

要旨

本研究では、3次元 UI 可動型デジタルプロトタイプを用いた情報機器の操作性評価をより多角的に行うことを目的とし、安価な機器を用いてデジタルプロトタイプ上のユーザの視線追跡が可能な Eye-Tracking システムを提案する。

1. はじめに

情報機器の普及に伴い、使いやすく、わかりやすいユーザインタフェース(UI)機能が求められている。現在、UI の操作性評価には、UI 可動型物理プロトタイプをエンドユーザに操作させ評価を行うユーザテスト法が一般的である。しかし、この物理プロトタイプは設計後期でなければ製作できず、評価結果を最終製品へ反映できない。そこで、物理プロトタイプと同様の UI 操作が計算機上で模擬できる 3次元 UI 可動型デジタルプロトタイプをユーザテストに活用し、操作性を評価可能なシステムが本研究により開発されている[1]。この評価に加え、さらにデジタルプロトタイプ操作時のユーザの注視点や視線移動速度を実時間で測定できれば、誤操作時の原因特定や、ユーザの心理状態の評価も可能となり、より高精度な操作性評価が可能となると考えられる。

そこで本研究では、3次元 UI 可動型デジタルプロトタイプ上のユーザ操作時の実時間視線推定を可能とする、安価な USB カメラを用いた Eye-Tracking システムを開発する。

2. 視線推定アルゴリズム

提案する Eye-Tracking システムの概要を図 1 に示す。本システムは LCD 画面に表示したデジタルプロトタイプ上の注視オブジェクトの判別、視線移動速度の計測を行い操作性の評価を行う。システムでの処理は大きく 4 つのステップに分けることができる。ステップ 1 ではキャプチャ画像から、瞳孔輪郭像の検出と LED スポット像の検出を行う。ステップ 2 では、角膜中心位置と瞳孔中心位置を導出し、視線ベクトルを求める。ステップ 3 では、3D オブジェクト上の注視点を求める。ステップ 4 では視線の動きや速度から UI 可動型デジタルプロトタイプの操作性評価を行う。

本報告ではステップ 1 とステップ 2 の実装結果について報告する。提案する視線ベクトル推定のアルゴリズムは、[2]で提案されている角膜中心検出手法と、[3]で提案されている瞳孔中心検出手法を組み合わせた手法である。以下に詳細を述べる。

(1) 瞳孔輪郭像と LED スポット像の検出

視線推定の流れを図 2 に示す。瞳孔輪郭像の検出は、キャプチャ画像に対して 2 値化を行った後、楕円輪郭に楕円をフィッティングし検出する。

一方 LED スポット像の検出は、まず、同様に 2 値化を行う。その後ラベリング処理によって 2 個の LED スポット像の領域に対してラベル付を行い、その重心座標を求める。これを各 LED スポット像の座標として用いる。

(2) 角膜中心位置の導出

続いて角膜中心の位置を求める。図 3 に示すように IR-LED の位置 L と LED スポット像 G_{img} と投影中心 O と角膜中心 C は、同一平面 Π_L 上に存在する。 Π_L の法線ベクトル Π_L は式(1)で定義される。

$$\Pi_L = L \times G_{img} \quad (1)$$

LED が 2 つの場合、平面 Π_{L1} , Π_{L2} の 2 平面を定義でき、 C と O は両平面上の点であるため、両平面の交線上に存在する。この交線のベクトル R_{cornea} は式(2)で表される。

$$R_{cornea} = \Pi_{L1} \times \Pi_{L2} \quad (2)$$

図 4 のように、 C は、 O を通り R_{cornea} 方向の直線上に存在する。また、角膜が C を中心とする半径 r_c の球体で近似できるとする。角膜表面における LED スポットを G とし、 G から

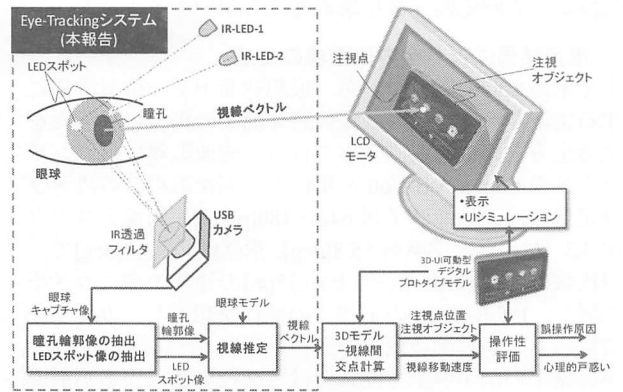


図 1 提案する Eye-Tracking システム概要

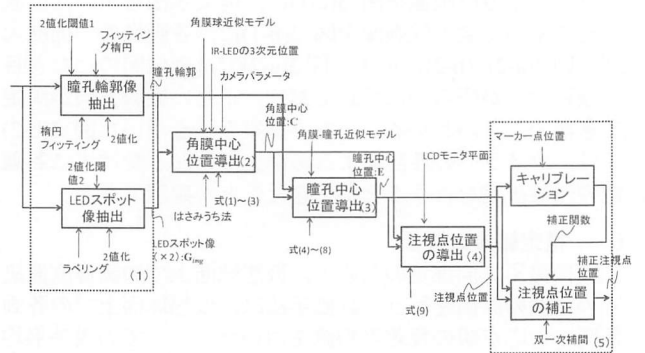


図 2 視線点推定の概要

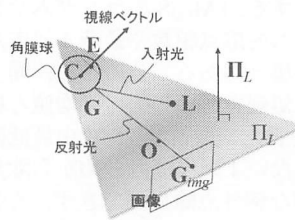


図 3 平面 Π_L の定義

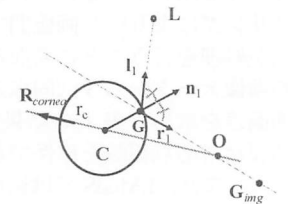


図 4 角膜中心の導出

L までの単位ベクトルを I_1 , G から O に向かう単位ベクトルを r_1 , G における角膜の法線ベクトルを n_1 とすると、反射の法則式(3)を満たし、 O を通り R_{cornea} 方向の直線上にある角膜中心 C の位置を、はさみうち法で求めることができる。

$$r_1 \cdot n_1 = I_1 \cdot n_1 \quad (3)$$

(3) 瞳孔中心位置の導出

次に瞳孔中心位置を図 5 のモデルに基づき求める。まず、画像内における瞳孔輪郭像上の点を、 G を含む角膜に接する平面 Σ 上の点 J_k に投影する。そして角膜表面上の点 I_k を G と J_k の距離 M_k から式(4)によって求める

$$I_k = J_k + (r_c - \sqrt{r_c^2 - M_k^2}) \frac{J_k}{\|J_k\|} \quad (4)$$

次に、角膜表面における光の屈折の影響を取り除く。I_kにおける瞳孔輪郭上の点 E_k 方向の単位ベクトルを f_k、法線ベクトルを n_k、カメラから I_k 方向の単位ベクトルを i_k、空気の屈折率を n_a、房水の屈折率を n_b とおくと、角膜表面における屈折は式(5)で表される。

$$f_k = \left(\frac{n_a}{n_b} \right) \left[i_k - \left[i_k \cdot n_k + \sqrt{\left(\frac{n_a}{n_b} \right)^2 - 1 + (i_k \cdot n_k)^2} \right] n_k \right] \quad (5)$$

I_k から E_k までの距離 m_k を式(6)、(7)により求めることができる。

$$m_k = (C - I_k \cdot f_k) - \sqrt{(C - I_k \cdot f_k)^2 - (\|C - I_k\|^2 - \|d\|^2)} \quad (6)$$

$$\|d\| = D = \sqrt{h^2 + R^2} \quad (7)$$

ここで d は C から E_k のベクトルであり、D はそのノルムである。また、h は角膜中心と瞳孔中心の距離、R は瞳孔の半径を表している。

m_k より式(8)を用いて角膜輪郭上の点 E_k を求めることができる。

$$E_k = I_k + m_k f_k \quad (8)$$

瞳孔中心 E は瞳孔輪郭点群 E_k(k=1,2,..) にフィッティングした円の中心として導出される。

(4) 注視点位置の導出

視線ベクトルは、角膜中心 C から瞳孔中心 E に向かうベクトル L_s として式(9)より求まる

$$L_s = E - C \quad (9)$$

最終的に注視点位置は、LCD モニタ平面とこの視線ベクトル L_s の交点として導出される。

(5) 双一次補間による注視点位置の補正

提案したアルゴリズムで求めた視線ベクトルは、眼球の大きさ等の個人差が考慮されていない。従ってそのままでは正確な注視点位置が計算できないため、個人別補正処理をさらに行った。この補正のため、キャリブレーション段階で非補正状態での注視点位置を測定し、各マーカー点と注視点位置との系統的な誤差のベクトルを求め、この逆方向ベクトルをマーカー点間で双一次補間する補正関数を導出する。求めた補正関数を注視点位置に足し合わせることで、補正注視点位置を求めることができる。

3. 実験条件と結果

3.1. 実験条件

図 6 の Eye-Tracking システムを使用して、視線推定実験を行った。被験者の眼球から LCD 画面までの距離は約 400mm、実行時のカメラ (ARGO LU275) の解像度は 640×480、使用した IR-LED の波長は 880nm である。

実験では LCD 画面上に格子状に規則的に配置された 9 点のマーカー点 (直径 8mm) を 3 秒ずつ順に点灯させ、被験者に注視させる。この時の 0.5 秒間の平均注視点位置を、ある時点の注視点位置とし、マーカー点と注視点位置の距離を誤差として記録した。

また、被験者は 22~25 歳の裸眼の成人男子 4 名で、被験者は全員右目 (裸眼) を使って注視させ、利き目の影響を排除するために、被験者の左目を覆った状態で実験を行なった。

3.2. 実験結果

図 7 にある被験者の補正前後の各点での推定視線位置の分布を表す。補正前は系統的な誤差のある点も多いが、補正によって大幅にこの系統誤差が減少していることが分かる。

また、図 8 に補正前後のマーカー点での 4 人の被験者の平均の誤差の比較を表す。補正前の平均誤差は 21mm のものが、

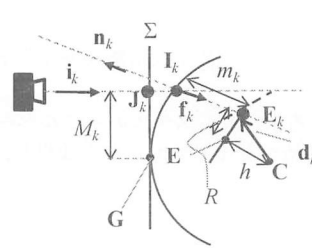


図 5 角膜-瞳孔近似モデル

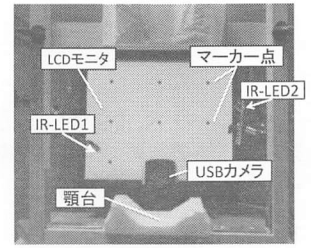


図 6 Eye-Tracking システムの外観

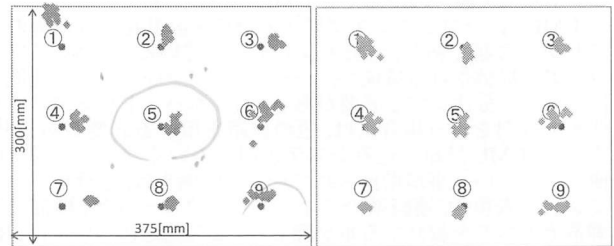


図 7 補正前 (左) と補正後 (右) の注視点位置の分布

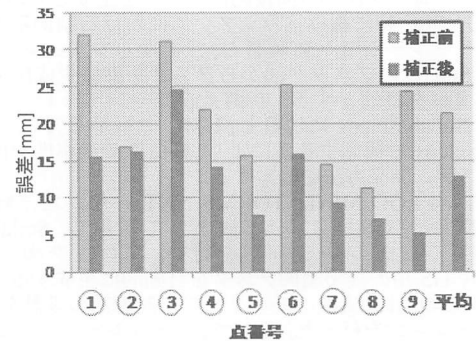


図 8 補正前後の各マーカー点の平均誤差

補正後は 13mm に減少した。

この結果から、画面中心部また下部のマーカー点の誤差は小さく、中心から離れた点、または上部のマーカー点ほど誤差が大きいことが分かる。この誤差の生じる原因としては、IR-LED の設置位置の影響や、楕円フィッティングの際の誤差が考えられる。

4. おわりに

本研究では UI 可動型デジタルプロトタイプ操作性評価のための Eye-Tracking システムの視線推定機能を開発した。画面中央部での平均誤差は 8mm 程度であり、デジタルプロトタイプの操作性評価に用いることが可能であると考えられる。今後は瞳孔輪郭像への楕円フィッティングのロバスト性の向上を行う。

参考文献

- [1] S.Kanai et al., "3D digital prototyping and usability enhancement of information appliances based on UsiXML, Int. J. Interact. Des. Manuf., 3(3), pp.201-222, (2009)
- [2] A. Villanueva et al., "A Novel Gaze Estimation System With One Calibration Point", CYBERNETICS 38(4) pp.1123-1138, (2008)
- [3] 大野健彦 武川直樹 古川厚, "2 点補正によるキャリブレーションを実現した視線測定システム", 情報処理学会論文誌 44(4) pp.1136-1149, (2003)