

円錐状の光を用いた低コストで汎用性の高い 三次元ポインティングデバイスの提案

和田 将, 佐藤 喬, 多田 好克

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

本研究では円錐状の光を発する光源の位置と姿勢を, 平面への投影二次曲線により求める方法を提案する. 本デバイスでは光源をポインティングデバイスと見立てることによって6自由度を持つ次元ポインティングデバイスを実現する. 投影像の取得には一般に普及している USB カメラを用い, 光源にはペンの形状をした物を用いる. 全体の構造が簡素であり低コストで製作できることから既存環境への応用が容易である. 今回の発表では, 本デバイスの実装法, 提案手法の有用性について議論する.

Proposal of a low cost and high versatility 6DOF spatial pointing device with cone-shaped light.

Susumu Wada, Takashi Satou and Yoshikatsu Tada.

Graduate School of Information Systems,
The University of Electro-Communications.

In this paper, we propose a way to lead the position and posture of the light by the projection-quadric curve. We suppose that a light source is a pointing device, our device put 6DOF spatial pointing device into practice. We use a standard USB Camera to get a projection image and use a light source that is similar to configuration of a pen. A low production cost and simple structures make versatile easy. In present announce, we argue about suggestion technique of device and utility.

1 はじめに

近年, コンピュータの性能向上により, 三次元コンピュータグラフィックスやロボットなどは身近なものになっている. 普及しているマウスやトラックボールでもロボットを操作したり三次元グラフィックスを創作編集することは可能である. しかしながら, 自由度が2しかない事で, 使用者に様々な制約が科せられる. これは操作性と効率の悪さにつながっている.

2 既存デバイスについて

前節で述べた問題を解決する為に多くの次元ポインティングデバイスが開発されている. たとえばファントム [1] がある. 複数の連結されたアームを操作しアーム接合部分の角度を測定しアーム先端の位置姿勢を測定する. またモータを装備しており抵抗や質感なども表現できる. ファーストラック [2] [3] はデバイス先端から発せられる磁場を本体側で受信し磁場の発信源位置を算出するデバイスである. ポラリス [4] は発光する LED の光を二つの受信機で取得し位置を算出するデバイスである. そ

の他ジョイスティックを応用した物 [5], グリップに取り付けられた糸の張力の変位によりグリップ位置を算出する SPIDER-G [6] 等がある。

既存デバイスは高精度でありこれまでも医療や研究の専門分野で使用されてきた。しかし、これらのデバイスが一般ユーザの間で使われ、普及することはこれまでに無かった。一般の計算機環境が向上しつつも次元ポインティングデバイスが普及しない原因としては次にのべる特徴を既存デバイスが持っているからと考えられる。

- 形状が用途専門に特化している
- 直感的な操作が難しい
- マウスやキーボードなどと比べて高価である
- 装置自体が場所を取る

そこで一般にも普及しうる為には次の特徴を持っていることが必要と考えた。

- 安く製作できる
- 構造が簡単でありコンパクトである
- パソコン等への応用ができる

本研究ではこれらに重点をおいた三次元ポインティングデバイスについて提案する。

3 提案手法

ここでは本稿で提案する 6 自由度を持つデバイスを実現する為に必要な幾何学的背景について述べる。

円錐を平面で切断する時、断面図は二次曲線(楕円, 円, 放物線)になる事が知られている。円錐状の光を発する光源を平面に向けて照射したとき、光源の投影面上の位置、投影面からの垂直距離、そして光源の傾きによって、投影二次曲線の位置、大きさ、扁平率などの特徴量に変化する。我々の方法はこの投影像の特徴量から光源の位置を逆算して求める。ユーザが光源を手を持ち操作することで三次元ポインティングデバイスとして応用する事ができる。

投影像に二次曲線ではなく 3 つの光の点を用いる手法でも光源の位置を求める事ができるがこの場合、点が一つ欠けた場合、光源の位置は算出でき

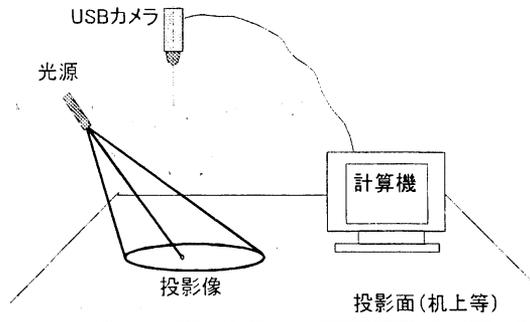


図 1: システム全体図

なくなる。それに対し二次曲線は連続した点列であり、一部が隠れても光源の位置を算出することができる。またノイズなどによる誤差にも強いので正確な投影二次曲線の方程式を算出する事ができる。さらに一度に複数の光源位置を求めるような場合、投影像が点の場合、どの 3 点がセットなのか区別する事は難しい。連続した曲線なら複数の投影像が重なった場合でも画像処理によって二次曲線を分離する事ができる。

4 装置全体像

本システムの全体図について説明する。

システム全体図は図 1 の様になる。システムは以下の装置から構成される。

- レーザモジュールを用いた光源
- 30 万画素程度の USB カメラ
- 一般的な計算機

ユーザは光源をポインティングデバイスとして操作する。光源をオンにすると投影面には投影像が映し出され、光源の移動に連動して投影像も変形する。

USB カメラはその光源から発せられた光投影面に映し出す投影像を取得するのに用いる。簡単な為カメラは投影面に対して垂直方向を向いているとする。

計算機は USB カメラから画像データを受け取り、画像処理、投影像の特徴量の計算、光源の位置姿勢の算出を行う。

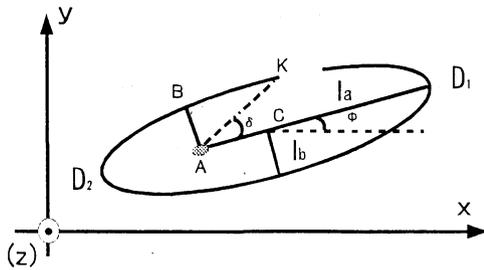


図 2: 投影像

USBカメラは現在安く手に入れることが出来、広く普及している。本システムを構築するために特別必要になるものは光源とソフトウェアとなる。

光源の電源は電池であり小型軽量で場所を取らない。

5 光源の姿勢位置の算出

ここでは投影像から光源の位置を算出する過程について述べる。

5.1 投影像について

図 2 において投影面上を x-y 平面とし平面の法線方向に z 軸をとる。光源は x-y 平面に図 2 のような図形（通常は楕円）を投影する。

投影像の楕円には「欠け」がある。図 2 において欠けは点 K であり欠けは楕円の姿勢の一つ、 δ を求めるのに使用する。

そして長軸上に「光点」がある光点は光軸上を通過する光が作る像であり、図 2 の中の点 A に位置する。長軸方向 $|AD_1|$ と線分 $|AK|$ の間の角度を δ とする。

δ と楕円の傾き ϕ はそのまま光源の姿勢となる。

5.2 楕円方程式の求め方

いま図 2 のような投影像が得られたとする。カメラより取得される投影像は、楕円状の点列である。これら点列を最小二乗法を用いて楕円方程式にフィットさせ楕円方程式を求める。

カメラより取得される点列を

$$\{P_i, i = 1, \dots, N\}$$

とする。求めたい楕円方程式を

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (1)$$

とする。

ある点 P_j と楕円との「距離」が関数。

$G(P_j, a, b, c, d, e, f)$ で表されるとき、次の式で表されるフィット誤差 E を最小にする問題に帰着する。

$$E = \sum_{i=1}^N G(P_i, a, b, c, d, e, f) \quad (2)$$

実装では簡易化の為、距離 G は次のように定義する。

$$G(P_j, a, b, c, d, e, f) =$$

$$(aI_{xj}^2 + bI_{xj}I_{yj} + cI_{yj}^2 + dI_{xj} + eI_{yj} + f)^2 \quad (3)$$

((I_{xj}, I_{yj}) は j 番目の点の座標である。)

このときフィット誤差は、

$$E = \sum_{i=1}^N (aI_{xi}^2 + bI_{xi}I_{yi} + cI_{yi}^2 + dI_{xi} + eI_{yi} + f)^2 \quad (4)$$

有意義な解をえる為、

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2 = 1 \quad (5)$$

の条件を与える。

式 (3) は次のように書き換えられる。

$$E = V^T S V + \lambda V^T V - \lambda \quad (6)$$

$$\text{今 } V = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T$$

$$S = \sum_{i=1}^N X_i X_i^T$$

$$X_i = [x_i^2 \ x_i y_i \ y_i^2 \ x_i \ y_i \ 1]^T$$

であり、 G を最小にする為には $SV + \lambda V = 0$ を解けばよい。これは S の固有値 λ と固有ベクトル V の問題に帰着する。ベキ乗法、QR 法等を用いて固有値 λ を求める。その一番大きい値を元の式に戻し行列計算すると六元一次方程式が得られる。この方程式を解くと楕円方程式の係数が求まる。そして楕円方程式を標準型に変形して楕円の中心座標 $C(x_0, y_0)$ と楕円の傾き ϕ 、そして長軸 l_a 、短軸 l_b が求まる。

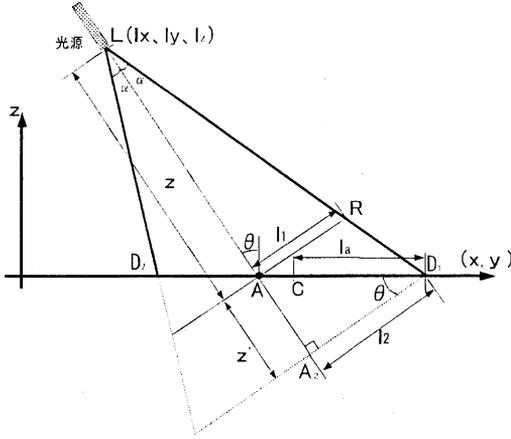


図 3: 横から見たとき

5.3 光源の姿勢

先に求めた楕円の特徴量と図 2, 図 3 より光源の姿勢求める。

光源の姿勢を (θ, ϕ, δ) とする。 δ は図 2 の $\angle KAC$ であり、点 K, A, C から求める。 ϕ は図 2 と前節より、楕円方程式より求められる。次に θ を求める。

図 3 は全体像を横から見たときの図である。光源の位置を $L(l_x, l_y, z_z)$ 、 L から A までの距離を z とする。図 2 において A から短軸と平行に引いた線が楕円と交差する点を $B(b_x, b_y)$ とする。図 3 に戻り CD_1 は楕円の長軸であり $|CD_1| = 2l_a$ である。

$\triangle LAR$ と $\triangle LA_2D_1$ は相似形なので、

$$\frac{l_1}{z} = \frac{l_2}{z+z'} \quad (7)$$

がいえる。 $\triangle AD_1A_2R$ より、

$$\sin \theta = \frac{z'}{l_a + |AC|} \quad (8)$$

$$\cos \theta = \frac{l_2}{l_a + |AC|} \quad (9)$$

(7)(8)(9) 式より、

$$\frac{l_1}{z} = \frac{(l_a + |AC|) \cos \theta}{z + (l_a + |AC|) \sin \theta} \quad (10)$$

整理して、

$$\frac{l_a + |AC|}{z} \sin \theta - \frac{l_a + |AC|}{l_1} \cos \theta = -1 \quad (11)$$

三角形の合成をもちいて、

$$T \sin(\theta + \gamma) = -1 \quad (12)$$

$$T = (l_a + |AC|) \sqrt{\frac{1}{z^2} + \frac{1}{l_1^2}} \quad (13)$$

$$\sin \gamma = \frac{l_a + |AC|}{l_1 \cdot T} \quad (14)$$

$$\theta - \gamma = \sin^{-1}\left(-\frac{1}{T}\right) \quad (15)$$

よって、

$$\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{1}{T}\right) - \sin^{-1}\frac{l_a + |AC|}{l_1 \cdot T} \quad (16)$$

と θ が求まった。

5.4 光源の位置

次に光源の位置を求める。図 2 において点 A から短軸と水平な方向へ線を引き楕円と交差する点までの距離を $|AB|$ とすると、 $|AB|$ は、

$$|AB| = l_b \sqrt{1 - \frac{|CA|^2}{a^2}} \quad (17)$$

である。また z は、

$$z = \frac{|AB|}{\tan \alpha} \quad (18)$$

と求まる。よって光源の位置 $L(l_x, l_y, l_z)$ は、

$$l_x = a_x + z \sin \theta * \cos \phi \quad (19)$$

$$l_y = a_y + z \sin \theta * \sin \phi \quad (20)$$

$$l_z = z \cos \theta \quad (21)$$

となり、光源の姿勢と位置を求める事ができた。

6 光源について

光源は円錐状の光を出す必要がある。これは本来ホログラム像で置き換えて精度を向上することが可能である。そのほかに講義などで使われるレーザーポインタは光源を震動させて光の点を円運動させ

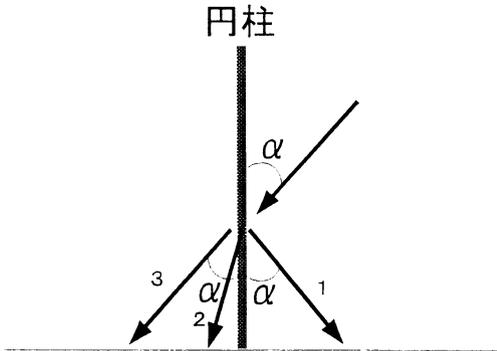


図 4: 円柱にレーザーを照射したときの様子

る事で丸い投影像を得ているが、震動で正確な円が得られない。また値段が高価で本研究の意図に反するので本稿では使用せず、今回は次のような手法で光源を製作した。

光源には赤と緑のレーザーを計2つ使用する。赤いレーザーは図2の点Aの光点を作るのに使用する。緑のレーザーは欠けのある楕円を作るのに用いる。

緑のレーザーの幅は金属円中の直径より少し大きくなるようにしてある。図4のように緑のレーザーを入射角 α で円柱にむけ照射する。

軌道1のように金属柱中心に向かう光はそのままx軸成分が正負反転するだけの反射となる。軌道3の場合は金属表面で反射されない光である。

軌道2は1と3に当てはまらない時である。金属表面は円形なので光は曲面にしたがって軌道が広げられる。このように反射され投影像は二次曲線となる。

このことを考慮し光源を作製する。光源の作製に使用した材料は以下の様になる。

- 赤色レーザーモジュール
- 緑色レーザーモジュール
- 単4電池2個
- 電池フォルダ2個
- 金属柱(釘)一本

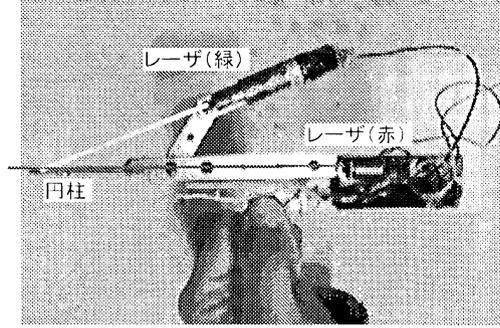


図 5: 製作した光源

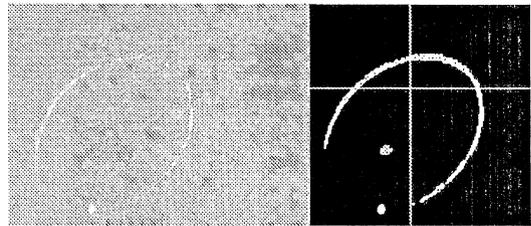


図 6: 投影像と2値化画像

- これらを固定するパーツ

そして図5が作製した光源である。作製した光源が作る投影像は図6の左のようになる。図6右はその画像を2値化したものである。このように楕円の投影像を作る光源を作製する事が出来た。

7 プログラムの実装

これまでに述べた理論を元にプログラムを作製し、光源の位置が投影像より理論どりに求める事が出来るか確かめてみた。プログラムはC++で記述し直感的にも光源の位置が正しく再現できているかどうか解るようにする為OpenGLを用いて光源の位置姿勢を三次元コンピュータグラフィックスで標示できるようにした。実際に投影像をカメラで取得する様子が図7である。そして図8はその状態を3DCG化したものであり、本提案が実際に動作するのを確認する事ができた。

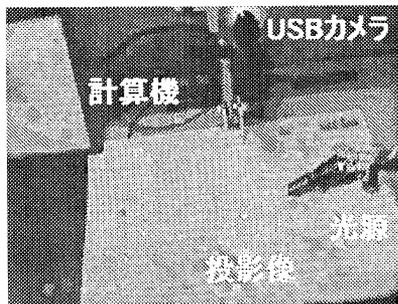


図 7: 光源の作る投影像をカメラで取得する様子

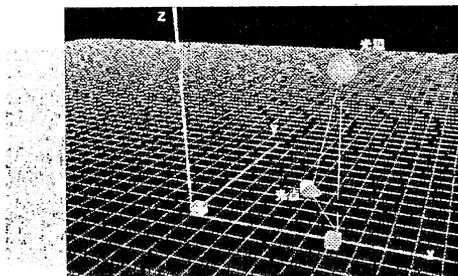


図 8: 光源の位置姿勢を 3DCG で表した様子

8 有効使用範囲と分解能, 誤差について

ここではポインティングデバイスの使用範囲について述べる。光源の高さを固定し α の値を大きくすると、投影像は大きくなる。図 3 において、 $z = 5, 10, 15, 20, 25, 30(\text{cm})$ とし、光源を A を基準として回転させた時の θ の有効範囲について調べる。ここでの有効範囲とは、投影像を映し出すスペースを考えて楕円を傾けた時、長軸の長さが $20(\text{cm})$ を越えるまでの θ の範囲とする。図 9 より、 α を大きくすると θ の有効範囲は狭くなる事が解った。もし θ の範囲を大きく取れるようにしたい場合は α の値を大きくする必要がある。また z の値が大きい時も θ の有効範囲が狭くなる。

次に図 3 において θ を変化させた時、楕円のパラメータの長軸 l_a がどの様に変化するか見てみる。

$\theta = 15, 20, 25, 30, 35, 40(\text{deg})$ と変えてみて試行を行った。

結果は図 10 のようになる。 α 値が大きいほど θ の変化に対する投影像の形状の変化が大きい事が解る。短軸 l_b , $|CA|$ も同様な変化をする事が解った。

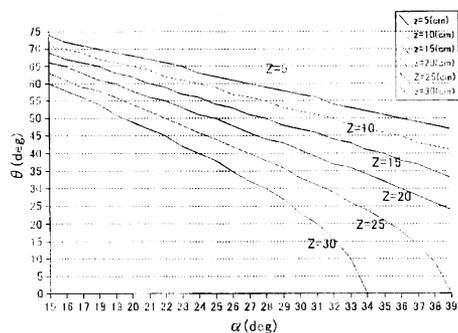


図 9: θ の有効範囲

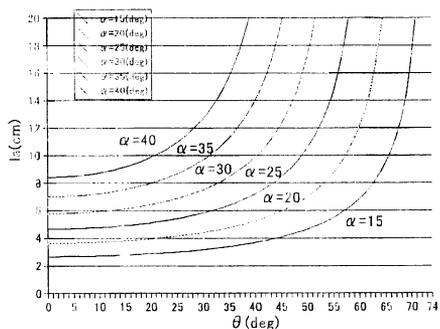


図 10: a と θ の関係

$\theta = 0$ 付近、つまり投影像が円、もしくは円に近い場合は分解能が小さく図形の変化がとても小さい。つまり誤差の影響を受けやすい事がわかった。

図 3, 図 4 において A 点にある光点 A の位置を理論値より $d(\text{cm})$ 楕円中心方向とは逆方向へずらした時の θ の誤差 $\Delta\theta$ を求めてみる。今、 $\alpha = 20(\text{deg})$ とする。 $d = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5(\text{cm})$ の時の θ の変化に対する誤差 $\Delta\theta$ は図 11 の様になる。図 11 より誤差 d の値が大きいほどそして θ が 0 つまり投影像が円に近いほど、誤差が大きくなる。以上の試行により投影像が円のとき不安定であり、楕円の時は光源の位置は安定している事が解った。 α の値は小さいと投影像の形の変化が小さく大きいと投影される図形が大きくなるのでこの場合も使用範囲が狭くなってしまふ。これらを考慮して α の値を決定する必要がある。

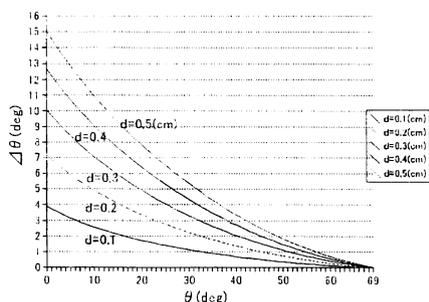


図 11: 誤差が θ に与える影響

9 問題点

試行をする上で解った問題点は次のようになる。

- 取得する投影像が自然光の影響を受けやすい
- θ の実行範囲に制限がある
- 現在の光源では、光源が投影面から遠ざかると投影像が薄くなる

仕様環境が変化すると投影像が薄くなったりカメラを自由に設定できない場合がでてくる。この事を考慮し、自動的にカメラキャリブレーションをする機構が必要となる。今回提案した光源では使用できる範囲が卓上など投影面と光源が近い場合に限られる。

10 まとめ

本稿では提案する三次元ポインティングデバイスの実現方法について述べた。そして具体的に光源とプログラムを製作し、動作するところを確認した。

また投影像が円に近いとき等の誤差が生じやすい領域が存在する事がわかった。またカメラの性能が低いほど1ピクセル辺りの誤差の影響が大きくなるので高解像度なカメラを用いれば精度はあがると考えられる。

今回は一部のパラメータの誤差について触れた。入力装置は精度によって用途が決めるので、今後は本デバイスがどれくらいの精度なのかを調べる為、様々な試行を行っていく。

参考文献

- [1] Thomas H. Massie, J. K. Salisbury: The PHANTOM Haptic Interface, A Device for Probing Virtual Objects. Proceedings of the ASME Winter Annual Meeting, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, (1994).
- [2] POLHEMUS Inc. 3SPACE FASTRAK USER 'S MANUAL Revision F, November (1993).
- [3] 大崎 章弘, 谷口 裕之, 三輪 敬之: 実空間での三次元共同描画における身体動作表現に関する研究, 電子情報通信学会技術研究報告, HIS2005-11, pp. 55-58 (2005)
- [4] Northern Digital Inc.
<http://www.ndigital.com>
- [5] 3dconnexion corporation.
<http://www.3dconnexion.com>
- [6] 村山 淳, 馬場 次郎, 寺西 望, 赤羽 歩, 長谷川 晶一, 佐藤 誠: 6 自由度空間入力装置 SPIDAR-G の球形グリップの半径が操作性に及ぼす影響, 電子情報通信学会技術研究報告, MVE2005-7, pp.41-46 (2005)
- [7] 呉 海元, 和田 俊和, 陳 謙: ロボットのボディを利用したカメラキャリブレーション, 情報処理学会論文誌, Vol44, No.SIG 17, pp.61-69 (2003)