ とする。すると、これらの間の関係は次に示すアフィン変換 A_m によって記述できる。

$$[\tilde{Y}_1 \ \tilde{Y}_2 \ \tilde{Y}_3] = A_m [\Delta \tilde{x}_1 \ \Delta \tilde{x}_2 \ \Delta \tilde{x}_3] \quad (7)$$

このようにして motion parallax 空間と CRT 画面との間の関係を最初に求めておくことにより、ある時刻において Δx の motion parallax が得られると、CRT 画面上の視線方向の画素位置 Y が次のように簡単に求まる。

$$\tilde{Y} = A_m \Delta \tilde{x} \quad (8)$$

図3に実際にユーザの顔の動きから motion parallax を計算した例を示す。図3(a)はユーザが正面を向いている場合に得られる画像であり、(b), (c), (d), (e)はそれぞれユーザが左右上下を向いた場合に得られる画像である。図中の黒い点は、目、口、鼻の位置を示し、白い三角の点は鼻の点が目、口の3点で決まる平面上にあると仮定した時の予測移動位置 x'_4 を示す。図3(a), (b)より motion parallax Δx がユーザの顔の回転軸に直交する方向と一致していることがわかる。(c), (d), (e)に関しても同様である。

4 未校正カメラによる視線方向の決定

次にカメラが未校正である場合の視線方向の決定方法について述べる。

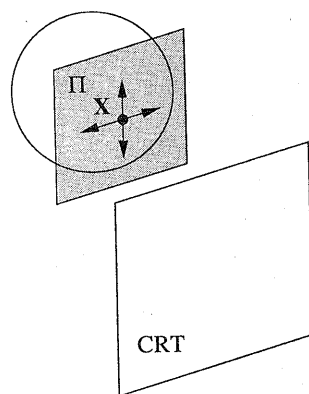


図4: 接平面上の点の運動

カメラが未校正である場合、motion parallax からは顔の回転軸の方向はわかるが回転の大きさが決まらない。そこで、図4に示すように motion parallax の代わりに鼻の頂点などその運動が CRT 画面と平行な接平面 Π 上に乗る点の運動を考える。このような接平面上の点の動きを使うことにより、次に述べるように未校正のカメラから CRT 上で視線方向の画素位置を計算することができる。

4.1 空間中の3つの平面

図5に示すように、3次元空間においてカメラの投影面 I_1 , CRT 平面 I_2 , 顔が回転した時の接平面 I_3 の3つの平面を考えることにする。鼻などの点がこの接平面上を運動するものとする。

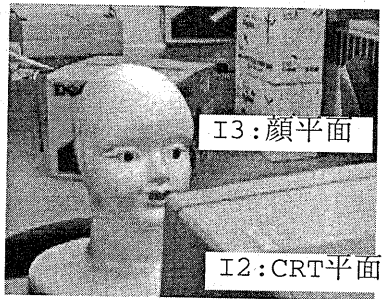
この様にして定義した3つの平面の関係から、以下に述べる画像の幾何学的正規化 (rectification) [12, 9, 11] を行なう。

4.2 アフィン rectification

ユーザの視線方向とは接平面 I_3 上の点Xが指し示す方向である。しかし、画像面 I_1 と接平面 I_3 が平行でないために、このままでは画像上の点の運動は正しい視線の運動を表さない。

ここで、接平面 I_3 上の点 X から画像面 I_1 上の点 x への投影は弱透視投影を仮定していることからアフィン変換 A_1 によって表せる。一方、接平面と CRT 平面とは平行であるから接平面上の点 X はアフィン変換 A_2 により CRT 平面上の画素 Y に変換することができる。従って、画像面上の点 x から CRT 平面上の点 Y への変換は次のようなアフィン変換により行なうことができる。

$$\tilde{Y} = A \tilde{x} \quad (9)$$



I1: 投影面

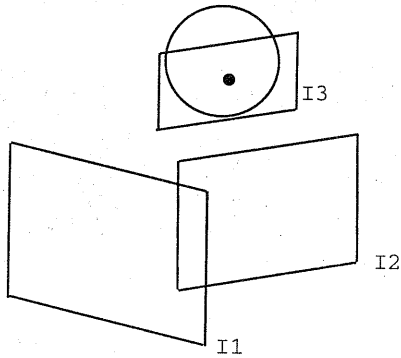


図 5: 空間中の3つの平面

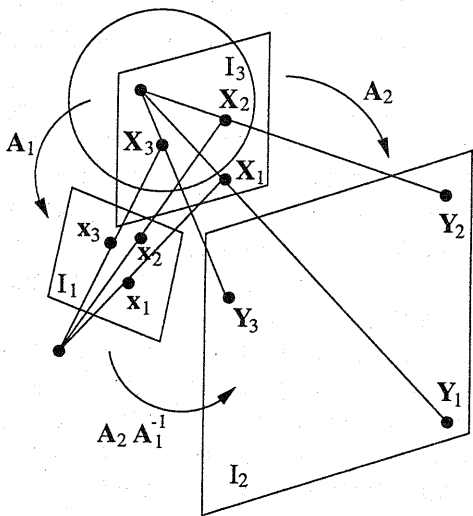
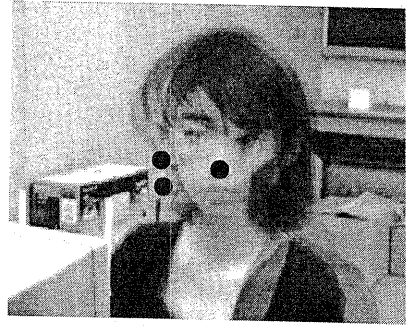


図 6: アフィン基底による座標変換



(a)



(b)

図 7: アフィン基底を注視した時の投影像

ここで、 A は次に示すように A_1 と A_2 よりなる。

$$A = A_2 A_1^{-1} \quad (10)$$

従ってこのような A が求めれば、画像上に投影された点 x からユーザの視線方向の CRT 上の画素 Y を計算することができる。

アフィン変換 A は、CRT 画面上にアフィン基底となる基準点 3 点を表示し、この 3 点の CRT 画面上での画素位置 $Y_i (i = 1, \dots, 3)$ と、これらの点にユーザが視線を合わせた時の鼻の投影像 $x_i (i = 1, \dots, 3)$ とから次式により求まる。

$$[\tilde{Y}_1 \ \tilde{Y}_2 \ \tilde{Y}_3] = A [\tilde{x}_1 \ \tilde{x}_2 \ \tilde{x}_3] \quad (11)$$

このようにして求めた A により (9) 式を使用してユーザの像 x から CRT 上の視線方向の画素 Y を特定することができる。

図 7 は実際にユーザが基準となる 3 点のアフィン基底を注視した時に観測された鼻の投影位置 $x_i (i = 1, \dots, 3)$ の例である。

5 CRT 画面の制御

4 節まででいかにして未校正カメラにより正しい視線方向を決定するかを示した。ここでは決定

した視線方向をもとにした CRT 画面の制御について述べる。

CRT 画面上で視線方向が指し示している画素の座標 Y は先に述べた方法でユーザの投影像 x より計算できる。求めた Y の位置にマウスポインタを移動させその位置に存在するウィンドウをポップアップさせるよう X ウィンドウの画面制御を行なう。ポップアップしたウィンドウはキーボードからのキー入力待ち状態となる。

このようにして視線により入力ウィンドウを切替えることで、いちいちマウスとキーボードの間で手を行き来させる必要がなくなる。

6 実験

以下では、提案した未校正カメラによる視線方向の決定手法を用いて実際にマウスポインタをユーザの視線方向に移動させる実験を行なった。特にカメラの内部、外部パラメータがわからなくても的確にマウスポインタが移動できることを見るため内部、外部パラメータは任意に定め実験を行なった。

6.1 ビジュアル・インターフェイスの実験

まず、実際にビジュアル・インターフェイスを用いてマウスポインタを移動させる実験を行なった。図 8 において左 3 枚の写真は、人物が視線によりマウスポインタの制御を行なっている様子を示し、右 3 枚はその時の CRT 画面の状態を示す。カメラは適当に置いたため、その位置や姿勢は未知である。CRT 画面中央にあり、人物が投影されているウィンドウは、カメラから取得したユーザの画像を表示している。このウィンドウ上でユーザは自分の目、口、鼻の 4 点を指定しこれらの点をトラッキングする相関トラッカーを起動する。その後、ユーザが CRT 画面の左上、右上、右下の 3 つのコーナーを順に見ることにより、アフィン基底の投影像を求めた。これらのアフィン基底をもとにユーザの視線方向を投影像よりリアルタイムに計算し、マウスポインタを移動させウィンドウをポップアップさせた。(a-1)、(a-2) はユーザが正面を向いている時の状態であり、この時はマウスポインタは CRT 画面中央にある。(b-1)、(b-2) は人物が左を向いた時の状態であり、(c-1)、(c-2) は人物が右を向いた時の状態である。この時マウスポインタが CRT 画面上で人物の視線方向に移動し、その結果、視線方向にあるウィンドウがポップアップされていることがわかる(画像中央のユーザの動きとマウスポインタの動きは左右逆転することに注意)。

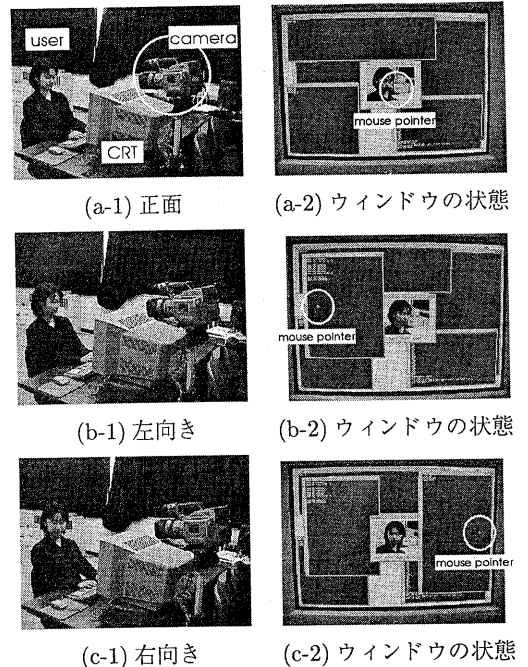


図 8: ビジュアル・インターフェイス実験結果

6.2 注視点の精度評価

次に本手法によるマウスポインタの位置決め精度を評価する。ユーザに CRT 画面上に適当に指定した位置をある一定時間見つめてもらい、その時のマウスポインタの位置の変動(平均位置及び標準偏差)を計測した。

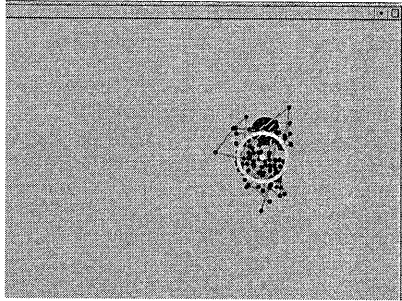
ここでは 2 つの外部パラメータにおいてそれぞれ内部パラメータである焦点距離を変化させた時の 4 つの異なるパラメータにおいて実験を行なった。それぞれのパラメータにおいて一定時間、指定点を注視し、この時得られたマウスポインタの位置データより、指定した点に対する平均誤差および標準偏差 (σ) を求めた。

CRT 画面全体の大きさはピクセル値で (1280, 1024) である。実験結果において CRT 画面全体を表示するとマウスポインタの軌跡や移動点が込み入って見えにくいため、CRT 画面を 4 分割にして、注視点の存在する領域を拡大して表示した。

図 9 と図 10 は異なるカメラパラメータにおいて実験を行なった結果である。それぞれの図において (a) は実験時にカメラから得られた画像を示し、(b) は (a) におけるカメラパラメータで実験を



(a) カメラから得られた画像



(b) マウスポインタの軌跡

平均誤差	45.04
標準偏差 (σ)	41.79

(c) 位置決め精度 (pixel)

図 9: 位置決め評価の結果 1

行なった時のマウスポインタが移動した点と軌跡をそれぞれ点と直線で示している。ここで白い円はマウスポインタが移動した点群に対し 2σ の不確定領域を計算した結果である。また (c) は位置決め誤差の平均と標準偏差を示す。

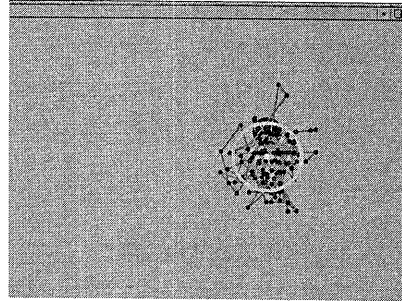
移動点に多少のばらつきが見られるが、カメラパラメータに依存すること無くマウスポインタを移動できていることがわかる。マウスポインタが指し示す平均位置は実際にユーザが注視している点よりも CRT 画面中央に寄る傾向がある。これは、一般にユーザが CRT 画面を注視する時には顔だけでなく目も動かしているためと考えられる。目を動かした場合には、顔の動きだけで点を注視する場合に比べて、画像上でのユーザの像の移動が小さくなるからである。

6.3 直線移動の精度評価

次に図 5 に示すようなモデルヘッドにより、視線を直線状に動かした時のマウスポインタの軌跡の安定度を評価した。カメラの内部パラメータを



(a) カメラから得られた画像



(b) マウスポインタの軌跡

平均誤差	43.00
標準偏差 (σ)	58.31

(c) 位置決め精度 (pixel)

図 10: 位置決め評価の結果 2

変えずに 10 種類の外部パラメータ (位置, 姿勢) を選び、モデルヘッドにより視線を上下, 左右に移動させてマウスポインタの位置データを取得した。次にカメラの外部パラメータを変化させずに内部パラメータだけ 10 段階に変化させ、同様の実験を行なった。

取得したマウスポインタの位置データより平均直線を計算し、与えた基準直線からの角度のずれを見た。また、平均直線に対するマウスポインタの位置のばらつき (標準偏差) もあわせて評価した。

図 11 に実験結果を示す。図 11(a) は外部パラメータを変化させてモデルヘッドの注視点を上下に移動させた結果であり、(b) は (a) と同じ条件下で注視点を左右に移動させた結果である。(c) は内部パラメータを変化させてモデルヘッドの注視点を上下に移動させたものであり、図 (d) は (c) と同じ条件下で注視点を左右に移動させた結果である。マウスポインタが移動した点を黒点で、またその軌跡を白線で示してある。3 本の直線の内で中心の

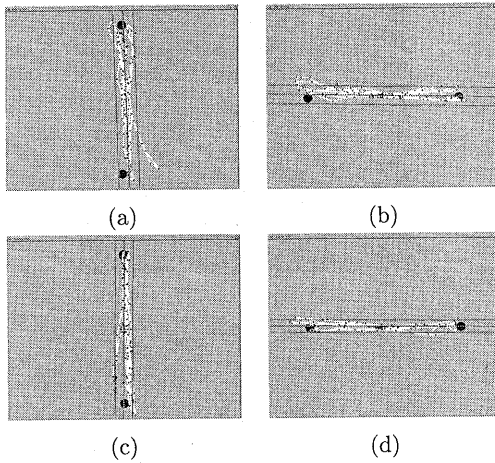


図 11: マウスポインタの軌跡

表 1: 直線移動の精度

評価	(a)	(b)	(c)	(d)
ずれ角 (度)	1.81	-1.15	-0.65	-0.57
標準偏差 (σ)	28.15	25.26	24.02	17.26

直線はマウスポインタの軌跡より計算した平均直線であり、他の2本は 2σ の不確定領域を表す直線である。また、表1は基準直線に対する角度のずれを表す。

注視点における実験と同様、マウスポインタの位置にばらつきがあるものの、カメラパラメータに依存することなくマウスポインタの移動ができていたことが確認できる。今回は簡単な相関トラッカーを使用したためマウスポインタの位置に多少ばらつきが見られるが、時系列データを使うなどしてトラッカーの安定度を向上することによりさらに精度が向上することが期待できる。

7 まとめ

本研究では、未校正カメラを用いて視線方向を計算することによりウィンドウ制御を行なうビジュアル・インターフェイスを提案した。まず、カメラがユーザ正面に置かれている場合には motion parallax により正確な視線方向が計算できることを示した。次にカメラが未校正である場合にも、CRT 画面上のアフィン基底をもとに、投影像と CRT 画面上の画素との間の関係を求めることにより、画像から正確な視線方向が計算できることを示した。

提案したビジュアル・インターフェイスを実際にユーザに用いてもらい、視線方向にマウスポインタを自由に制御できることを確認した。次にビジュアル・インターフェイスによるマウスポインタの位置決め精度の評価を行い、カメラの内部、外部パラメータに依存せず良好な結果が得られることを確認した。

投影像のトラッカーの改良などにより、制御精度を向上させることなどが今後の課題である。

参考文献

- [1] R. Cipolla, Y. Okamoto, and Y. Kuno. Robust structure from motion using motion parallax. In *Proc. 4th International Conference on Computer Vision*, pages 374–382, Berlin, 1993.
- [2] O.D. Faugeras. What can be seen in three dimensions with an uncalibrated stereo rig? In G. Sandini, editor, *Proc. 2nd European Conference on Computer Vision*, pages 563–578, Santa Margherita, Italy, 1992. Springer-Verlag.
- [3] A. Gee and R. Cipolla. Determining the gaze of faces in images. Technical Report CUED/F-INFENG/TR.174, University of Cambridge, March 1994.
- [4] R.I. Hartley, R. Gupta, and T. Chang. Stereo from uncalibrated cameras. In *Proc. Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pages 761–764, 1992.
- [5] J.J. Koenderink and A.J. van Doorn. Affine structure from motion. *J. Opt. Soc. America*, pages 377–385, 1991.
- [6] H.C. Longuet-Higgins and K. Pradny. The interpretation of a moving retinal image. *Proc. R. Soc. Lond.*, B208:385–397, 1980.
- [7] J.L. Mundy and A. Zisserman. Projective geometry for machine vision. In J.L. Mundy and A. Zisserman, editors, *Geometric Invariance in Computer Vision*, pages 463–519. MIT Press, Cambridge, USA, 1992.
- [8] V.S. Nalwa. *A Guided Tour of Computer Vision*. Addison Wesley, 1993.
- [9] 郡敏昭. 射影平面の幾何学. 遊星社, 1988.
- [10] 酒井善則. ビジュアルインターフェイス—画像による論理情報の新しい伝達法—. *情報処理*, 33(2), 1992.
- [11] 出口光一郎. 画像と空間—コンピュータビジョンの幾何学—. 昭晃堂, 1991.
- [12] 佐藤 淳. コンピュータビジョン—視覚の幾何学—. コロナ社, 1999.
- [13] 大須賀節雄編. ヒューマンインターフェイス. オーム社, 1992.
- [14] 鳥脇純一郎. ヒューマンインターフェイスと画像処理. コロナ社, 1995.