

両眼眼球運動に基づく読書時の視点移動

守田 了 大崎 光晴 石原 由紀夫

山口大学工学部

宇部市常盤台 2557

morita@kde.yamaguchi-u.ac.jp

ヒトの読書時の両眼眼球運動をシミュレートする。ヒトは視野の狭い両眼の眼球を高速に動かしながら広範囲の空間を把握しているが、実際には高速に視点を移動している感覚はない。これは注視点の画像が大きく変化しながらも、短期記憶に蓄えられるイメージが大きく変化しないためと考える。このことから本稿では短期記憶に蓄えられる3次元イメージに基づき注視点の移動を提案する。特に読書時の視点移動を実現するためには、行上における次の単語を探す視点移動と行の最後における次の行を探す視点移動を実現する必要がある。本稿ではタスクに応じた3次元短期記憶イメージを導入することにより、次の単語を探す狭い範囲の視点移動と次の行を探す広い範囲の視点移動を実現する。

実際に3次元の短期記憶イメージにもとづく両眼による読書時の注視点の移動をシミュレートし有効性を示す。

キーワード 両眼眼球運動, 中心窩視覚, 3次元短期記憶イメージ, 読書

Two Eyes Movement in Reading

Satoru MORITA, Mituharu Osaki and Yukio ISHIHARA

Faculty of Engineering, Yamaguchi University

2557 Tokiwadai, Ube, 755, Japan

We simulate two eyes movement on reading. Though human grasps the real world while two eyes moves quickly, we do not have the consciousness that we move two eyes quickly. That is why the image saved in short-term memory does not change, though the views observed by two eyes change. So we propose 3-D short-term memory image saved about edge features. In especially, we need to realize the eye movements on line and the end of line in reading. In this paper, we realize two kinds of two eyes movement using two kinds of 3-D short-term memory images according to tasks.

We show the effectiveness by simulating the two eyes movement based on 3-D short-term memory image in reading actually.

keyword: Two Eyes Movement, Active Foveated Vision, 3-D Short-term Memory Image, Reading

1 はじめに

中心窩視覚を実現するさまざまな CCD 素子を用いた視覚システムが提案されている [1][2][3][4]. 一般に中心窩視覚に基づく視点移動は知覚されている中心窩画像の範囲で行われる. 中心窩視覚は視野が狭いため, 中心窩画像に基づく視点の移動では広範囲の視点の移動を行うサッカードは困難である.

広範囲にわたる注視点の移動を可能にするために, 短期記憶 [5] に基づく中心窩視覚システムが提案されている [6]. また 3 次元世界のイメージに基づく両眼の視点移動が提案されている [7]. 他方読書時の視点移動をシミュレートし, ヒトの視点移動の特性が起こる要因が分析されている [8]. しかし, ここでは両眼の眼球が協調した注視点の移動による読書時の視点移動については議論されていない. ヒトは両眼の視線から得られる 2 枚の画像から奥行きを計算し, 3 次元世界を理解している. そのため読書時の視点移動においても, 両眼の眼球が協調した視線の移動を考える必要がある. 特に読書時の視点移動を実現するためには, 行上における次の単語を探す視点移動と行の最後における次の行を探す視点移動を実現する必要がある [9]. 本稿ではタスクに応じた 3 次元短期記憶イメージを導入することにより, 次の単語を探す狭い範囲の視点移動と次の行を探す広い範囲の視点移動を実現する. このようにタスクモデルと 3 次元短期記憶イメージに基づく両眼眼球運動による読書時の注視点の移動を提案する.

2. では中心窩視覚と短期記憶について述べる. 3. では両眼から 3 次元世界を生成するために必要な技術について述べる. 4. では短期記憶の 3 次元イメージの生成と読書時における短期記憶の 3 次元イメージに基づく両眼による注視点の移動について述べ, 実際に提案する読書時の眼球運動をシミュレートする.

2 中心窩視覚と短期記憶

2.1 中心窩

中心窩視覚では画素密度分布が中心窩に相当する近傍で高く, 周辺に行くに従って低くなっている. Wilson は空間不変な受容野配列を提案している [10]. 回転やスケールに不変であるので, log-polar マッピングモデルはマシビジョンの画像サンプリングモデルとして広く使われている. 周辺に行くほど大きくなるように円の半径を変えることが必要になる. そのため, n 番目の円の離

心率 R_n は以下のように定義される [10][11].

$$R_n = R_0 \left(1 + \frac{2(1 - O_v)C_m}{2 - (1 - O_v)C_m} \right)^n \quad (1)$$

R_0 は中心窩領域の半径であり, C_m は中心窩領域の中心から受容野の中心までの離心率に対する受容野の直径の割合であり, O_v は部分的重複率である. もし受容野が他の受容野に接触していれば, $O_v = 0$ となり, 受容野が次の受容野の中心に達していれば, $O_v = 0.5$ となる. R_n はさらに細かく同じ大きさの領域に等分割される. 各画素の色は分割された各マスの重心上の色を用いている. θ 方向と R 方向の xy 座標をとり, それぞれの座標に RGB を割り当てた画像を $R\theta$ 画像とよぶ.

$R\theta$ 画像と xy を座標にもつ中心窩画像は相互に変換される必要がある. $R\theta$ 画像から xy を座標にもつ中心窩画像へ以下の式で変換される. ただし c_x, c_y は画像中の中心窩画像の画像面上の中心の座標を表す.

$$x = R_n \cos(\theta) + c_x \quad (2)$$

$$y = R_n \sin(\theta) + c_y \quad (3)$$

xy を座標にもつ中心窩画像から $R\theta$ 画像へ以下の式で変換される.

$$R_n^2 = (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2 \quad (4)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x - c_x}{R_n} \quad (5)$$

本稿ではこのモデルに従い中心窩画像を生成する.

3 両眼による立体視

両眼の眼球を用いて 3 次元世界を復元するために必要な技術について述べる.

3.1 カメラ行列の算出

カメラ行列 M はワールド座標系からカメラの表示面への変換行列であり, カメラの位置と方向と焦点距離と画像のサイズで決まる. カメラ行列は以下の四つの行列の積として表される.

$$M = T \cdot M_1 \cdot M_2 \cdot M_3 \quad (6)$$

T は 3 次元空間にある物体を構成する点の座標から齊次座標 [12] への変換であり, M_1 は物体を構成する点の齊次座標から 3 次元空間にある画像への透視変換であり, M_2 は 3 次元空間にある画像から画像の形成された二次元平面への変換であり, M_3 は画像の形成された

2次元平面から表示面への変換である。本節では齊次座標を $[\]$ を用いて表し、実数の組合せとしてのベクトルを $\langle \ \rangle$ を用いて表し、空間の点を表す座標を特に区別する時は $(\)$ を用いて表す。

図1に3次元空間にある画像から表示面への変換を模式的に示す。視点を $E(e_1, e_2, e_3)$ 、画像面の参照点を $P(x_0, y_0, z_0)$ 、法線ベクトルを $n = \langle a, b, c \rangle$ 、画像面上方向ベクトルを v とする。画像の形成される2次元平面の座標軸を区別するため s, t 軸とし、 t 軸が先の上方向ベクトルで決まった軸である。この2次元平面にある $A(-h, -k)$ 、 $B(h, -k)$ 、 $C(h, k)$ 、 $D(-h, k)$ が対象の空間にある画像面内の A_{object} 、 B_{object} 、 C_{object} 、 D_{object} に対応しているとする。また s 軸、 t 軸方向に対応する画像面にある3次元空間での単位ベクトルを ω_1, ω_2 とする。表示面へは、画像の形成された先の2次元平面にある A, B, C, D が、表示装置固有の座標 $A_{image}(u_0, v_0)$ 、 $B_{image}(u_1, v_0)$ 、 $C_{image}(u_1, v_1)$ 、 $D_{image}(u_0, v_1)$ に対応するように変換される。

M_3 は画像の形成された2次元平面から表示面への変換であり、射影平面上 [12] での拡大、縮小、並行移動の組合せなので、

$$M_3 = \begin{bmatrix} \frac{u_1 - u_0}{2h} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{v_1 - v_0}{2k} & 0 \\ \frac{u_1 + u_0}{2} & \frac{v_1 + v_0}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

と表せる。

M_1 は3次元空間にある物体を構成する点の齊次座標から3次元空間における画像面への透視変換である。画像面は参照点 $P(x_0, y_0, z_0)$ を通り、法線ベクトルが $n = \langle a, b, c \rangle$ であるので、この平面の齊次座標を、 $\mu[\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4]$ とすると、 $[\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4] = [a, b, c, -(ax_0 + by_0 + cz_0)]$ である。視点の齊次座標が $[e_1, e_2, e_3, 1]$ なので、 M_1 は

$$M_1 = \begin{bmatrix} \mu_2 e_2 + \mu_3 e_3 + \mu_4 & -\mu_1 e_2 \\ -\mu_2 e_1 & \mu_1 e_1 + \mu_3 e_3 + \mu_4 \\ -\mu_3 e_1 & -\mu_3 e_2 \\ -\mu_4 e_1 & -\mu_4 e_2 \\ -\mu_1 e_3 & -\mu_1 \\ -\mu_2 e_3 & -\mu_2 \\ \mu_1 e_1 + \mu_2 e_2 + \mu_4 & -\mu_3 \\ -\mu_4 e_3 & \mu_1 e_1 + \mu_2 e_2 + \mu_3 e_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

と表せる。

M_2 は3次元空間にある画像面から画像の形成された2次元平面への変換行列であり、画像面上で横方向の単

位ベクトルは、

$$\omega_1 = \langle \omega_{11}, \omega_{12}, \omega_{13} \rangle = \frac{v \times n}{|v \times n|} \quad (9)$$

であり、画像面上で上方向の単位ベクトルは、

$$\omega_2 = \langle \omega_{21}, \omega_{22}, \omega_{23} \rangle = \frac{n \times \omega_1}{|n \times \omega_1|} = \frac{n \times \omega_1}{|n|} \quad (10)$$

である。

M_μ を画像の形成された2次元平面から3次元空間にある画像面への変換行列とすると、

$$M_\mu = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & 0 \\ \omega_{21} & \omega_{22} & \omega_{23} & 0 \\ x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

である。したがって

$$M_2 = M_\mu^T (M_\mu M_\mu^T)^{-1} \quad (12)$$

と表せる。

回転行列を T_r 、平行移動を T_t 、拡大を T_m とすると

$$T = T_r \cdot T_t \cdot T_m \quad (13)$$

となる。但し

$$T = T_x \cdot T_y \cdot T_z$$

T_z, T_y, T_x はそれぞれ z 軸周り、 y 軸周り、 x 軸周りの回転を意味する。

同様に以下の四つの行列の積として表される左カメラと右カメラの行列

$$M_L = T_L \cdot M_{L1} \cdot M_{L2} \cdot M_{L3} \quad (14)$$

$$M_R = T_R \cdot M_{R1} \cdot M_{R2} \cdot M_{R3} \quad (15)$$

は計算される。

3.2 右画像上の点と左画像上の点とカメラ行列から3次元空間における点の座標の算出

空間上の点 P を齊次座標で $P[p] = P[p_1, p_2, p_3, 1]$ とすると、 h_L, h_R をある実数として左画像上の点を $P[p_L] = P[p_{L1}, p_{L2}, 1]$ 、右画像上の点を $P[p_R] = P[p_{R1}, p_{R2}, 1]$ とすると、

$$h_L \langle p_{L1}, p_{L2}, 1 \rangle = \langle p_1, p_2, p_3, 1 \rangle M_L \quad (16)$$

$$h_R \langle p_{R1}, p_{R2}, 1 \rangle = \langle p_1, p_2, p_3, 1 \rangle M_R \quad (17)$$

となり、この2式を一緒にすると

$$p[M_R, M_L] = \langle h_{LP_L}, h_{RP_R} \rangle \quad (18)$$

$$M_L = [m'_1 | m'_2 | m'_3], M_R = [m''_1 | m''_2 | m''_3]$$

となり、

$$p[m'_1, m'_2, m'_3, m''_1, m''_2, m''_3] = \langle h_{LP_L1}, h_{LP_L2}, h_L, h_{RP_R1}, h_{RP_R2}, h_R \rangle \quad (19)$$

となる。したがって $h_L = pm'_3, h_R = pm''_3$ を得る。これよりまず

$$p[m'_1 m'_2 m''_1, m''_2] = \langle p \cdot m'_3 p_{L1}, p \cdot m'_3 p_{L2}, p \cdot m''_3 p_{R1}, p \cdot m''_3 p_{R2} \rangle \quad (20)$$

である。ゆえに、

$$(p_1, p_2, p_3)T = - \langle m'_{14} - m'_{34} p_{L1}, m'_{24} - m'_{34} p_{L2}, m''_{14} - m''_{34} p_{R1}, m''_{24} - m''_{34} p_{R2} \rangle \quad (21)$$

但し、

$$T = \begin{bmatrix} m'_{11} - m'_{31} p_{L1}, m'_{21} - m'_{31} p_{L2}, \\ m'_{12} - m'_{32} p_{L1}, m'_{22} - m'_{32} p_{L2}, \\ m'_{13} - m'_{33} p_{L1}, m'_{23} - m'_{33} p_{L2}, \\ m''_{11} - m''_{31} p_{R1}, m''_{21} - m''_{31} p_{R2} \\ m''_{12} - m''_{32} p_{R1}, m''_{22} - m''_{32} p_{R2} \\ m''_{13} - m''_{33} p_{R1}, m''_{23} - m''_{33} p_{R2} \end{bmatrix}$$

である。(21)式の左辺を d とすると、

$$(p_1, p_2, p_3) = T^T (TT^T)^{-1} d \quad (22)$$

が得られる。

これにより右画像上の点 $\langle p_{R1}, p_{R2}, 1 \rangle$ と左画像上の点 $\langle p_{L1}, p_{L2}, 1 \rangle$ とカメラ行列 M_L, M_R から3次元空間における点の座標 (p_1, p_2, p_3) が算出される。

3.3 注視する3次元空間における点の座標からカメラの向きの算出

注視する3次元空間における点の座標 (p_1, p_2, p_3) から左カメラと右カメラのパン方向チルト方向の回転角 $\langle \theta_l, \phi_l \rangle$ と $\langle \theta_r, \phi_r \rangle$ を算出する。左カメラの回転中心を (cl_1, cl_2, cl_3) 右カメラの回転中心を (cr_1, cr_2, cr_3) 左カメラの方向を $X' \langle i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} \rangle$ 右カメラの方向を $X'' \langle i_{R1}, i_{R2}, i_{R3} \rangle$ とすると、3次元空間にある点

(p_1, p_2, p_3) を注視するために必要な左カメラの方向 Y' は

$$A = \langle p_1 - cl_1, p_2 - cl_2, p_3 - cl_3 \rangle \quad (23)$$

$$Y' = \langle \frac{p_1 - cl_1}{|A|}, \frac{p_2 - cl_2}{|A|}, \frac{p_3 - cl_3}{|A|} \rangle \quad (24)$$

となる。回転行列 R_L は $X'Y'$ から

$$Y' = R_L X' \quad (25)$$

$$Y'(X'X'^T)^{-1}X'^T = R_L \quad (26)$$

と計算される。

最初に y 軸周り (チルト方向) に θ_l 回転、次に x 軸周り (パン方向) に ϕ_l 回転するとする。

$$R_L = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \quad (27)$$

とすると

$$T_{ry} = \begin{bmatrix} \cos\phi_l & 0 & \sin\phi_l \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\phi_l & 0 & \cos\phi_l \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$T_{rx} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_l & \sin\theta_l \\ 0 & -\sin\theta_l & \cos\theta_l \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$T_{rx} \cdot T_{ry} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\phi_l & 0 & \sin\phi_l \\ -\sin\theta_l \sin\phi_l & \cos\theta_l & \sin\theta_l \cos\phi_l \\ -\cos\theta_l \sin\phi_l & -\sin\theta_l & \cos\theta_l \cos\phi_l \end{bmatrix} \quad (30)$$

よって

$$\sin\phi_l = r_{13} \quad (31)$$

$$\cos\theta_l = r_{22} \quad (32)$$

$$X' = \langle i_{L1}, i_{L2}, i_{L3} \rangle = \langle 0, 0, 1 \rangle$$

の場合は

$$\sin\phi_l = \frac{p_1 - cl_1}{|A|} \quad (33)$$

$$\cos\theta_l = \frac{p_2 - cl_2}{|A|} / (1 - \sin^2\phi_l) \quad (34)$$

となるため ϕ_l, θ_l が求まる。

右カメラも同様にして三次元空間にある点 (p_1, p_2, p_3) を注視するために必要な右カメラの方向 Y'' は

$$A = \langle p_1 - cl_1, p_2 - cl_2, p_3 - cl_3 \rangle \quad (35)$$

$$Y'' = \left\langle \frac{p_1 - cl_1}{|A|}, \frac{p_2 - cl_2}{|A|}, \frac{p_3 - cl_3}{|A|} \right\rangle \quad (36)$$

となる。回転行列 R_R は

$$Y'' = R_R X'' \quad (37)$$

$$Y'' (X'' X''^T)^{-1} X''^T = R_R \quad (38)$$

と計算される。同様に ϕ_r, θ_r が求まる。

これにより注視する 3 次元空間における点の座標 (p_1, p_2, p_3) から左カメラの向き $\langle \phi_l, \theta_l \rangle$ と右カメラの向き $\langle \phi_r, \theta_r \rangle$ が算出される。

4 3次元の短期記憶イメージに基づく読書時の視点移動

短期記憶に基づく中心窩視覚による注視点の移動について述べる。まず注視点の移動に必要な短期記憶イメージについて説明し、次に読書時の注視点の移動について述べる。

4.1 短期記憶

短期記憶は文字通り、およそ 20 秒くらいまでの短期間、情報を保存しておくところである。ヒトは注視点を高速に移動しているにもかかわらず、注視点を移動している意識はない。これは注視点の画像が大きく変化しながらも短期記憶に蓄えられるイメージが大きく変化しないためと考える。このことから、本稿では短期間の 3 次元イメージを短期記憶に蓄えることによって、瞬時に注視点を移動しているにもかかわらず、観測する世界が大きく移動して見えない安定な 3 次元イメージと広範囲にわたる注視点の移動を実現する。

4.2 3次元の短期記憶エッジ特徴イメージ

視点移動の基準となるエッジなどの low-level の特徴から生成される短期間蓄えられる 3 次元空間イメージを 3 次元の短期記憶エッジ特徴イメージと呼ぶ。この 3 次元特徴イメージはワールド座標系に存在する特徴点の座標と解像度で表される。但し右カメラの $R\theta$ 空間上の特徴点と左カメラの $R\theta$ 空間上の特徴点から生成される 3 次元空間上の特徴で表される。これを用いて次の注視点の座標を算出する。特に読書時の視点移動ではエッジ特

徴が重要なため、本稿ではエッジ特徴に着目する。3 次元特徴イメージの生成に先立ち、右カメラの $R\theta$ 画像からエッジ特徴を抽出する。

まず右カメラの $R\theta$ 空間上のエッジ特徴を抽出する。本稿では、受容野から得られた特徴に対して加重平均による平滑化を必要としない SUSAN オペレータを用いてエッジを抽出する [13].

$$N(r_0) = \sum_{r \in CM} 1 - \delta(\|I(r) - I(r_0)\| - t) \quad (39)$$

r は点の座標、 r_0 はマスクの中心の座標、 M はマスクの範囲、 I はカラー画像の RGB 値、 t は閾値である。SUSAN オペレータは円形のマスクを用い、中心の画素の輝度と近い輝度を持つマスク内の画素を数える。

$$\delta(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (40)$$

3 次元の短期記憶エッジ特徴イメージの生成アルゴリズムを説明する。

0) 右カメラの $R\theta$ 画像からエッジを検出する。

1) 右カメラのエッジが存在する $R\theta$ 画像に対応する中心窩画像の xy 座標から 1 画素を選び、左カメラの中心窩画像におけるエピポーララインを求める。エピポーララインは二つのカメラのレンズ中心と右カメラの画像上の 1 画素の 3 点で決定される平面が、左カメラの画像面と交わる線である。

2) 相関法を用いて 7×7 のウィンドウを回転させた上で各画素ごと RGB の差の絶対値の総和 (SAD (Sum of Absolute Difference)) が最小になる回転を求め、その値が最小になるエピポーラライン上の点を対応点とする [14].

3) 右カメラの中心窩画像における xy 座標と左カメラの中心窩画像における xy 座標からワールド座標系における点の座標を計算する ((3.1)(3.2)).

4) 3 次元の座標と併せて色と時刻値、右カメラの半径 n_r 、左カメラの半径 n_l を保存する。これらの情報を比較することにより短期記憶エッジ特徴イメージを更新する。

5) 1)2)3)4) を右カメラのエッジが存在する $R\theta$ 画像に対応する中心窩画像のすべての xy 座標からワールド座標系における点の座標を計算し、3 次元の短期記憶エッジ特徴イメージを生成する。

6) 読書時の各タスクに応じた3次元の短期記憶エッジ特徴イメージから次の視点に移動する興味ある特徴を次の視点に選び、ワールド座標系における右眼の視線および左眼の視線を計算する(3.3).

7) 短期記憶イメージ上の各座標の時刻値に1を加える。現在の時刻値と短期記憶イメージ上の点の時刻値の差を計算し、一定値以上大きい場合はその画像を短期記憶イメージから削除する。

実パンチルトカメラを用いて視点移動をシミュレートする際には、Tsaiの方法を用いて事前に校正を行う[15].

4.3 読書時の視点移動

視野の周辺で何か物体の移動が感知されると、反射的かつ瞬時にその移動物体に視線が向く。この瞬時の眼球運動を実現するために、3次元の短期記憶エッジ特徴イメージを用いて注視点を決定する。3次元特徴イメージは短期記憶に存在する3次元世界中の特徴点の集合である。3次元特徴イメージの中の特徴から次に移動する注視点を決定する。特徴には様々なものが考えられるが、明るさ、線、角などの特徴が一般的である。 R, G, B のそれぞれの画像から、これらの特徴量を抽出し、これらの特徴を多く含む視点を候補とする。但し読書時の視点移動においてはコーナー特徴を含むエッジ特徴を用いて視点移動を実現している。

注視点が行上にある場合は1枚の中心か画像を保存できる3次元の短期記憶エッジ特徴イメージを用い、注視点が行の最後にある場合は行の始めから記憶している3次元のエッジ特徴短期記憶を用いる。2つの短期記憶は並列に記憶され、注視点が行上にあるか行の最後にあるかで、2つの短期記憶を使い分ける。注視点が行上にある場合は1枚の中心か画像を保存できる3次元の短期記憶エッジ特徴イメージから、注視領域を決定するためにマスク領域に最も多く3次元のエッジ特徴を含んでいる方向を検出する。注視点の進行方向と同じ方向と逆方向の注視領域を検出し、注視点の位置から空白までの領域を注視点の進行方向と逆方向において足し合わせた領域中のエッジ密度が一定値になっていない場合は、同じ領域から次の注視点位置を決定する。エッジ密度が一定値を越えている場合は、注視点の進行方向における次の空白からその次の空白までのマスク領域から次の注視点を決定する。行の最後にある場合は行の始めから記憶している3次元の短期記憶エッジ特徴イメージを最後の注視点から行の始めにむけて視点を進めるアルゴリズムとは逆にエッジをたどり行の先頭の空白を検出し、行の下

の空白の下の行付近から注視点を決定する。エッジをたどる場合何度もマスク領域を用いてエッジ密度が高い方向を検出しながら戻っているものの、記憶上のエッジをたどっているため、新たに視る必要がないため、一回の視点移動で行の終りから行の先頭に視点を移すことが可能になる。

注視領域から注視点を決定する場合は、 i 番目の特徴における左カメラの R_n の大きさを n_{li} と右カメラの R_n の大きさを n_{ri} とすると $n_{ri} * n_{li}$ の値を用いる。注視領域に含まれるエッジ特徴が N 個とすると、 i 番目のエッジ特徴に視点を移動する確率は以下の計算により決定する。

$$f_i = \frac{n_{ri} * n_{li}}{\sum_i^n n_{ri} * n_{li}} \quad (41)$$

次に求めた3次元座標から右カメラの向き、左カメラの向きが計算される(3.3)。右カメラと左カメラが同じ注視点を観測することが重要である。3次元の特徴イメージをもとに計算しているため、3次元空間中に存在する注視点を向く両眼の動きが実現される。

次の単語への視点移動のための3次元の短期記憶エッジ特徴イメージと次の行への視点移動のための3次元の短期記憶エッジ特徴イメージを用いることにより、読書時の視点移動における狭い範囲での次の単語への視点移動と広い範囲での次の行への視点移動が実現される。

4.4 読書時の視点移動のシミュレーション

実際に読書時の視点移動を提案するアルゴリズムによりシミュレートした。焦点距離 $f = 519.615$ カメラを $(-5, 0, 0), (5, 0, 0)$ に配置し、 $512 * 256$ の画像に描かれた文章を $(0, 0, 700)$ の位置に画像の中心を合わせて配置した。中心窩画像を生成するのに必要なパラメータは $R_0 = 7, C_m = 0.5, O_v = 0.9, length = 170$ を用いた。図1(a)は注視点が2行目の始め、図1(b)は2行目の真中、図1(c)は2行目の最後における右カメラの中心窩画像上の抽出されたエッジ特徴が黒い点で表されている。図2(a)は注視点が2行目の始め、図2(b)は2行目の真中、図2(c)は2行目の最後における $R\theta$ 画像である。図1からエッジ特徴が検出されていることがわかる。また、図1(a)(b)(c)の3枚の図においていずれの場合も注視点が2行目をとらえていることがわかる。

図3(a)は注視点が1行目の行の終りにおける次の行へ視点を移動するための3次元の短期記憶エッジ特徴イメージであり、図3(b)は2行目の行の終りにおける次の行へ視点を移動するための3次元の短期記憶エッジ特徴イメージである。3次元の短期記憶エッジ特徴を

(0, 0, 0) の位置から (0, 0, 700) の方向に向けて、焦点距離 $f = 519.615$ のカメラを用いて得られた画像である。行の始めから記憶を始め、行の終わりまでエッジ特徴がイメージとして記憶されていることがわかる。また注視点が2行目上の3次元のエッジ特徴を追跡できていることがわかる。次の行へ注視点を移動する際にこの3次元の短期記憶エッジ特徴をたどり、行の始めの次の行へ視点を移すことができる。

図4は注視点が行上にあるときの次の単語へ視点を移動するための短期記憶エッジ特徴イメージである。図4(a)は(0, 0, 0)の位置から(0, 0, 700)の方向に向けて、焦点距離 $f = 519.615$ のカメラを用いて得た3次元の短期記憶エッジ特徴イメージであり、図4(b)はワールド座標系における xy 平面に並行投影した3次元の短期記憶エッジ特徴イメージであり、図4(c)はワールド座標系における xz 平面に並行投影した3次元の短期記憶エッジ特徴イメージである。3次元の短期記憶エッジ特徴が復元されていることがわかる。

5 むすび

次の単語への視点移動と次の行への視点移動のために二つの3次元の短期記憶エッジ特徴イメージを用いることにより、読書時の視点移動における狭い範囲での次の単語への視点移動と広い範囲での次の行への視点移動を実現した。実際に3次元の短期記憶エッジ特徴イメージを生成し、読書時における両眼眼球運動による注視点の移動をシミュレートした。

謝辞

公立はこだて未来大学 川嶋 稔夫教授のもとヒトの視点移動を計測させていただきました。感謝致します。

参考文献

- [1] G. Sandini, P. Dario and F. Fantini, "A RETINA LIKE SPACE VARIANT CCD SENSOR," SPIE 1242, pp. 133-140, 1990.
- [2] T. Baron, M. D. Levine and Y. Yeshurun, "Exploring with a Foveated Robot Eye System," 12th International Conference on Pattern Recognition, pp. 377-380, 1994.
- [3] 末松 良一, 山田 宏尚, "中心窩を有する新しい視覚センサの開発," 計測自動制御学会, vol. 31, No. 10, pp.1556-1563, 1995.
- [4] Y. Kuniyoshi, N. Kita, S. Rougeaux and T. Suehiro, "A Foveated Wide Angle Lens for Active Vision," Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp. 2982-2988, 1995.

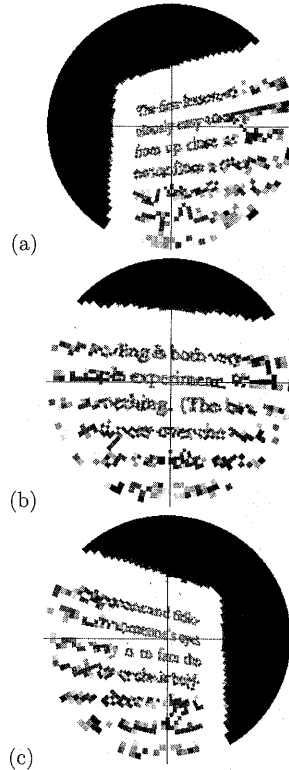


図1: 注視点が (a)2行目の始め (b)2行目の真中 (c)2行目の最後における中心窩画像上の抽出されたエッジ特徴点

- [5] R. C. Atkinson and R. M. Shiffrin, "Human memory: A proposed system and its control process., The Psychology of Learning and Motivation, Vol. 2, Academic Press, 1968.
- [6] S. Morita and Y. Ishihara, "Control of Foveated Vision based on Short-term Memory," proc. of IEEE MFI 99, pp. 13-18, 1999.
- [7] 守田 了, 石原 由紀夫, "中心窩視覚を用いた3次元世界のイメージの生成," PRMU98-67, 1998.
- [8] 石原 由紀夫, 守田 了, "読書時の視点移動の実現," 電子情報通信学会論文誌, J84-D-II, no. 1, pp. 111-119, 2001.
- [9] 守田 了, 石原 由紀夫, "短期記憶とタスクモデルに基づく視点移動の実現," MIRU2000, I, pp.209-214, 2000.
- [10] S. W. Wilson: "On the retina-cortical mapping," Int. J. Man-Machine Stud. 18, pp. 361-389, 1983.
- [11] H. Yamamoto, Y. Yeshurun and M. D. Levine, "An Active Foveated Vision System: Attentional Mechanisms and Scan Path Coverage Measures," Computer Vision and Image Understanding, Vol. 63, No. 1, pp. 50-65, 1996.
- [12] 杉原 厚吉, "グラフィックスの数理," 共立出版, 1995.

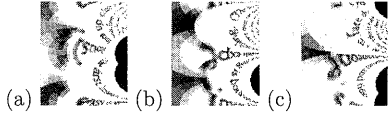


図 2: 注視点が (a)2 行目の始め (b)2 行目の真中 (c)2 行目の最後における $R\theta$ 画像

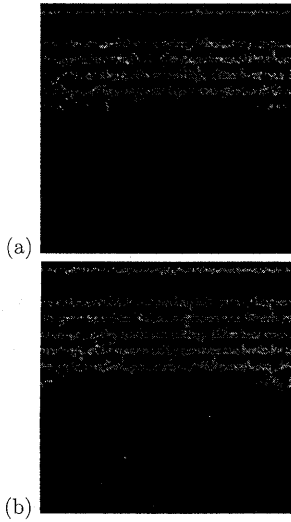


図 3: 注視点 (a)1 行目の行の終りにおける次の行へ視点を移動するための短期記憶エッジ特徴イメージ (b)2 行目の行の終りにおける次の行へ視点を移動するための短期記憶エッジ特徴イメージ. 三次元の短期記憶エッジ特徴を $(0, 0, 0)$ の位置から $(0, 0, 700)$ の方向に向けて、焦点距離 $f = 519.615$ のカメラを用いて得られた画像である.

- [13] S. M. Steve and M. Brady, "SUSAN - a new approach to low level image processing, *Int. J. Computer Vision*, 23(1), pp. 45-78, 1997.
- [14] T. Kanade and M. Okutomi, "A stereo matching algorithm with an adaptive window: Theory and experiment," *IEEE Trans, PAMI*, Vol. 16, No. 9, pp. 920-932, 1994.
- [15] R. Y. Tsai, "An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision," *CVPR*, pp. 364-374, 1986.

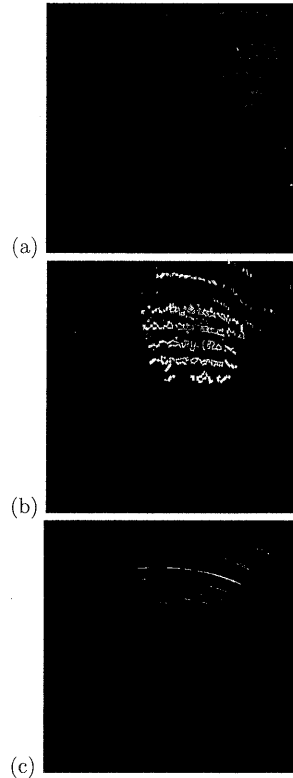


図 4: 注視点が行上にあるときの次の単語へ視点を移動するための短期記憶エッジ特徴イメージ. (a) 三次元の短期記憶エッジ特徴を $(0, 0, 0)$ の位置から $(0, 0, 700)$ の方向に向けて、焦点距離 $f = 519.615$ のカメラを用いて得られた画像である. (b) ワールド座標系における xy 平面に並行投影した 3 次元の短期記憶エッジ特徴イメージ (c) ワールド座標系における xz 平面に並行投影した 3 次元の短期記憶エッジ特徴イメージ