



平成17年度 修士論文

円錐状の光を発する光源を用いた
三次元ポインティングデバイスの
製作と評価

電気通信大学 大学院情報システム学研究科

情報システム設計学専攻

0350048 和田 将

指導教員 田中 久陽 助教授
多田 好克 教授
岡本 敏男 教授

提出日 平成18年1月31日

目次

第 1 章	背景と目的	6
1.1	背景	6
1.2	目的	7
第 2 章	関連研究	8
2.1	既存デバイス	8
2.2	問題点	11
第 3 章	システム概要	12
3.1	一般ユーザ向けの三次元ポインティングデバイス	12
3.2	システム全体像	13
3.3	本システムの基本アイデア	15
第 4 章	システム設計	17
4.1	設計方針	17
4.2	光源と投影像	18
4.2.1	光源	18
4.2.2	投影像	19
4.3	投影像の取得	21
4.4	光源の位置姿勢	21
4.4.1	画像処理	23
4.4.2	姿勢	23
4.4.3	光源の位置	24
4.5	二次曲線を扱うメリット	24
4.6	その他のメリット	26

4.7	応用	26
4.7.1	複数人で使用する	26
4.7.2	教室で使用する	27
第 5 章	システムの実装	28
5.1	実装の概要	28
5.2	光源と投影像	28
5.2.1	光源	28
5.2.2	光源の作る投影像	31
5.3	投影像の取得	32
5.3.1	カメラの位置姿勢と座標軸の定義	32
5.4	光源の位置姿勢	36
5.4.1	取得画像の二値化	36
5.4.2	光点の位置	37
5.4.3	楕円方程式	37
5.4.4	光源の姿勢	40
5.4.5	光源の位置	43
第 6 章	システム評価	44
6.1	理論的な見積り	44
6.1.1	使用範囲	44
6.1.2	分解能について	46
6.1.3	誤差について	48
6.2	実際の光源を用いた評価	49
6.2.1	評価方法	49
6.2.2	実験 1:三自由度を持つデバイスの評価	50
6.2.3	実験 2:五自由度を持つデバイスの評価	54

6.2.4 実験 3:六自由度を持つデバイスの評価	57
第 7 章 問題点	60
7.1 光源に関する問題点	60
7.2 操作上での問題点	60
第 8 章 まとめ	61
付録 A	64
付録 B	65

目 次

2.1	ファントム (http://www.sensable.com/ より転載)	9
2.2	ファーストラック (http://www.polhemus.com/index.htm より転載)	10
3.1	システム全体像	13
3.2	ユーザが光源を操作する様子	14
3.3	円錐を平面で切る様子	15
3.4	円錐を平面で切る時の様子	16
4.1	光源を回転させる	18
4.2	光源の位置は二ヶ所考えられる	19
4.3	欠けのある楕円の投影像	20
4.4	光点をずらした投影像	20
4.5	カメラの位置が平面の法線に平行な状態	22
4.6	カメラを投影面の裏側に置く様子	22
4.7	姿勢の定義	24
4.8	欠けた楕円	25
4.9	複数の光源を用いた時の投影像	25
4.10	複数人で使用する様子	27
4.11	教室で使用する様子	27
5.1	実際のシステム全体像	29
5.2	光源が作る投影像	30
5.3	作製した光源	30
5.4	投影像の特徴量	32
5.5	USB カメラ	33

5.6	カメラの位置と姿勢	34
5.7	二値化した画像	36
5.8	円錐状の光が平面に照射される様子	40
6.1	光源を傾ける様子	45
6.2	α と θ の関係を表したグラフ	46
6.3	分解能について	47
6.4	故意に誤差 d を与える	48
6.5	誤差について	49
6.6	実験 1 のプログラム実行画面	52
6.7	三自由度の実験結果	53
6.8	実験 2 のプログラム実行画面	55
6.9	五自由度の実験結果	56
6.10	実験 3 のプログラム実行画面	58
6.11	六自由度の実験結果	59
1	円柱にレーザを照射	65
2	円柱を縦から見た図	66
3	円柱に照射	67
4	横から見たとき	68

第 1 章

背景と目的

1.1 背景

近年、計算機の性能向上に伴い、三次元コンピュータグラフィックスやロボットはより身近な物になった。現状では普及している二自由度のマウスやトラックボールを用いて三次元コンピュータグラフィックスの創作、編集やロボットの操作などを行っている。これらのデバイスは二自由度しかなく、相対的な動きしか表現出来ないため、三次元空間上のオブジェクトを扱う場合、使用者に対して操作上様々な制約を課す。このことは、作業効率と操作性の悪さにつながる。

六自由度を持つデバイスはこれら三次元空間上のオブジェクトやロボットなどの対象物を的確かつ直感的に操作、扱う事を可能とするデバイスである。一般的な計算機環境においても六自由度を持つポインティングデバイスがあれば操作性と作業効率の向上が期待できる。

これまでも六自由度を持つポインティングデバイスは存在し、それらを用いた研究開発は行われてきた。それらのデバイスは研究や医療の分野で使用する事を目的としている。よって高精度な位置計測が出来、形状も専門に特化した形状をしていた。そして値段は高価であり装置自体が大きく、ある程度の場所をとる。

既存デバイスのもつ値段、大きさ等の特徴は、住居空間が限られ、値段の安い物を求める一般ユーザの要求を充たすものではなかった。また一般ユーザは専門の分野で必要な高精度は求めていないと考えられる。ある程度の精度を持ち、低コストで

場所を取らない三次元ポインティングデバイスはこれまでになかった。

1.2 目的

そこで本研究では、一般ユーザに受け入れられる特徴を持った三次元ポインティングデバイスを製作しシステムを構築する。本研究は円錐状の光を発する光源の位置と投影像の対応関係に注目し、三次元ポインティングデバイスを構築する。そして製作したデバイス、システムの使い易さ、三次元以上の位置姿勢の同定のし易さについて実験を行う。

第 2 章

関連研究

2.1 既存デバイス

数多くの三次元ポインティングデバイスがこれまでに研究、開発されてきた。たとえば図 2.1 のファントム [1] がある。ファントムは本体から三本のアームを連結した棒状のパーツを持ち、その先端の位置と姿勢を算出するデバイスである。アームの接点部分に角度センサが取り付けられており、その変位とアーム長より位置姿勢を同定するものである。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ので仮想的に物が当たっているような感覚をユーザはアームから感じ取る事が出来る。この装置は、アームが棒状なので鉛筆を使う感覚で操作でき、三次元コンピュータグラフィックスの製作やロボット制御の分野で使用されて来た。非常に精度がいいが機械的構造をもつので使用範囲は限定され、また装置自体場所をとる。そしてとても高価である。

図 2.2 のファーストラック [2] [3] [6] 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の位置を算出するデバイスである。このデバイスもペン状の部位を操作し位置と姿勢を同定するが、ファントムとは違い、発信源と本体は発信機用のコードでつながれているのでファントムと比べると操作部分が軽く操作性は高い。このデバイスは受信機が大きいので置き場所を必要とし、また持ち運びが面倒である。

ポラリス [4] は発光する LED の光を受信機に備えられた二つのセンサーで取得



図 2.1: ファントム (<http://www.sensable.com/>より転載)

し LED の位置を算出するデバイスである。精度が高く、医療の分野等で使用されている。このデバイスは今まで述べた中でも最も大きいデバイスである。

市販されているもので一番値段が安いものがスペースマウスである [5]。これは複数のボタンやジョグダイヤルを操作することで三次元オブジェクトを操作するものである。これはその形状より使用するのに慣れを必要とする。また値段は数万するのでまだ高価であるといえる。また相対位置のみの入力となる。

SPIDER-G [7] は 複数の糸がつけられた球状のグリップを操作しその糸の張力の変位をモータなどで読み取り相対的な位置、姿勢を算出する。このデバイスは構造が複雑であり、直感的な操作が難しいといえる。

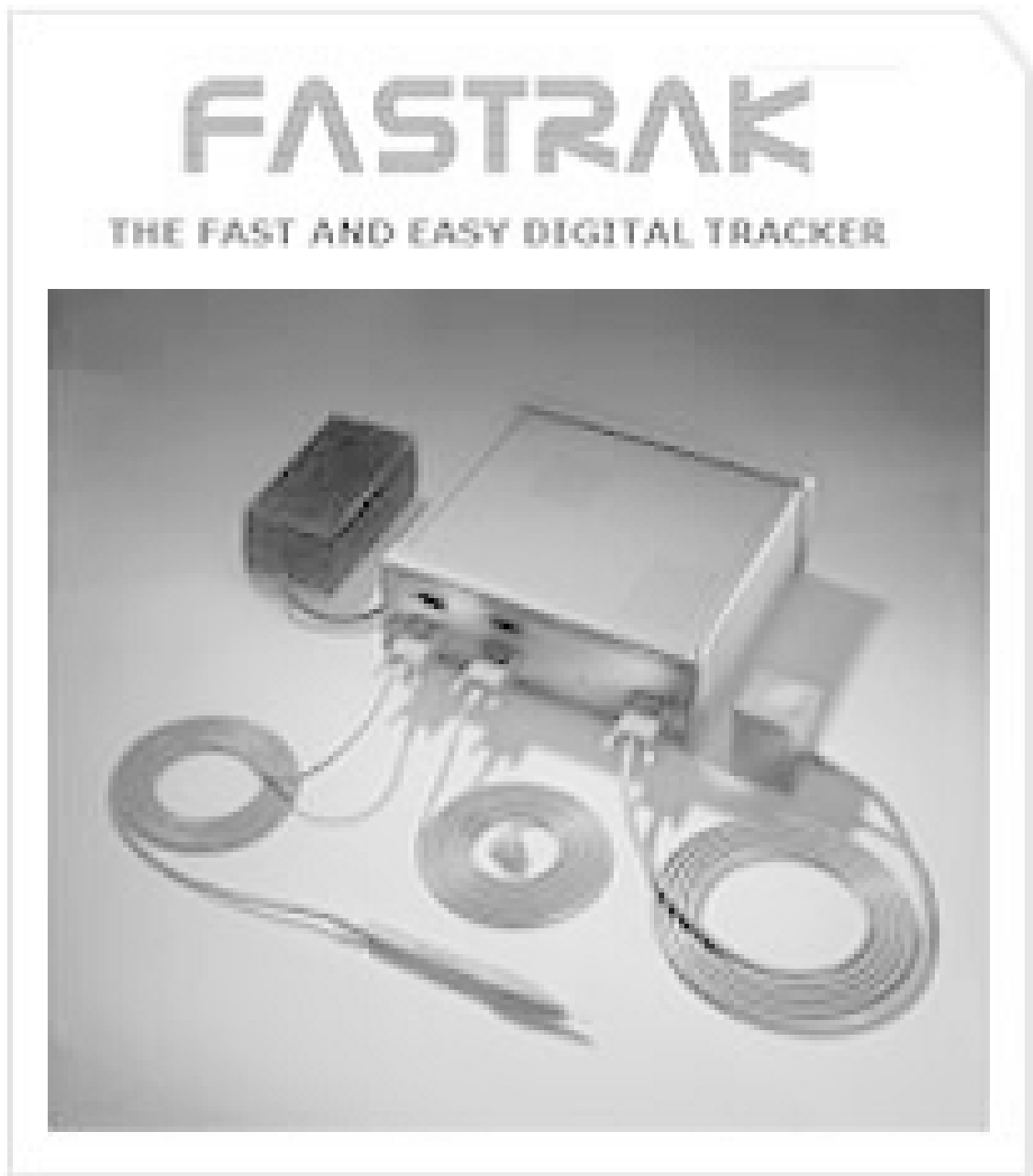


図 2.2: ファーストラック (<http://www.polhemus.com/index.htm> より転載)

2.2 問題点

先に述べたように既存のデバイスは数多く存在した。これらはみな高精度であり主に医療や研究の専門分野で使用されてきた。しかし、これらの三次元ポインティングデバイスが一般ユーザの間で使われ普及することは無かった。

三次元ポインティングデバイスが普及しない問題点は、以下の事柄が挙げられる。

- 値段が高価である
- 装置自体が大きく場所を取り、持ち運びが大変である
- 形状が用途専門に特化しているので直感的な操作が難しい

一般に普及するにはこれらの原因を解決する必要がある。つまり、以下のような特徴をもつ三次元ポインティングデバイスが望まれている。

- 安価である
- 装置に場所をと取られない
- 操作性が良い

第 3 章

システム概要

ここでは本研究の概要, コンセプト, 円錐とその断面の幾何学的特徴, について説明する.

3.1 一般ユーザ向けの三次元ポインティングデバイス

本研究は一般ユーザ向け三次元ポインティングデバイスの製作を目標としている. ここでは一般ユーザ向け三次元ポインティングデバイスとは何か説明する.

一般ユーザはものを導入したり購入する時, コンパクトで収納性が高いことに注目する. その傾向はノートパソコンやオーディオなど特に情報関連機器によく見られる傾向であるが, ポインティングデバイスについても同じことが言える. このことより, デバイスの評価の指標として, 大きさは一つの重要な指標となる. 現在はノートパソコンを持ち歩く事は多々あり, デバイスが小さいとそれらをノートパソコンと一緒に持ち出すことが出来, 出先でもシステムを構築, 使用することが出来る.

もう一つの一般ユーザが重点をおく指標としては安価に入手可能かという点がある. コンピュータ環境においてメインはコンピュータであり, それに付随するマウスなどの入力装置は買い替えサイクルがあることも含め, より安価な物が求められる. 安価な物は手軽さ, そして導入のしやすさにつながるので, 値段も重要な指標といえる.

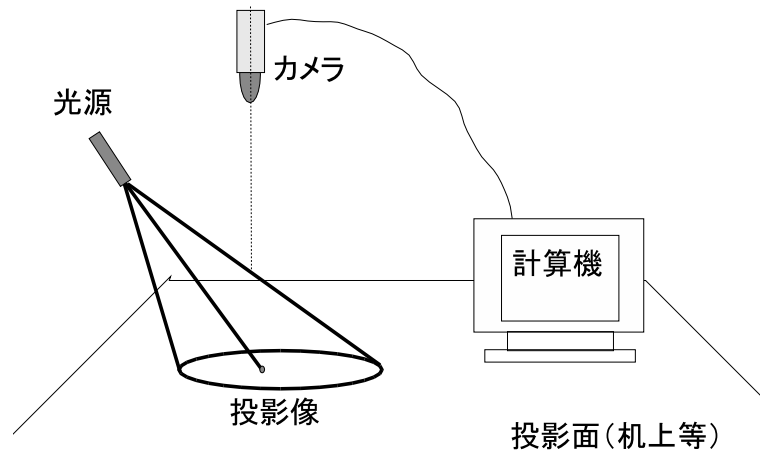


図 3.1: システム全体像

もう一つの指標に、扱いやすさが上げられる。デバイスの形状が特殊であったり、操作が難しい場合、的確に対象物を扱う事が難しくなる。形状や操作スタイルが身近にある物に近いほどユーザにとって親しみ易く、受け入れられ易いといえる。たとえばペンの様な身近な形状であり、操作の仕方も同様であれば、違和感なく使用することが出来る。

以上より、一般ユーザ向けの定義は以下の三つの特徴を持つと定義する。

- 安価
- 小さい(構造が簡単)
- 操作性がよい

3.2 システム全体像

ここでは本研究で提案する三次元ポインティングデバイスを構築する為のシステム全体像について説明する。図 3.1 はシステムの全体像である。

本システムは、主に次の3つの部分から構成される。

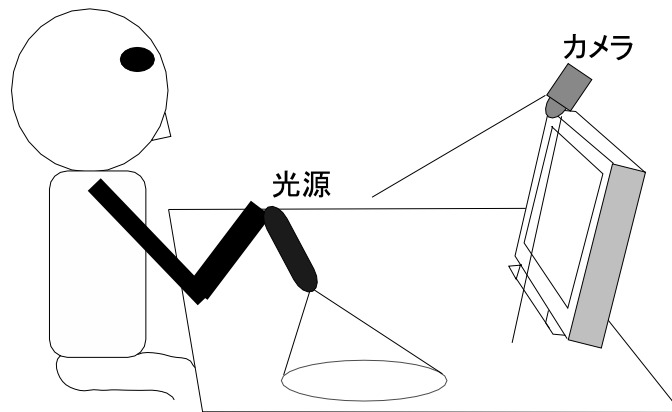


図 3.2: ユーザが光源を操作する様子

- 光源
- カメラ
- 計算機

光源は投影面に向けて円錐状の光を発している。円錐状の光は投影面に円、若しくは楕円の投影像を映し出す。ユーザは光源を手を持ち操作する。投影像の位置と形は光源の動きと同調して変化する。その投影像をカメラ等の受像素子を用いて画像データとして取得する。画像データは計算機に送られる。計算機は受け取った画像データより、光源の位置を算出する。ユーザはこの光源をポインティングデバイスと見立て操作する。このようにして三次元ポインティングデバイスを実現する。

図 3.2 は本デバイスを使用している時の概観図である。この様にユーザはペンを持つ要領で光源を手を持ち操作する。

その他にも複数人が一度にデバイスを使用したり、教室などの広い空間で使用するなどの応用も考えられる。本デバイスの応用事例については 4.7 節で触れる。

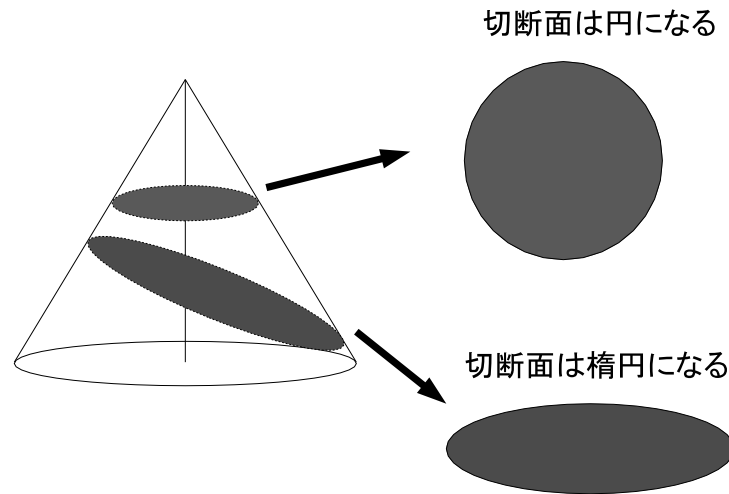


図 3.3: 円錐を平面で切る様子

3.3 本システムの基本アイデア

本研究では円錐を平面で切ったときにできる断面の図形とその円錐の頂点の幾何学的関係に注目している。ここでは円錐とその断面について説明する。

図 3.3 において、円錐を平面で切断する。円錐を中心線に垂直に切る時、断面図は円に、斜めに切ると楕円になる事が一般に知られている。

次に円錐状の光を発する光源があるとする。図 3.4 の様に光源を平面に照射するとき、投影像は円、若しくは楕円になる。光源の位置姿勢が変化すると、それに合わせて投影像の特徴量は変化する。この投影像の特徴量と光源の位置姿勢 (5 自由度) は一対一の関係にある。つまり投影像の位置と特徴量がわかれば光源の位置と姿勢を算出する事が出来る。

以上が基本的なアイデアであり、光源の回転を表す六自由度目の取得に関しては、楕円に欠け等の模様を与えるなどのアイデアがあるが、詳細は 4.2 節で改めて議論する。

本研究ではこの円錐状の光を発する光源の位置と投影像の関係を利用し三次元

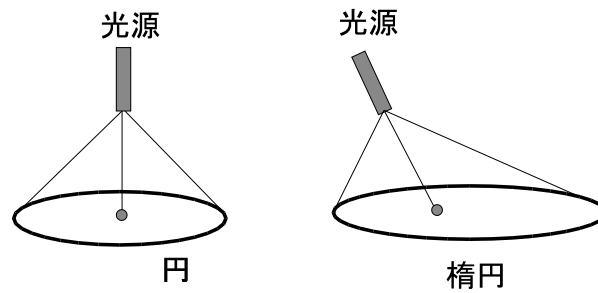


図 3.4: 円錐を平面で切る時の様子

ポインティングデバイスを実現している。

本研究で提案する光源は手のひらサイズで軽量に製作出来ることから持ち運びが簡単であり、使用しないときは収納に便利である物を製作する。またシステムの構造がシンプルなので安価に製作構築が出来る。これらの点は既存デバイスより優れているといえる。

第 4 章

システム設計

4.1 設計方針

ここではどのような特徴をもったデバイスを製作するか説明する。

前節で既存デバイスの問題点と、一般ユーザに受け入れられるために必要な要素について説明した。一般ユーザ向けに必要な要素とは次のように要約される。

- 安価
- 小さい(構造が簡単)
- 操作性がよい

本研究ではこのような三つの特徴をもつ一般ユーザ向けの三次元ポインティングデバイスの製作を目的とする。

本研究で提案する三次元ポインティングデバイスの設計は次の三つのブロックで分けられる。

- 光源と投影像
- 投影像の取得
- 光源の位置, 姿勢

この順にシステム設計について説明する。

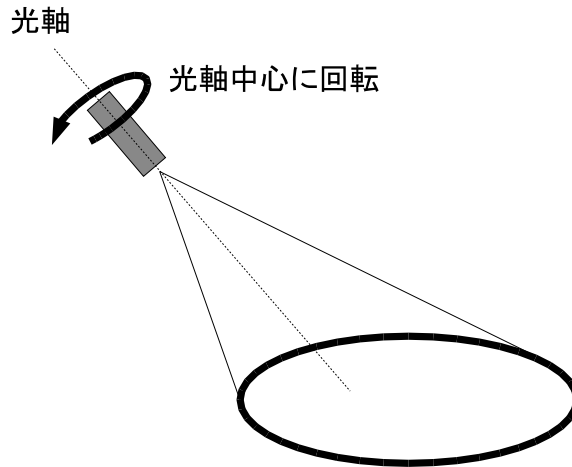


図 4.1: 光源を回転させる

4.2 光源と投影像

図 3.1 の全体像において、円錐状の光を発する光源とその投影像の部分について説明する。

4.2.1 光源

ここでは本研究で使用する光源について説明する。

光源は円錐状の光とその円錐の内側を通過するような光を発する。円錐状の光の投影像は円、若しくは楕円である。円錐の内側を通過する光は、楕円若しくは円の内側に、投影像として光点を作る。図 4.1 のように光源が向いている方向軸中心に回転させる時、投影像の楕円の形状は変化しない。光源の回転は、姿勢を表すパラメータの一つである。よってこのままでは、光源の回転、つまり光源の姿勢パラメータの一つを求める事が出来ず自由度は 5 である。また、図 4.2 のように、光源の位置は二ヶ所考えられ、そのどちらに光源があるのかわからない。

この問題解決するために円錐の内側にある光を利用する。

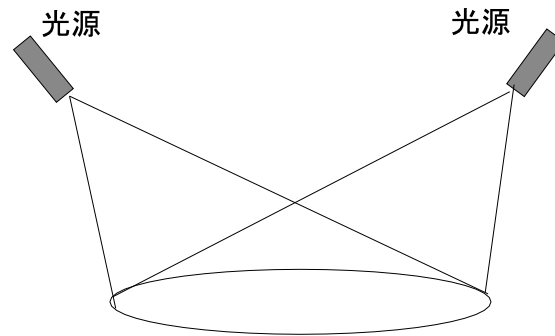


図 4.2: 光源の位置は二ヶ所考えられる

4.2.2 投影像

ここでは光源が作る投影像について説明する。

前節で触れた問題点を回避するためには二つの方法がある。

一つは図 4.3 のように楕円に欠けを作り，光軸と平面が交差する点 A に光点を作るように光源を改良する．光源を回転させると，欠けの位置も同時に回転移動する．よって欠けの位置より光源の回転を知る事が出来る．また光点の位置により，図 4.2 のように楕円だけでは二ヶ所考えられた光源の位置も一箇所に同定する事が出来る．

二つ目の方法は図 4.4 のように欠けの無い楕円と，光軸と平面が交差する点 A より少しずらした点 H に光点を設ける方法である．この場合 光源を回転させると，同時に光点も点 A を中心に回転する．この回転より光源の回転を読み取る．そして光点の位置より図 4.2 のように，楕円だけでは二ヶ所考えられた光源の位置も一箇所に同定する事が出来る．

本研究では後者の方法を採用する．

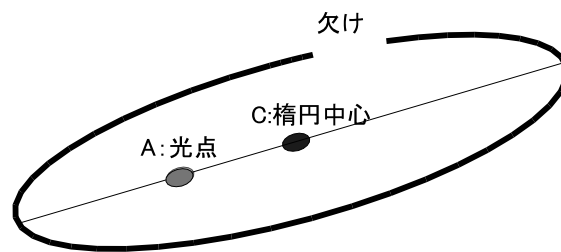


図 4.3: 欠けのある楕円の投影像

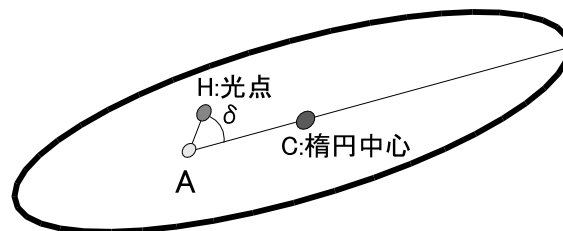


図 4.4: 光点をずらした投影像

4.3 投影像の取得

ここでは、図 3.1 における、投影像の取得について説明する。光源の位置を算出するため、何らかの受像装置で投影像を計算機に取り込まなければならない。

受像装置として一般的なものとしてはカメラがある。カメラで取得される画像を絶えず計算機に送る方法である。市販されているカメラの画素数は、高度な物は数百万画素、安い物は三万画素と幅広く存在する。画素数が高いと緻密な投影像を得る事が出来るが情報量が多くなるのでその後の処理量が重くなる。逆に画素数が低いと取得画像は粗くなるが、情報量が小さくなるので画像処理などのタスクが少なくなる。画素数が高いと値段も数万円と高くなるが、店で売られている三十万画素程度のカメラは、3000 円でいどで販売されている。また、カメラは汎用性が高く防犯や、チャットなど様々な用途で使用出来、すでに実装済みの場合、本システムを構築するのに、そのとき使っているカメラを使用すれば良い。

カメラの位置は色々考えられる。シンプルな方法としては、図 4.5 のように平面法線方向に平行に平面に向け設置する方法がある。投影像を平面に投影することから、投影面が一面しかない場合、ある姿勢パラメータの値が制限されてしまう。この範囲を広くするための工夫として、投影面を三面にする事も考えられる。

いずれの場合も、ユーザの手がカメラに写る恐れがあるので投影面をうまく手がかぶらないよう取得できるようにカメラの位置姿勢を設定する必要がある。

また、図 4.6 のように投影面をトレーシングペーパーなどの光を通過させる半透明な物にし、カメラを投影面の裏側に設置する。そして平面を透過する光をカメラで読み取る手法も考えられる。この場合、ユーザの手がカメラに写ることは無い。

4.4 光源の位置姿勢

ここでは全体図 3.1 の計算機部分において、取得した投影像より光源の位置姿勢を求める過程について説明する。

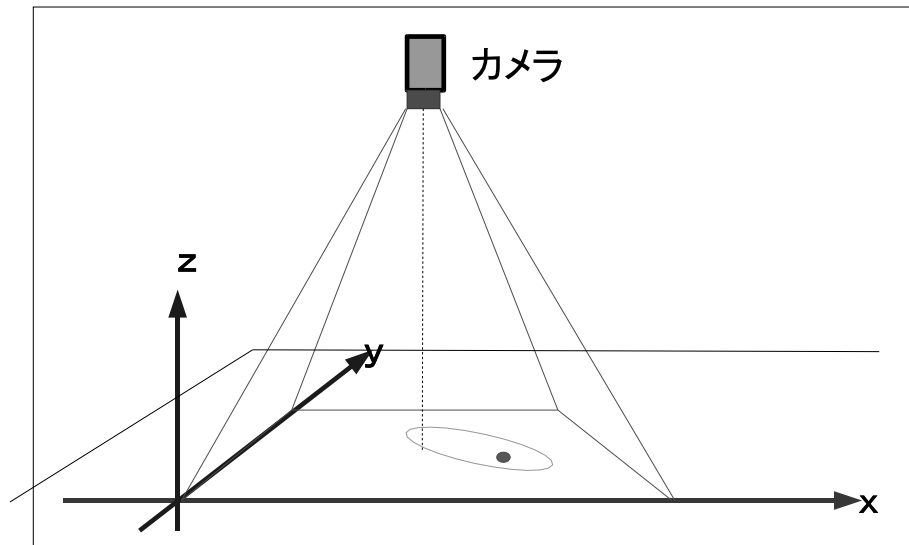


図 4.5: カメラの位置が平面の法線に平行な状態

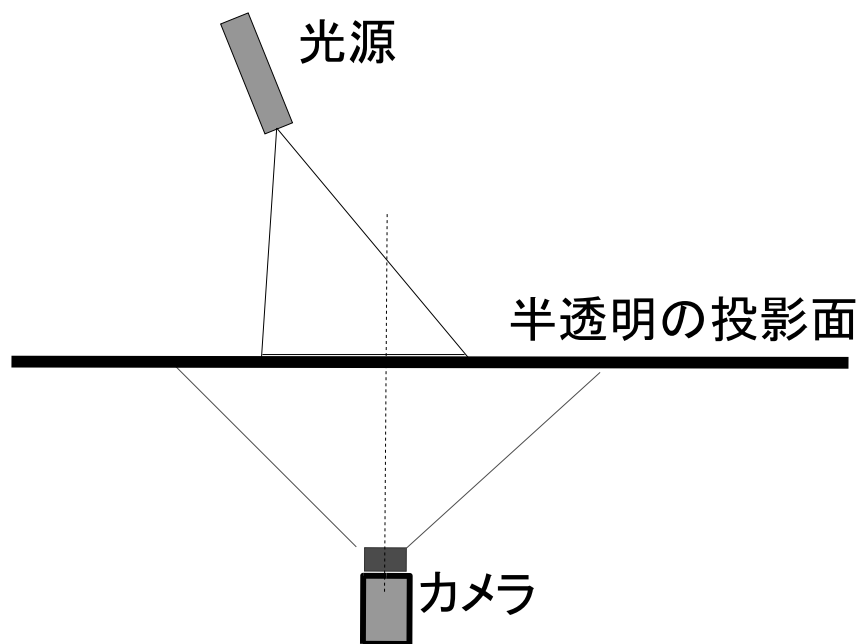


図 4.6: カメラを投影面の裏側に置く様子

4.4.1 画像処理

ここでは画像処理について、説明する。カメラで取得した画像は計算機に送られる。そして、取得画像に二値化処理などを行い、楕円と光点の図形を抜き出す。光点と楕円はそれぞれ点列の集まりである。

光点はドットが一ヶ所に集まったものである。光点の x 座標と y 座標はそれぞれの和を取りドットの数で割った値を光点の座標とする。

次に楕円について説明する。

二値化処理された楕円状の点列から、最小二乗法を用いて楕円方程式を求める。最小二乗法は楕円方程式を仮定し、その点列方程式までの最短距離が一番小さくなるように、方程式の係数を決定して行く方法である。

楕円方程式が求まると楕円の長軸、短軸、楕円の傾き、中心点の位置が求まる。そしてそれらの特徴量からまず光源の姿勢を求め、そして光源の位置を求める事ができる。

取得画像はカラー映像である。投影面が白の場合、光源に色のある物を使えば画像から楕円と光点の画像データを取り出すことは容易である。また木目調などの柄がある場合は、元画像を用意しておき、取得画像データと元画像の差分を取る事で楕円、光点の画像データを取り出すことが出来る。

4.4.2 姿勢

姿勢の定義の仕方には様々なものがある。ここでは光源の姿勢 (θ, ϕ, δ) の定義について説明する。

簡単のため、光源は z 軸上にあり、原点を向いているとする。このとき、投影像は円である。

図 4.7 の左の図のような、光点が円の中心からずれている場合について説明する。光点の位置が長軸上から離れる場合の姿勢の定義について説明する。簡単のため光

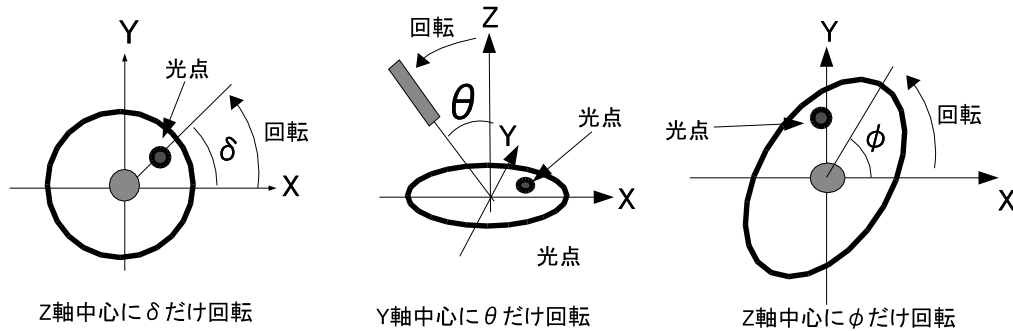


図 4.7: 姿勢の定義

源は z 軸上にあり、原点を向いており投影像は欠けのない円であるとする。光点ははじめ、 x 軸上正の方向にあるとする。まず第一に光源を光軸を基準に反時計回りに δ だけ回転させる (図 4.7 左)。このとき光点の位置は回転移動する。そして第二段階として光源を y 軸方向軸半時計回りに θ だけ回転させる (図 4.7 中)。このとき投影像は円から楕円に変化する。最後に第 3 段階として z 軸中心として半時計回りに ϕ だけ回転させる (図 4.7 右)。このように回転させた時の光源の姿勢を (θ, ϕ, δ) と定義する。

4.4.3 光源の位置

光源の位置について説明する。楕円の特徴量と姿勢が求まると、そこから光源の位置を算出することが出来る。投影面上に x - y をとり、平面法線方向に z 軸をとる。光源の位置は (l_x, l_y, l_z) と定義する。

4.5 二次曲線を扱うメリット

ここでは投影像に二次曲線を利用するメリットについて説明する。

光と投影像を三次元ポインティングデバイスに用いる手法において投影像に光

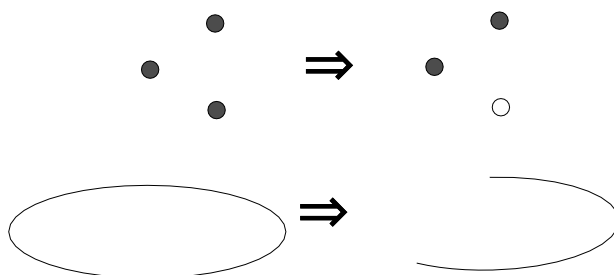


図 4.8: 欠けた楕円

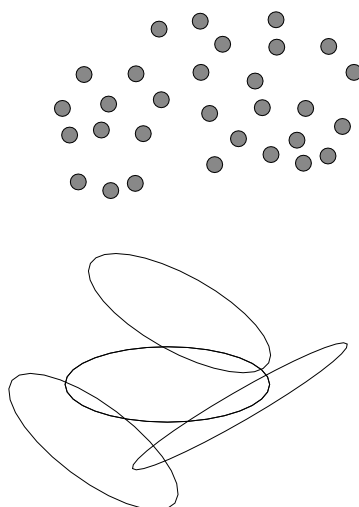


図 4.9: 複数の光源を用いた時の投影像

の点を三つ使用する方法がある。光の点を三点照射する光源を用いても光源の位置を算出する事が出来る。この場合、図 4.8 上の様に何らかの原因で光の点が一つ欠けた場合、光源の位置を算出する事は出来なくなる。これが二次曲線の場合、楕円の一部分が隠れても元の楕円を推定する事が出来るので復元性が強いといえる。

また複数人で使用する時は 図 4.9 の様に投影像が複数重なっても画像処理により重なった楕円を分解出来る。光の点を三つ使う場合、点が 3 の倍数個出現するのでどの三つがペアなのか特定する事は出来ない。その他に、誤差に強いという事が言える。

4.6 その他のメリット

本デバイスは箸を持ったり、ペンを持ったりする姿勢で扱え、またワイヤレス構造であるので、直感的に操作することができる。

本研究では投影像の取得にカメラを用いている。携帯電話をはじめ、カメラを搭載した電子機器が数多く存在し、これらの装置へも応用が考えられる。

4.7 応用

ここでは円錐状の光を使用して考えらる応用形態について説明する。

本研究では円錐状の光を発する光源を利用している。このような光源を使用すると、色々な使用形態、応用が考えられる。

4.7.1 複数人で使用する

ここでは図?? 複数人の入力を一度に行う場合について説明する。

複数の人が同時に本デバイスを使用した場合、複数の投影像を処理しないといけない。光源は二次曲線の投影像を映し出す。二次曲線は連続性のある図形なので、重なった時はその図形を画像処理により分ける事が出来る。よって分解したそれぞれの図形より、光源の位置を算出することが出来る。

個人の特定の仕方としては複数考えられる。

一つは、各人が持つ光源の円錐状の光の広がり角度 α を、A さんには 30 度、B さんには 45 度といったように個人に予め与えておく。このとき投影像の特徴量から誰がどこを指しているのか特定できる。

そのほかには、楕円に欠けで表される模様を与え、その模様から、個人を特定することも考えられる。また、光源の色を複数利用しその色から個人を特定する方法も考えられる。

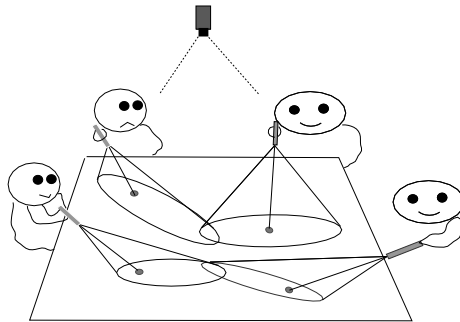


図 4.10: 複数人で使用する様子

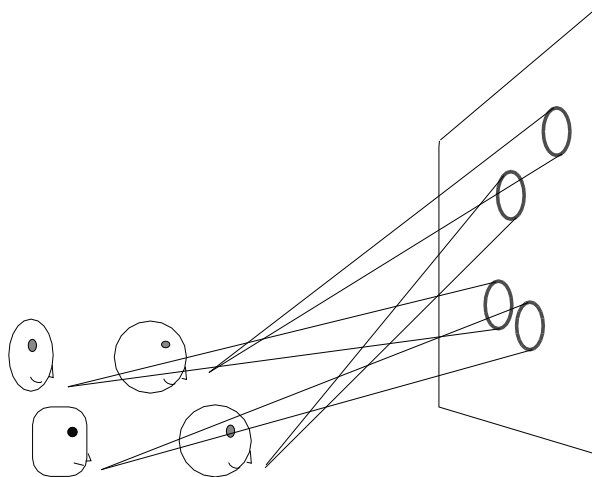


図 4.11: 教室で使用する様子

4.7.2 教室で使用する

図 4.11 教室など広いスペースでの場合を考える.

黒板をスクリーンとして, 席についている人が黒板に向け光源を向けた場合, 黒板に映し出された投影像より, どの席に座っている人がどこを指しているかということが解る.

第 5 章

システムの実装

5.1 実装の概要

この章では実際に構築したシステムについて説明する。

図 5.1 は実際に作成したシステムであり、主に以下の三つの部位により構成される。

- レーザモジュール二個を用いて作製した光源
- 三十万画素 USB カメラ
- ノートパソコン

5.2 光源と投影像

実際に作製した光源とその投影像について説明する。

5.2.1 光源

ここでは、円錐状の光を発する光源の製作について説明する。

光源を製作するには複数の方法が考えられる。

- ホログラフィを利用する方法

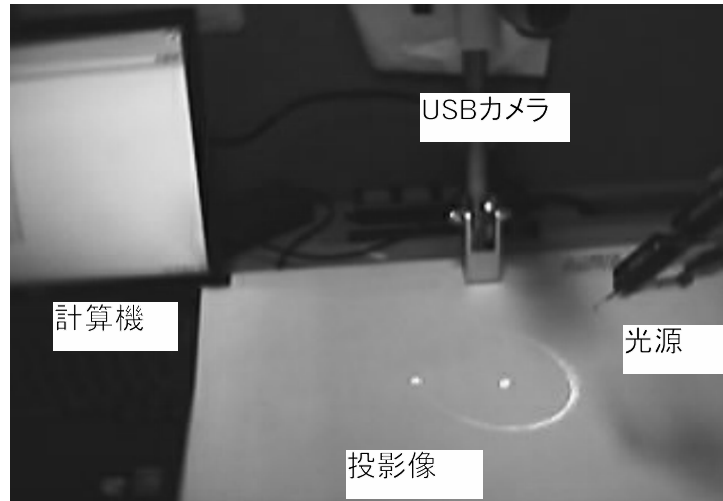


図 5.1: 実際のシステム全体像

- 細い円柱に光を照射する方法
- モータなどで光の軌道を円錐状にする方法

ホログラフィはスリットを通過する光が干渉して作り出される光の像である。これは光の広がる角度を広く取れないことから光源と平面が遠い時有効であり 4.7.2 節で触れた、教室で使用するような時に有効である。

細い円柱にレーザーを照射すると円柱表面で光の軌道が広げられ円錐状の光が発せられる (付録 A を参照のこと)。

レーザーモジュール自体を回転させたり回転するミラーに照射し、光の軌道を円錐状にする手段も考えられる。

これらの光源を机上などの投影面に向けると図 5.2 のような二次曲線の投影像が映し出される。

本研究では、製作のし易さ、製作費用の安さに重点をおき、光源には円柱に光を照射する手段を採用する。

図 5.3 はその概観である。

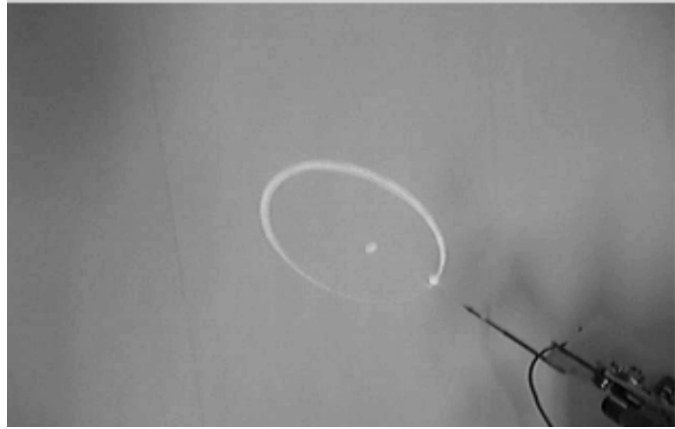


図 5.2: 光源が作る投影像

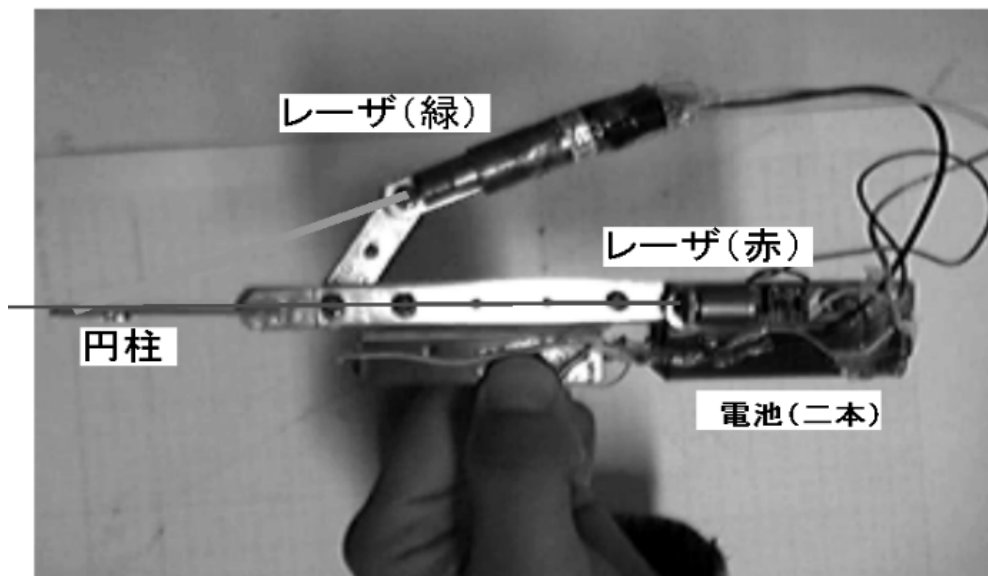


図 5.3: 作製した光源

光源の構成は

- 赤色レーザーモジュール
- 緑色レーザーモジュール
- 単四電池二本
- 円柱

緑のレーザーは円錐状の光を作るのに用い、赤のレーザーは円錐の中心の近くを通過する光点を作るのに用いる。

図 5.3 において赤色レーザーはそのまま直進する。そしてそのまま投影面に到達し図 5.2 の投影像の光点を作る。緑色のレーザーはレーザーの幅より少し狭い金属円柱表面に入射角 α で照射する。照射された光のうち円柱に当たらない光はそのまま直進する。円柱の中心に当たる光は反射角 α で反射する。それ以外の光はそのまま曲面に従い反射されその結果投影像は図 5.2 の楕円を映し出す。(証明は付録 A を参照のこと。)

5.2.2 光源の作る投影像

ここでは光源の作る投影像とその特徴量の定義について説明する。

前節で説明した光源が作る投影像は図 5.4 となる。楕円の特徴量は長軸の長さ l_a 、短軸の長さ l_b 、楕円の傾き ϕ 、楕円の中心点 $C(c_x, c_y)$ である。円錐の中心線と平面の交点を $A(a_x, a_y)$ 、光点の位置を $H(h_x, h_y)$ として、光源の回転を δ とする。

実際の投影像は図 5.2 となる。光点の色を赤、楕円の色を緑、という風に楕円と光点を違う色にする事で、カメラで読み込んだ後の画像処理において楕円と点を分解する事が容易になり、処理がし易くなる。

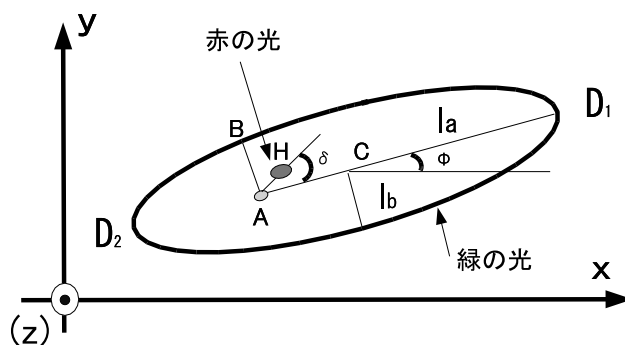


図 5.4: 投影像の特徴量

5.3 投影像の取得

ここでは使用したカメラについて説明する.

今回, 図 5.5 の USB カメラを用いた.

カメラの仕様は以下のようなになる.

- ロジテック社製:USB カメラ
- 画素数: 三十万画素
- 解像度: 320×240
- 1 秒間当りの取得画像数: 30 フレーム
- 色数: 1677 万色 (RGB 各 $0 - 255$ 階調)

5.3.1 カメラの位置姿勢と座標軸の定義

ここではカメラの位置について説明する.

簡単のため, カメラの向きは図 5.6 の上のように平面の法線に平行であるとする. またカメラの位置や向きを変更する場合, カメラのキャリブレーションを行う必要がある.



図 5.5: USB カメラ

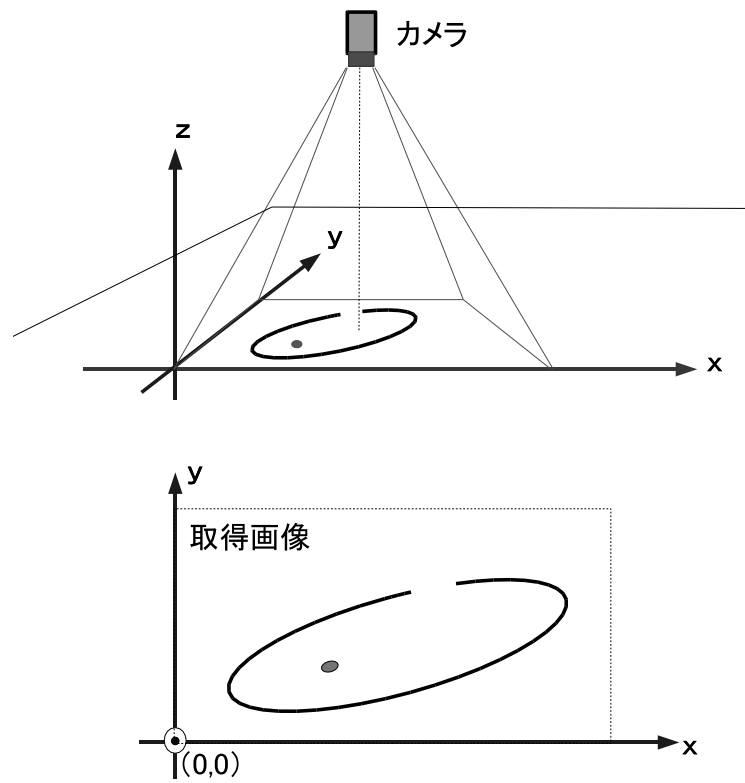


図 5.6: カメラの位置と姿勢

次に座標軸の定義について説明する.

x-y 軸は投影像を映し出す投影平面上にとる. そして z 軸は平面の法線方向にとる. 今, カメラは前節で説明したように図 5.6 の状態に設置されている.

このときの取得画像が 5.6 下のような時, 画面左下の (0, 0) を実空間上の原点とする.

取得画像はドットの集まりである. 実際空間上での投影像の特徴量を求める時, 一ドットの幅は何 mm 知る必要がある. カメラの位置姿勢を決定したら次に取得画像の一ドットは実空間上では何 mm になるのか求める.

まず長さ $l_r(mm)$ の線をカメラで取得する. 取得したその線の両端の座標を求める. すると線の長さ $l_d(pixel)$ が求まる. このときの単位はドットである. これらより, 一ドットあたりの長さ l_1 は,

$$l_1 = \frac{l_r}{l_d} \quad (5.1)$$

として与えられる.

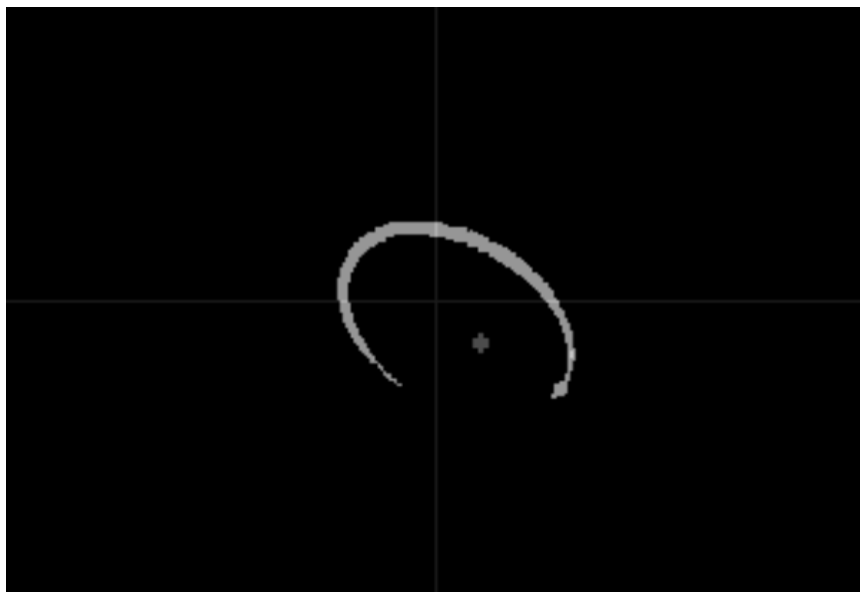


図 5.7: 二値化した画像

5.4 光源の位置姿勢

USB カメラで取得した画像は, 計算機に送られる.

ここでは取得した画像から, 光源の位置姿勢を求める過程について説明する.

5.4.1 取得画像の二値化

ここでは取得画像の二値化について説明する.

二値化は取得画像から投影像の楕円と光点の点列で一たとして取り出すのに用いる. 図 5.2 の取得画像を二値化した画像は図 5.7 となる.

楕円と光点は違う色の閾値で識別され, 別々に処理される. 光点は赤の閾値を設定し, 赤成分がそれ以上になる点を取得する. 取得した点列より光点の座標を求める.

楕円は緑色であるので, 緑の閾値に従い取得画像を二値化処理し, 楕円状の点列

を取り出す。

5.4.2 光点の位置

光点の位置の求め方について説明する。

光点の位置は、二値化処理によって得られた点列の x, y 座標の平均を光点の位置とする。

光点に含まれる N 個の点列の座標をそれぞれ、 $\{R_i(x_i, y_i) : i = 1, 2, \dots, N\}$ とすると、光点の座標 $H(h_x, h_y)$ は、

$$h_x = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (5.2)$$

$$h_y = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} \quad (5.3)$$

と求められる。

5.4.3 楕円方程式

次に楕円方程式の求め方について説明する。

いま図 5.7 のように二値化処理した投影像が得られたとする。緑色の楕円は、二値化処理されて楕円状の点列として得られる。これらを最小二乗法を用い楕円状の点列に一番近い形をした楕円方程式を推定する事で楕円方程式を求めることが出来る [8].

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

$$ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (5.4)$$

とする。

ある点 P_j と楕円との「距離」が関数, $G(P_j, a, b, c, d, e, f)$ で表すとき, 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.

$$E = \sum_{i=1}^N G(P_i, a, b, c, d, e, f) \quad (5.5)$$

(a, b, c, d, e, f) は楕円方程式の係数である.

簡易化の為, 距離 G は次のように定義する.

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

$$(aI_{xj}^2 + bI_{xj}I_{yj} + cI_{yj}^2 + dI_{xj} + eI_{yj} + f)^2 \quad (5.6)$$

((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, 次式で与えられる.

$$E = \sum_{i=1}^N (aI_{xi}^2 + bI_{xi}I_{yi} + cI_{yi}^2 + dI_{xi} + eI_{yi} + f)^2 \quad (5.7)$$

有意義な解をえる為,

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + e^2 + f^2 = 1 \quad (5.8)$$

の条件を与える.

式 (5.7) は次のように書き換えられる.

$$E = V^T \mathbf{S} V + \lambda V^T V - \lambda \quad (5.9)$$

今,

$$V = [a \ b \ c \ d \ e \ f]^T$$

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

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

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.

固有値の一番大きい値を元の式に戻し行列を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り楕円方程式を求める事が出来る. 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 を求める. 求めた楕円方程式が, (5.4) 式となる場合, 楕円の中心座標 $C(x_0, y_0)$ は,

$$x_0 = \frac{0.5bf}{ca - 0.25 * b^2} \quad (5.10)$$

$$y_0 = -\frac{af}{cf - 0.25b^2} - \frac{d}{b} \quad (5.11)$$

と求まる. 楕円の傾きを ϕ とすると,

$$\tan 2\phi = \frac{b}{a - c} \quad (5.12)$$

$$\phi = 0.5 \tan^{-1} \frac{b}{a - c} (0 < \phi < \frac{\pi}{2}) \quad (5.13)$$

と求まる.

長軸, 短軸を l_a, l_b とすると,

$$l_a = \frac{(a \cos^2 \phi + 0.5b \sin 2\phi + c \sin^2 \phi)(ac - 0.5b^2)}{g} \quad (5.14)$$

$$l_b = \frac{(a \sin^2 \phi - 0.5b \sin 2\phi + c \sin^2 \phi)(ac - 0.5b^2)}{g} \quad (5.15)$$

と求められる. 以上で楕円の 5 つの特徴量, x_0, y_0, ϕ, l_a, l_b が求まった.

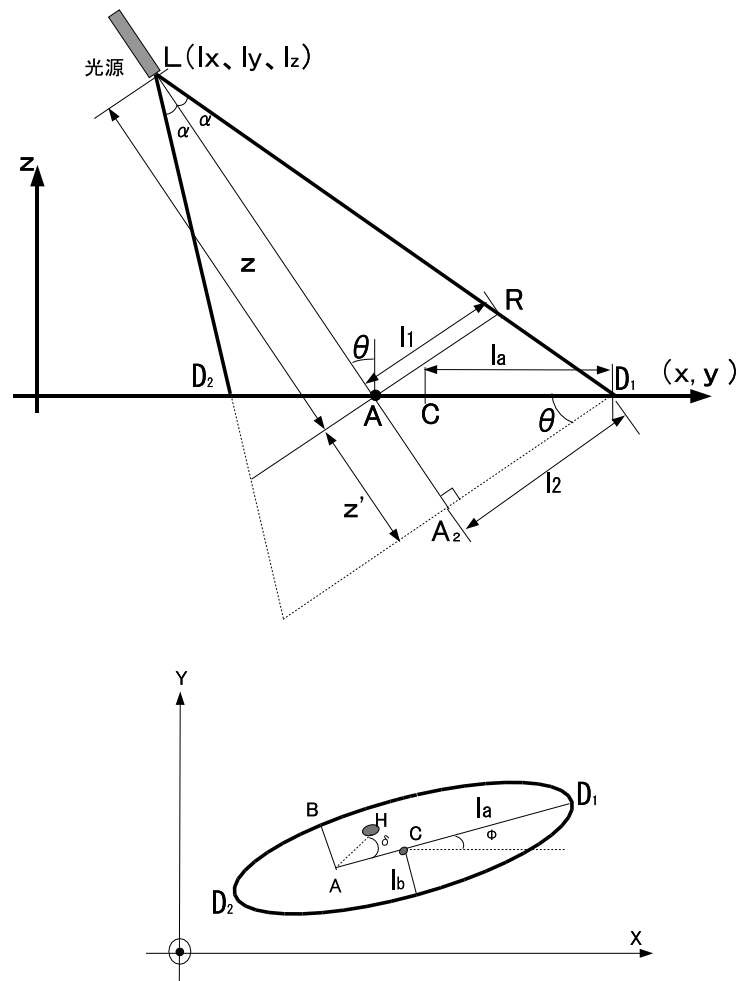


図 5.8: 円錐状の光が平面に照射される様子

5.4.4 光源の姿勢

ここでは先に求めた楕円の特徴量と 図 5.8 より光源の姿勢求める.

光源の姿勢を (θ, ϕ, δ) とする.

まず θ を求める. 図 5.8 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 5.8 の楕円において 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.

CD_1 は楕円の長軸であり $|CD_1| = l_a$ である.

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

$$\frac{l_1}{z} = \frac{l_2}{z + z'} \quad (5.16)$$

がいえる。

直角三角形 $\triangle AD_1A_2$ より、

$$\sin \theta = \frac{z'}{l_a + |AC|} \quad (5.17)$$

$$\cos \theta = \frac{l_2}{l_a + |AC|} \quad (5.18)$$

の2式が得られ、(5.17)(5.18)(5.19)の三式より、

$$\frac{l_1}{z} = \frac{(l_a + |AC|) \cos \theta}{z + (l_a + |AC|) \sin \theta} \quad (5.19)$$

の式が得られる。

なお、 $|AC|$ の値は、

$$|AC| = \sqrt{\frac{a^2(a^2 - b^2) \tan^2 \alpha}{b^2 + a^2 \tan^2 \alpha}} \quad (5.20)$$

と与えられる。(この式の算出は付録Bを参照のこと)

三角関数の合成をしやすいように \sin の項と \cos の項に分解する。

$$\frac{l_a + |AC|}{z} \sin \theta - \frac{l_a + |AC|}{l_1} \cos \theta = -1 \quad (5.21)$$

三角形の合成を用いて、

$$T \sin(\theta + \gamma) = -1 \quad (5.22)$$

の式が得られる。変数 T と $\sin \gamma$ は、次の二式で表される。

$$T = (l_a + |AC|) \sqrt{\frac{1}{z^2} + \frac{1}{l_1^2}} \quad (5.23)$$

$$\sin \gamma = \frac{l_a + |AC|}{l_1 \cdot T} \quad (5.24)$$

(5.2) 式を変形させると,

$$\theta - \gamma = \sin^{-1}\left(-\frac{1}{T}\right) \quad (5.25)$$

の式が得られる。よって、姿勢のパラメータ θ は,

$$\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{1}{T}\right) - \sin^{-1}\frac{l_a + |AC|}{l_1 \cdot T} \quad (5.26)$$

と θ が求まった。

ϕ は前節で説明したとおり楕円方程式より求められる。

次に δ の求め方について説明する。 δ は図 5.8 の楕円の図の $\angle HAC$ である点 H , 点 A そして、角度 ϕ が解っているのので、次の式を得られる。

$$\tan(\phi + \delta) = \frac{h_y - a_y}{h_x - a_x} \quad (5.27)$$

よって、 δ の値は,

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{h_y - a_y}{h_x - a_x}\right) - \phi \quad (5.28)$$

以上のようにして、光源の姿勢パラメータ (θ, ϕ, δ) は,

$$\theta = \sin^{-1}\left(-\frac{1}{T}\right) - \sin^{-1}\frac{l_a + |AC|}{l_1 \cdot T} \quad (5.29)$$

$$\phi = 0.5 \tan^{-1} \frac{b}{a - c} \quad (0 < \phi < \frac{\pi}{2}) \quad (5.30)$$

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{h_y - a_y}{h_x - a_x}\right) - \phi \quad (5.31)$$

と求められた。

5.4.5 光源の位置

次に光源の位置を求める.

5.8 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,

$$|AB| = l_b \sqrt{1 - \frac{|CA|^2}{a^2}} \quad (5.32)$$

である.

また z は, $\triangle LAB$ より,

$$z = \frac{|AB|}{\tan \alpha} \quad (5.33)$$

と求まる.

よって光源の位置 $L(l_x, l_y, l_z)$ は,

$$l_x = a_x + z \sin \theta \cos \phi \quad (5.34)$$

$$l_y = a_y + z \sin \theta \sin \phi \quad (5.35)$$

$$l_z = z \cos \theta \quad (5.36)$$

となり, 光源の位置 (l_x, l_y, l_z) を求める事ができた.

第 6 章

システム評価

ここでは本研究で提案する手法の見積り,そして実際の光源を用いた評価を行う。

6.1 理論的な見積り

6.1.1 使用範囲

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。

光源の高さを大きくしたり光の広がる角度 α 値を大きくすると, 投影像は大きくなる。図 6.1 において, 光軸と平面が交差する点 A と光源までの距離, $z = 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 25.0, 30.0(cm)$ として光源を点 A を中心として傾けていった時の θ の範囲について調べる。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 $20.0(cm)$ を越えるときの θ の範囲とする。

結果と考察

図 6.2 より, z の値を大きくすると投影像が大きくなるので α の値に関わらず使用範囲 θ の範囲は小さくなる。そして, z を固定して α の値を大きくすると投影像が大きくなるので, θ の範囲は狭くなる事がわかる。

このことよりわかるのは 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ので使用範囲を大きく取りたい場合も α を小さくしないといけない。

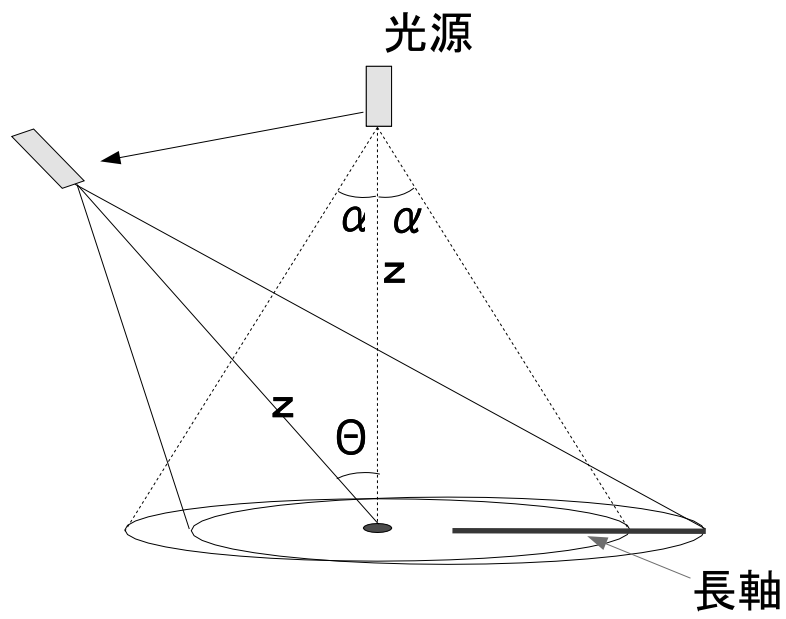


図 6.1: 光源を傾ける様子

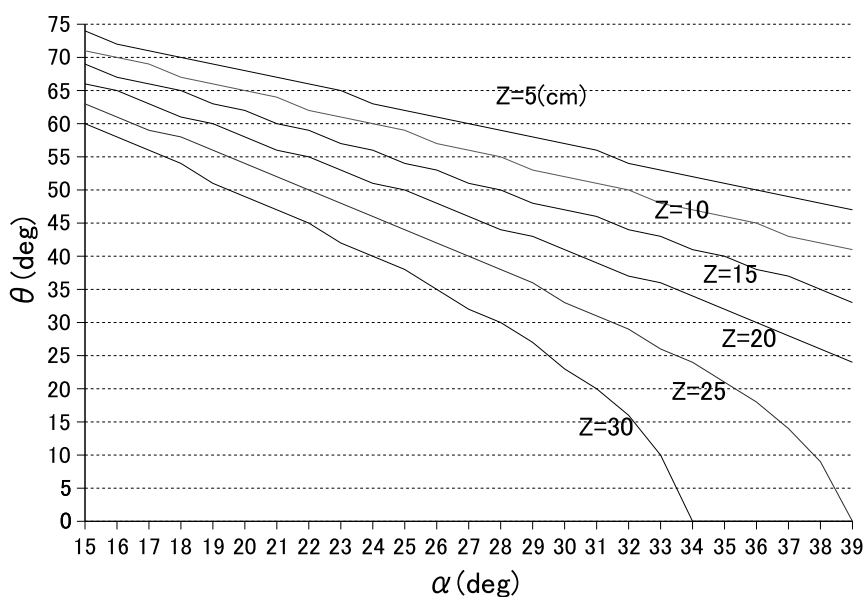


図 6.2: α と θ の関係を表したグラフ

6.1.2 分解能について

前節では有効範囲を大きくしたい場合, α の値を小さくしなければならないと述べた. しかし, α を小さくすると, 投影像も小さくなる.

そこで図 6.1 において z を固定して θ を変化させた時, 楕円のパラメータの長軸 l_a がどのように変化するかモニターしてみた. $\alpha = 15, 20, 25, 30, 35, 40(deg)$ と変えてみて試行を行った.

結果と考察

結果は図 6.3 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.

$\theta = 0$ 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.

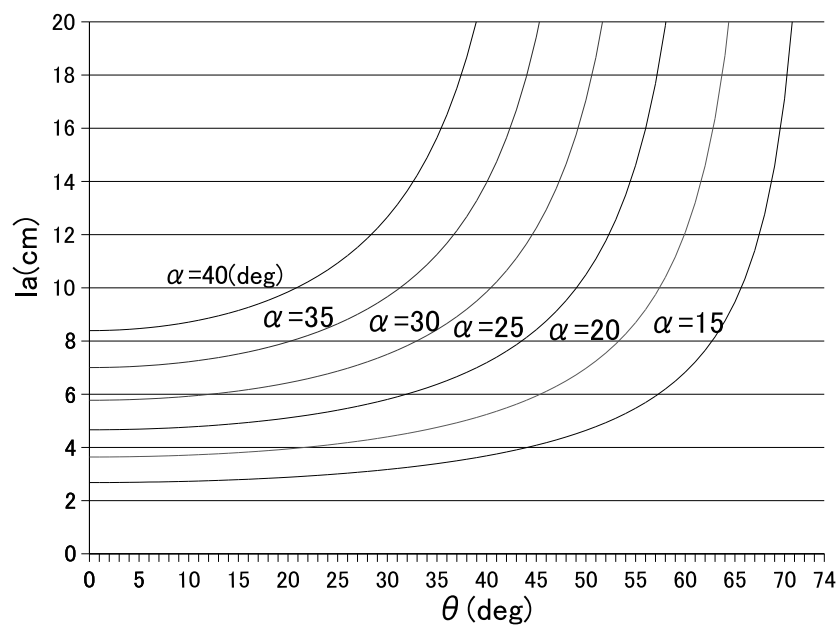


図 6.3: 分解能について

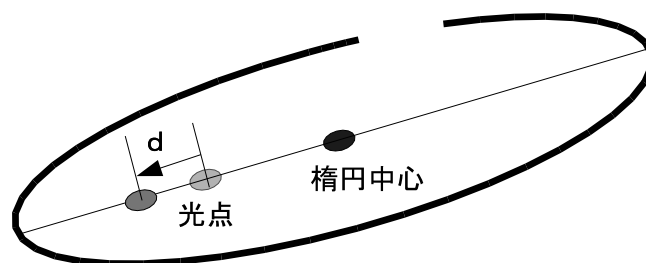


図 6.4: 故意に誤差 d を与える

これらより分解能を考えた場合, α の値は大きく取ったほうがよい事が解る.

6.1.3 誤差について

図 6.4 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 $\Delta\theta$ を調べた.

結果と考察

結果は, 図 6.5 の様になる. 図 6.5 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るとき不安定であり, 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う. これらを考慮

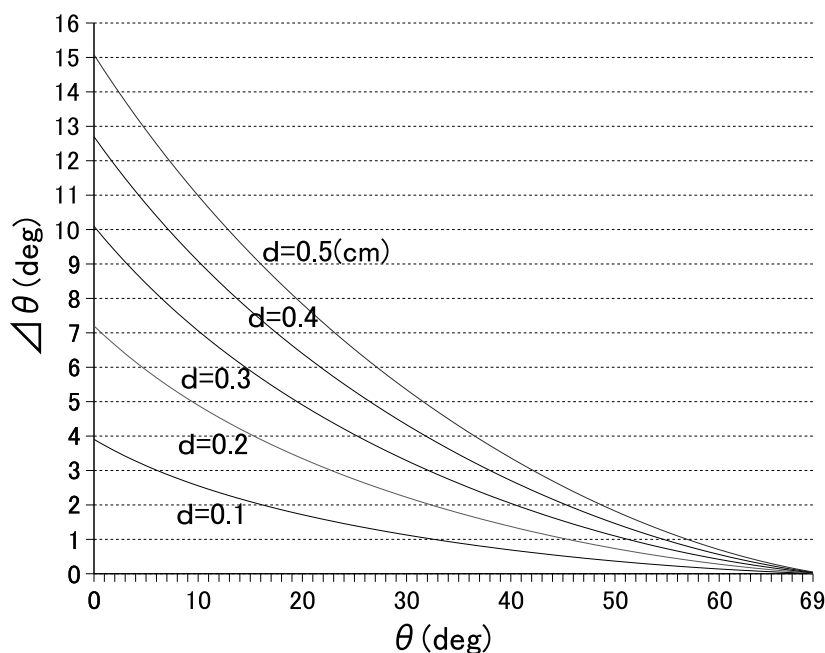


図 6.5: 誤差について

して α の値を決定する必要がある。

6.2 実際の光源を用いた評価

ここでは実際に作製したシステムの評価について述べる。

6.2.1 評価方法

この評価は被験者にデバイスの評価実験を行なってもらいその実験から得られたデータと被験者の感想より評価を行う。

評価方法について説明する。まず画面上に三次元空間を構築する。画面上には操作するオブジェクトと、そのオブジェクトと同じ形をしたターゲットがある。ユーザは三次元ポインティングデバイスを用いて、オブジェクトを操作しターゲットの

位置と姿勢をあわせる。オブジェクトをそのターゲットにあわせるのにかかる時間を測定する。ターゲットにあわせると次のターゲットが現れる。続けて、オブジェクトをターゲットにあわせる。この三角錐をターゲットにあわせる試行を数回繰り返す。そして得られた時間データよりデバイスの評価を行う。移動にかかる時間が少ないほど操作性がよいといえる。

本研究では、この評価方法に基づき以下のような実験を行う。

- 三自由度を持つデバイスの評価
- 五自由度を持つデバイスの評価
- 六自由度を持つデバイスの評価

実験環境

被験者はコンピュータの前にすわり、利き手に光源を持っている。そして目の前にあるモニターを見る。モニターには OpenGL を用いて作製した三次元空間が映し出される。今回の実験では、図 4.6 の様に透過性のある紙面を投影面とし、光源を投影面上方向から照射する。そしてカメラはその光源に対し紙の反対側に来る様に設定する。これはユーザの手がカメラに写りこむことを防ぐためである。

6.2.2 実験 1:三自由度を持つデバイスの評価

三次元ポインティングデバイスを使用するのに (x, y, z) 座標の三自由度の入力のみあればよい場合がある。この実験では、光源の位置座標 (l_x, l_y, l_z) のみを検出し評価を行う。

実験 1:実験方法

実験 1 における実験方法について説明する。

プログラムを実行すると図 6.6 の三次元空間が表示される。画面上には光源の位置を表すオブジェクトの球 A が表示される。そして、ターゲットとして球 B が表示される。ターゲットの出現する位置はランダムに設定する。ユーザは画面上のデバイスの位置を表す球 A を光源を操作しターゲットに移動させる。球 A の中心とターゲットの球の中心までの距離が 5mm 以内にある状態して 0.5 秒静止させた時、球 A がターゲットに重ね合ったと判定する。判定が終わったら、ターゲットは別の位置に移動する。続けてユーザは移動したターゲットに球 A を移動させる。この動作を繰り返し、あるターゲットから次のターゲットに球を合わせるのにかかる時間を測定する。この操作を十回繰り返す。なお、プログラムを立ち上げて最初のターゲットに球をあわせた時間を実験のスタート時間とする。この実験を三人の被験者に対し行う。

実験結果 1

試験結果は図 6.7 のようになる。測定時間の単位は、秒である。

実験 1:被験者の評価

この実験における被験者の評価をまとめると以下の様になる。

- 初めはイメージ通りに動かす事が出来なかったが最後にはなれてきた。
- 光源をどの様に持てばよいか解らなかった。
- 距離感が無いため、ターゲットに球をあわせる時、ターゲットと球の前後関係を得るためにデバイスを回転運動させ距離感を持たせた。
- 腕を宙に浮かせているので長時間持ちつづけると疲れる。
- 実験中は画面を見ているので、投影像がカメラに写っているかどうか解らないので、光源の動かせる範囲も直感的にわかりづらかった。

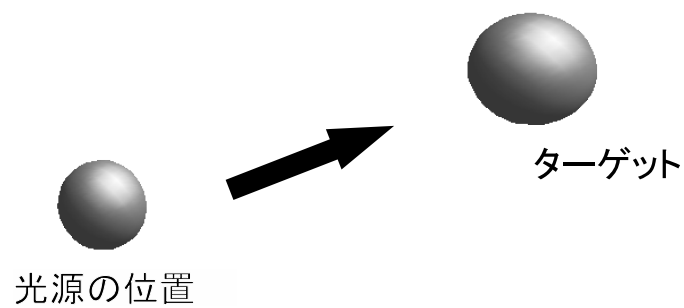
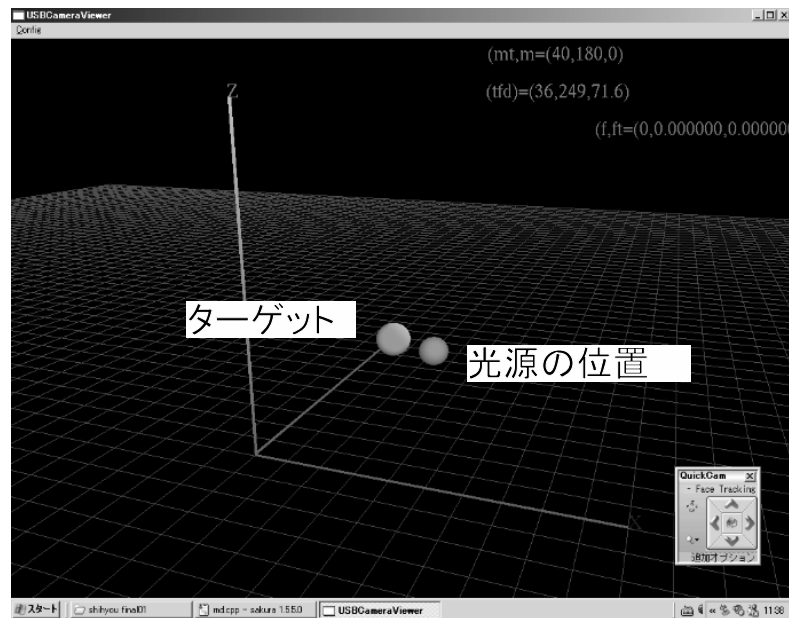


図 6.6: 実験 1 のプログラム実行画面

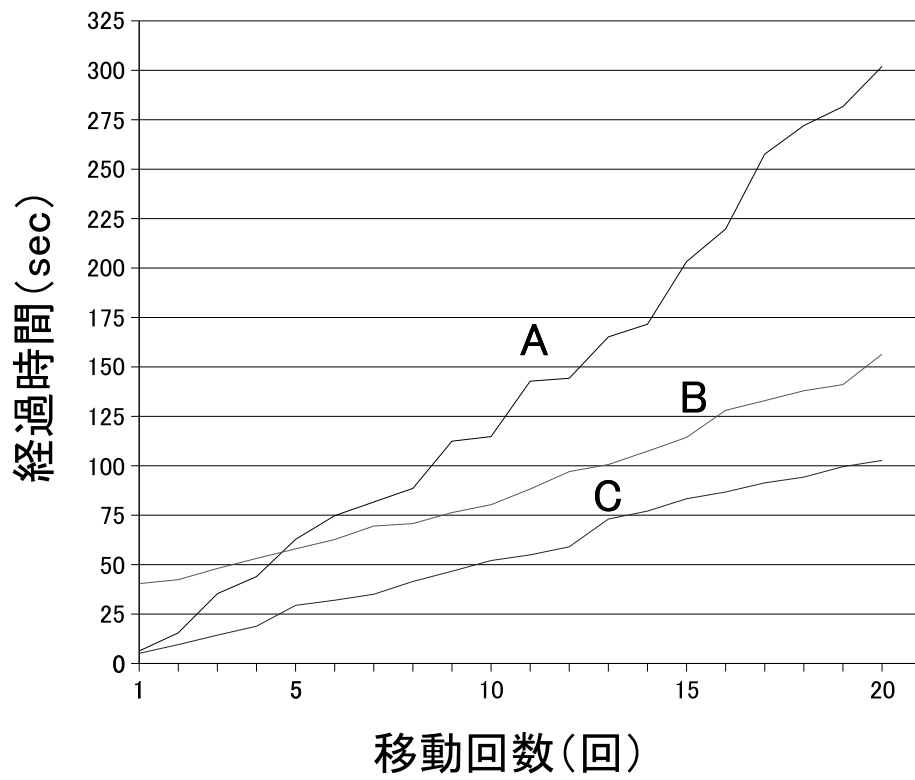


図 6.7: 三自由度の実験結果

実験 1: 考察

ターゲットにあわせる時間は早い人で 6 秒, 遅い人で 15 秒であった。被験者は, 本デバイス进行操作する事になれていないため, このような結果になったと考えられる。また画面上の三次元空間において, 距離感がつかめないという意見を得た。また光源の形態がプロトタイプであるので, もう少し使い易く形状を工夫すれば, 結果は改善されると考えられる。

6.2.3 実験 2: 五自由度を持つデバイスの評価

ここでは五自由度を持つデバイスの評価を行う。

光源の位置の算出には光源の姿勢パラメータ, θ, ϕ を使用する。 δ はこれとは独立した要素である。三次元ポインティングデバイスとして, 光源の位置 (l_x, l_y, l_z) の他に, 姿勢要素 (θ, δ) を同時に扱えば, より多くの情報を一度に扱う事が出来る。実験 1 では, 光源の位置 (l_x, l_y, l_z) のみを合わせる実験であったが, 実験 2 では光源の位置に加え姿勢の 2 要素 (θ, ϕ) をあわせる実験を行う。

実験 2: 実験方法

プログラムを実行すると図 6.8 に三次元空間が表示される。画面上には光源の位置を表すオブジェクトの球の他に, 姿勢を表す, 円錐を球接するよう表示する。ターゲットはこの形状と同じ物を使用し, ユーザは光源の位置と姿勢をターゲットにあわせ 0.5 秒静止させる。そして次のターゲットが表示される。ターゲットの出現方法は, 光源の姿勢に制限があることを考慮し, あらかじめプリセットした場所に現れるとする。この実験では, 10 回の試行を行う。位置の許容誤差は 5mm, 姿勢パラメータの許容誤差は 10 度とする。

実験 2: 結果

試験結果は図 6.9 のようになる。

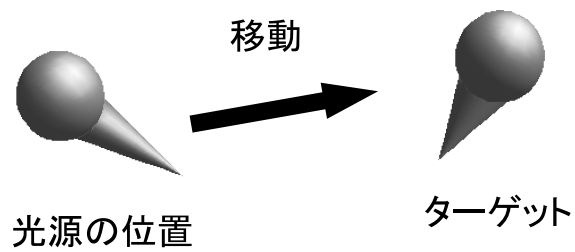
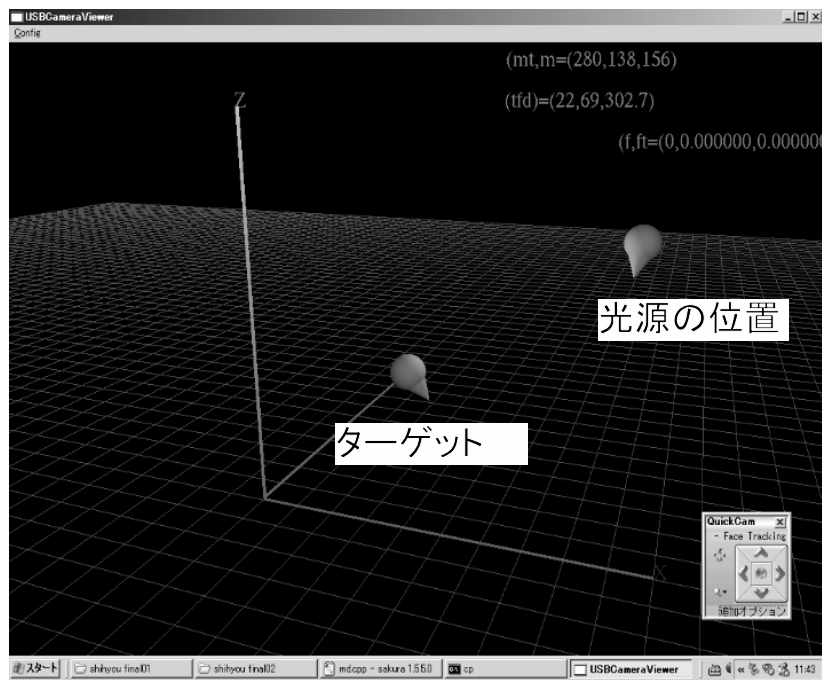


図 6.8: 実験 2 のプログラム実行画面

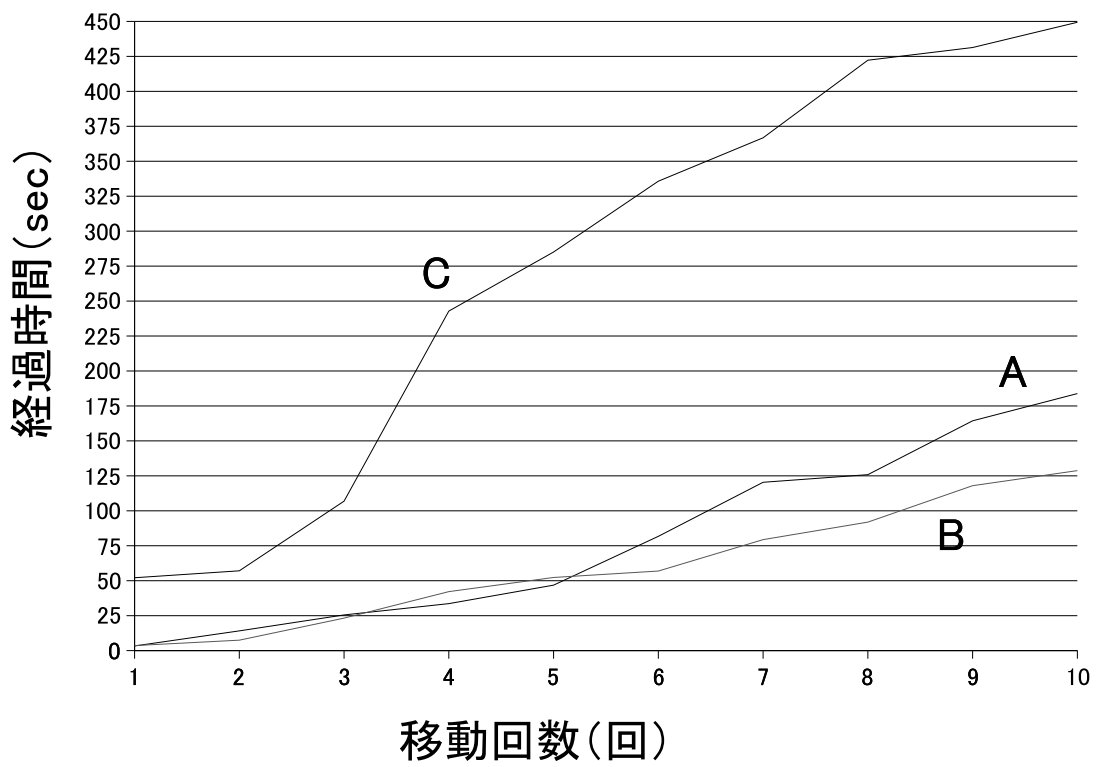


図 6.9: 五自由度の実験結果

実験 2:被験者の評価について

実験 2 において被験者から得た感想は以下の様になる.

- 画面上の光源の傾きがどれ位なのか解りにくい.
- 光源の重心が上にあるので, 傾けた時や長時間持ち続けたとき, 光源の操作性に影響が出る.
- 角度を合わせるのが難しい.

考察

時間が短かった被験者 C は, 一回の試行に, 平均 17 秒時間を要する. 被験者 C は 47 秒かかっている. 実験 1 と比較すると, おおよそ倍の時間を要している事がわかる. 姿勢要素が加わり, よりターゲットにあわせ難くなったことが解る.

操作に慣れてないことと, 光源の形状がプロトタイプである事が, ユーザに疲れを与える結果となった.

6.2.4 実験 3:六自由度を持つデバイスの評価

次に光源の回転を表す δ を含めた, 実験を行う. 三次元オブジェクトを扱うには 6 自由度あれば十分である. 三次元ポインティングデバイスとして, 光源の位置 (l_x, l_y, l_z) とし, 姿勢要素 (θ, ϕ, δ) を同時に扱えば, 更に多くの情報を一度に扱う事だ出来る.

実験 3-1:実験方法

画面上に映る三次元空間上の光源の位置は実験 2 使用した物に加え光源の回転 δ を表す為, 更に球を増やす. この実験において, 画面上に映し出される三次元空間の様子は図 6.10 のようになる. ターゲットもこの形状に合わせたものとし, 実験 2

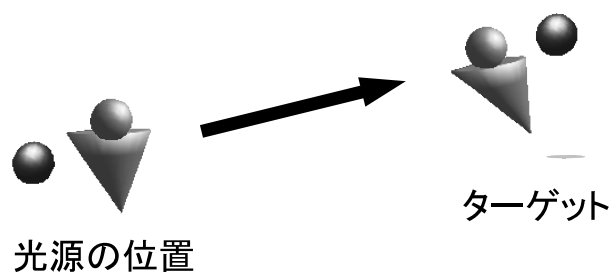
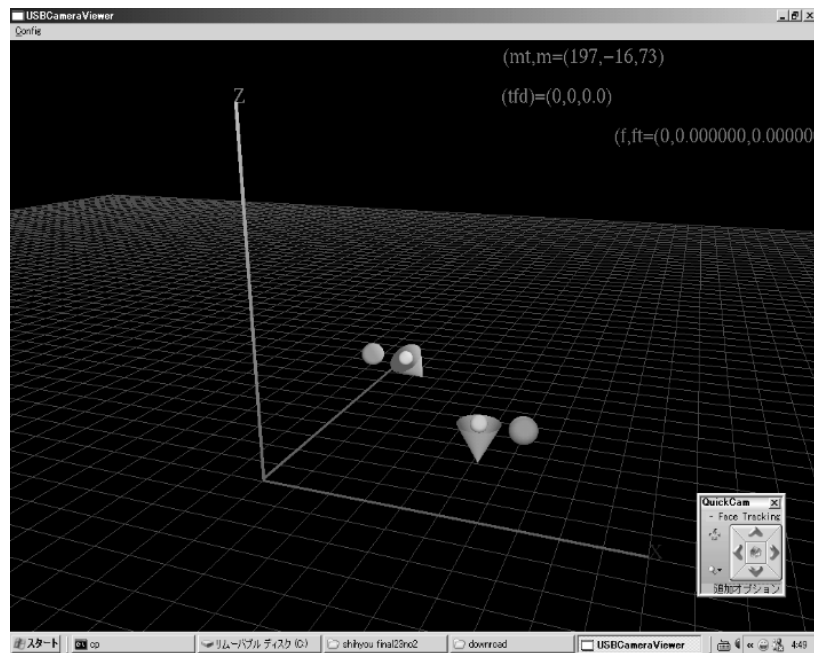


図 6.10: 実験 3 のプログラム実行画面

と同様に，ターゲットにこのオブジェクトをあわせる試行を行う．ターゲットにあわせる時間は 0.5 秒とし，位置パラメータの許容誤差は 5(mm) とし，姿勢パラメータの許容誤差は 10 度とする．

六自由度の場合，操作性が難しくなる為，今回は一人の経験をつんだ被験者に

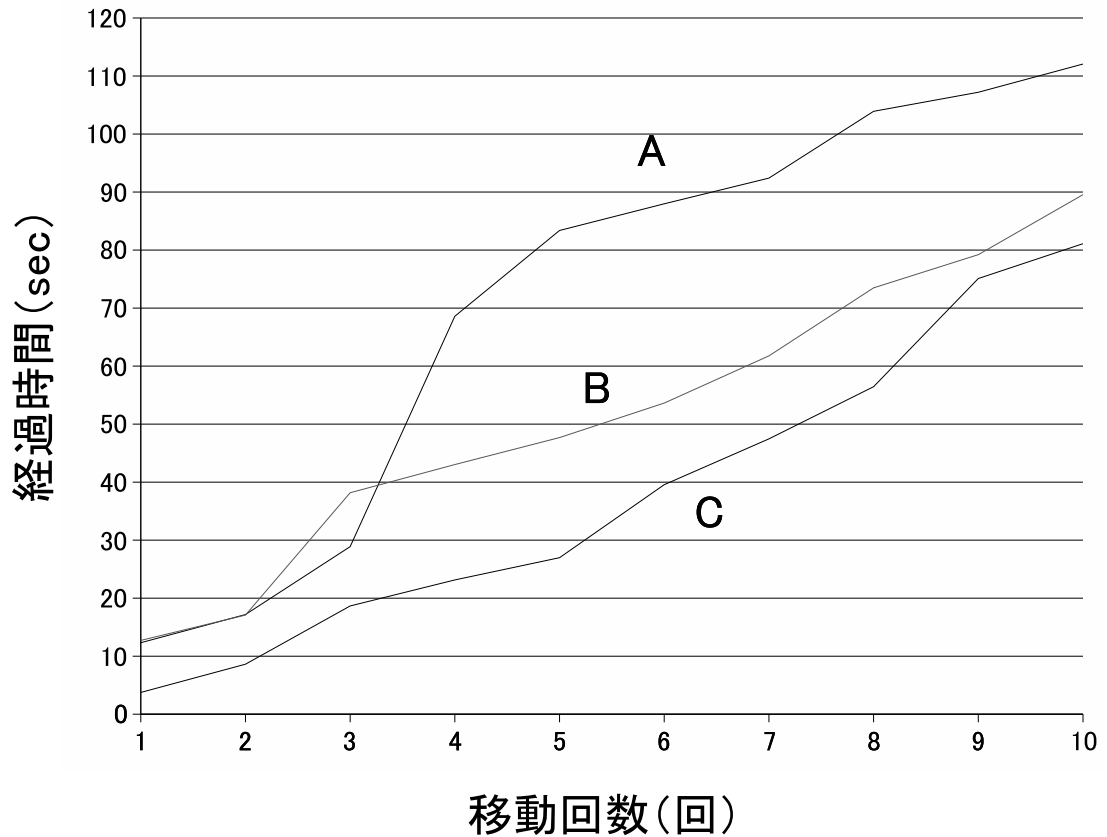


図 6.11: 六自由度の実験結果

対し実験を行なった。

実験 3-2: 結果

実験結果はグラフ 6.11 のようになる。

実験 3-4: 考察

今回は操作になれた被験者が実験を行った。結果より一回の移動に平均 8 秒かかっている事がわかる。光源がプロトタイプではあるが慣れが伴うと早く操作する事が出来る事がわかる。

第 7 章

問題点

本研究で提案した三次元ポインティングデバイスが持つ問題点について述べる。

7.1 光源に関する問題点

まず取得する投影像が自然光の影響を受けやすいことが上げられる。実験を行った研究室の環境においてはうまく機能するが、日中の屋外などの明るい環境では投影像が自然光により薄くなるので、カメラによる投影像の取得が難しくなる。また現在の光源では、光源が投影面から遠ざかると投影像が薄くなってしまう。

投影像をカメラで取得するときに投影像がカメラで取得できる範囲に収まらないといけなく、また光源を平面に向けないといけなくことから、光源の姿勢範囲が制限される。

7.2 操作上での問題点

実験において、光源が平面に対し垂直な時、つまり投影像が円の時、分解能が低くなり、光などの影響を受け誤差を生じ易くなる事がわかった。

実際の光源を用いた実験の時にユーザは光源を空中に浮かせて操作するため、デバイスの重さがユーザの操作性を悪くし、ユーザに負担をかける事も解った。そして操作に慣れるまでは、投影像が投影面から外れて、うまく対象物を操作する事が出来なくなる事が多々あった。

第 8 章

まとめ

本研究では、円錐状の光を出す光源を用いて、六自由度を持つ三次元ポインティングデバイスを製作出来る事を示した。そして、円錐状の光を出す光源を製作し、安価でコンパクトに製作出来る事を示した。提案手法は市販されている、USB カメラを用いている。USB カメラを安価に手に入れられる事や、安価な光源を用いる事で安価に三次元ポインティングデバイスを構築できる事を示した。

本デバイスは平面に光源を向けるので光源の位置と姿勢には制限が生じる。光源が平面に対し垂直に向いている時、つまり投影像が円に近いとき、光源の動きに対する投影像の図形の変化が小さくなるので、光源の位置の分解能が下がり、誤差生じ易くなることが解った。

具体的に光源とプログラムを製作し、そして提案理論が正しいことを確認した。そして本デバイスの評価を行った。評価を行った被験者の意見に光源の重心が高い位置にあり、操作しにくいという意見があった。現在製作した光源は、プロトタイプである。よりユーザが使い易い形状にしないといけない。光源が平面を向けないといけない事や、カメラの撮像範囲に投影像が入らないといけない。この事で、ユーザはデバイスを操作すると同時に、ちゃんと撮像範囲に投影像が入っているかどうか、気をつけながら操作しないといけないので、より広い範囲で、投影像を取得できるようにしないといけない。

謝辞

本研究を遂行するにあたっては、いろいろな方々にお世話になりました。

まず、指導教官の多田好克先生、田中先生、村山先生、そして佐藤助手には日頃から熱心なご指導、そしてご鞭撻を賜りました。また、ご多忙中にもかかわらず論文の草稿を丁寧に読んで下さり、大変貴重なご助言をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。また、実験を手伝っていただいた一年の皆さんにここに深く感謝いたします。

そして、本研究が行なえたことは、研究方針や方法論について議論をし、共に研究生生活をおくってきた多田研、村山研の学生諸氏おかげでもあります。最後に、これらの皆さんに感謝いたします。

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] 井上 智之, 西住 直樹, 鈴木 伸明, 安福 尚文, 佐賀 聡人:仮想空間中での手書き認識に基づいた3次元モデリングインターフェイス“ BlueGrotto ”の提案, 情報処理学会研究報告, 2002-HI-99, pp.31-38(2002).
- [7] 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).
- [8] 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).

付録

付録 A

ここでは円柱にレーザを照射し楕円になる部分について、どの様にして楕円になるか説明する。

証明：

次のような手法で光源を作製する。

光源には指向性の良いレーザを2つ使用する。一つは光の点を作るのに使用する。

もう一方を金属円柱にむけ照射する。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。

今、2のように金属柱と光軸の間に入射角が θ の場合、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。

レーザの幅は金属の幅より大きくなるようにしてある。

金属柱表面で反射された光は円錐状の軌道になり、投影像は円、楕円になる。

円柱に斜めに入射した光線の反射点を0とし、0を含む円柱の接平面を考える。入射光線上に点P、反射光線上に点Qを、 $OP = OQ$ 、となるようにとる。点0での反射は、接平面での反射と考えてもよい。接平面にPから下ろした垂線の足を H_1 、Qから下ろした垂線の足を H_2 とする。入射角と反射角は等しく α であり、

$$PH_1 = OP \sin \alpha, QH_2 = OQ \sin \alpha, OP = OQ \text{ より,}$$

$$PH_1 = QH_2 \cdots \text{ア}$$

$$OH_1 = OP \cos \alpha, OH_2 = OQ \cos \alpha \text{ OP} = \text{OQ より}$$

$$OH_1 = OH_2 \cdots \text{イ}$$

直線 H_1H_2 が0を通ることは自明であり、

$$\angle AOH_1 = \angle BOH_2 \cdots \text{ウ}$$

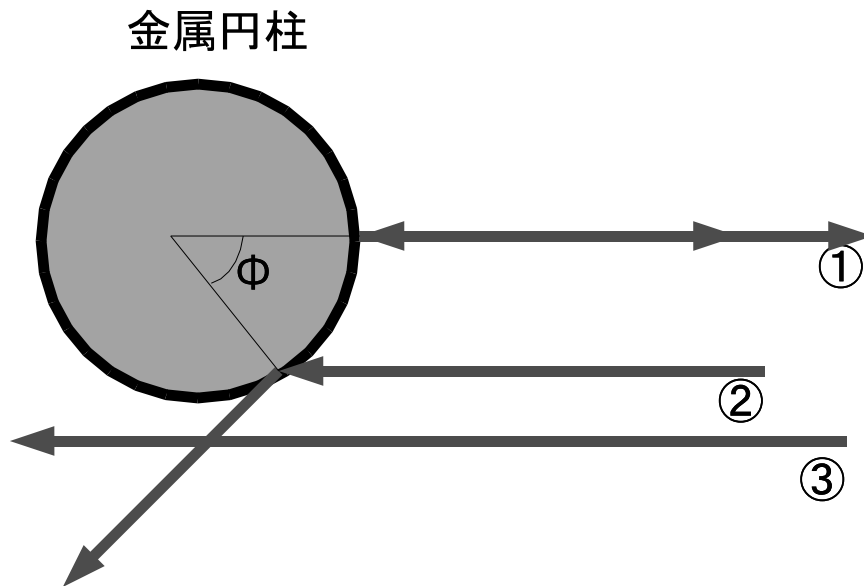


図 1: 円柱にレーザーを照射

共に直角三角形であるので、イウより、三角形 AOH_1 と三角形 BOH_2 は合同であり

$$AH_1 = BH_2 \cdots \text{エ}$$

同じく共に直角三角形であるので、アエより、三角形 APH_1 と三角形 BQH_2 は合同であり

$$AP = BQ \cdots \text{オ}$$

ここで、 $AP = OP \sin \theta_1$ $BQ = OQ \sin \theta_2$ であり、

$$OP = OQ, \text{オより}, \sin \theta_1 = \sin \theta_2$$

共に鋭角であるので、 $\theta_1 = \theta_2$ がいえる。

これは図 1 の角度 ϕ によらない。

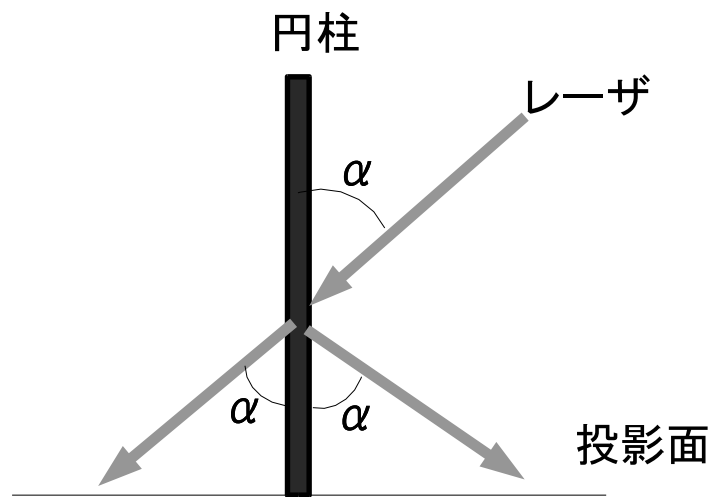


図 2: 円柱を縦から見た図

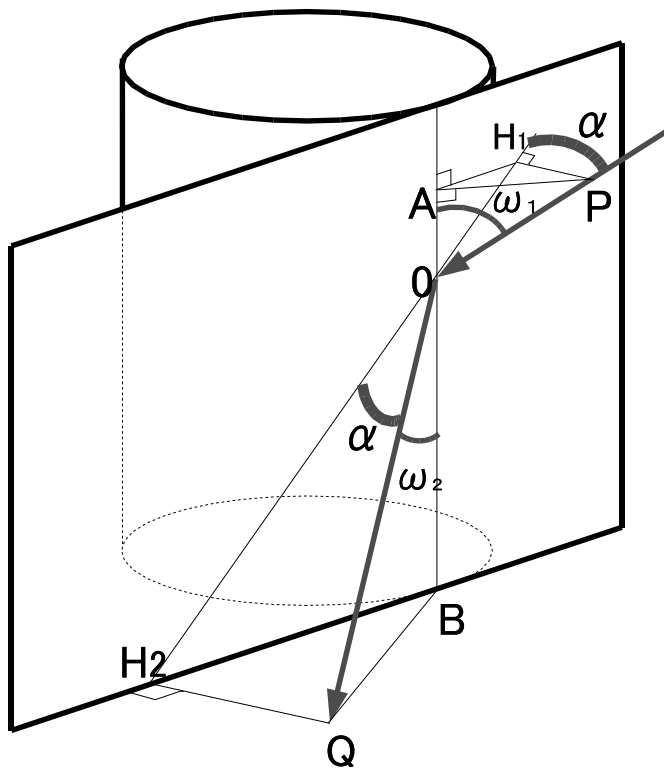


图 3: 円柱に照射

付録 B

ここでは楕円の中心 C と平面と光軸の交点 A までの距離 $|AC|$ を楕円の特徴量との算出について述べる。

図 4 を用いて $|AC|$ の求め方を説明する。

図 4 は円錐を平面で切断された様子を表す。楕円 1 は、断面図である。楕円 2 は光源から断面を見たときの図でありこのときも楕円である。楕円 2 において、 A_3 は楕円の焦点となる。

よって焦点距離 $|A_3C_2|$ は次式で与えられる。

$$r = |A_3C_2| = \sqrt{l_a'^2 - l_b^2} \quad (1)$$

図 4 より辺 AC と焦点距離 r , そして角度 θ の関係は次式で表される。

$$r = |A_3C_2| \cos \theta \quad (2)$$

この二式より、楕円 2 の長軸 l_a' は、

$$l_a' = \sqrt{|AC|^2 \cos^2 \theta + l_b^2} \quad (3)$$

と表される。

楕円 1 において $|CD_1|$ は楕円 1 の長軸 l_a であるので、

$$l_a \cos \theta = l_a' \quad (4)$$

の関係式が得られる。

よってこの二式より、

$$l_a \cos \theta = \sqrt{|AC|^2 \cos^2 \theta + l_b^2} \quad (5)$$

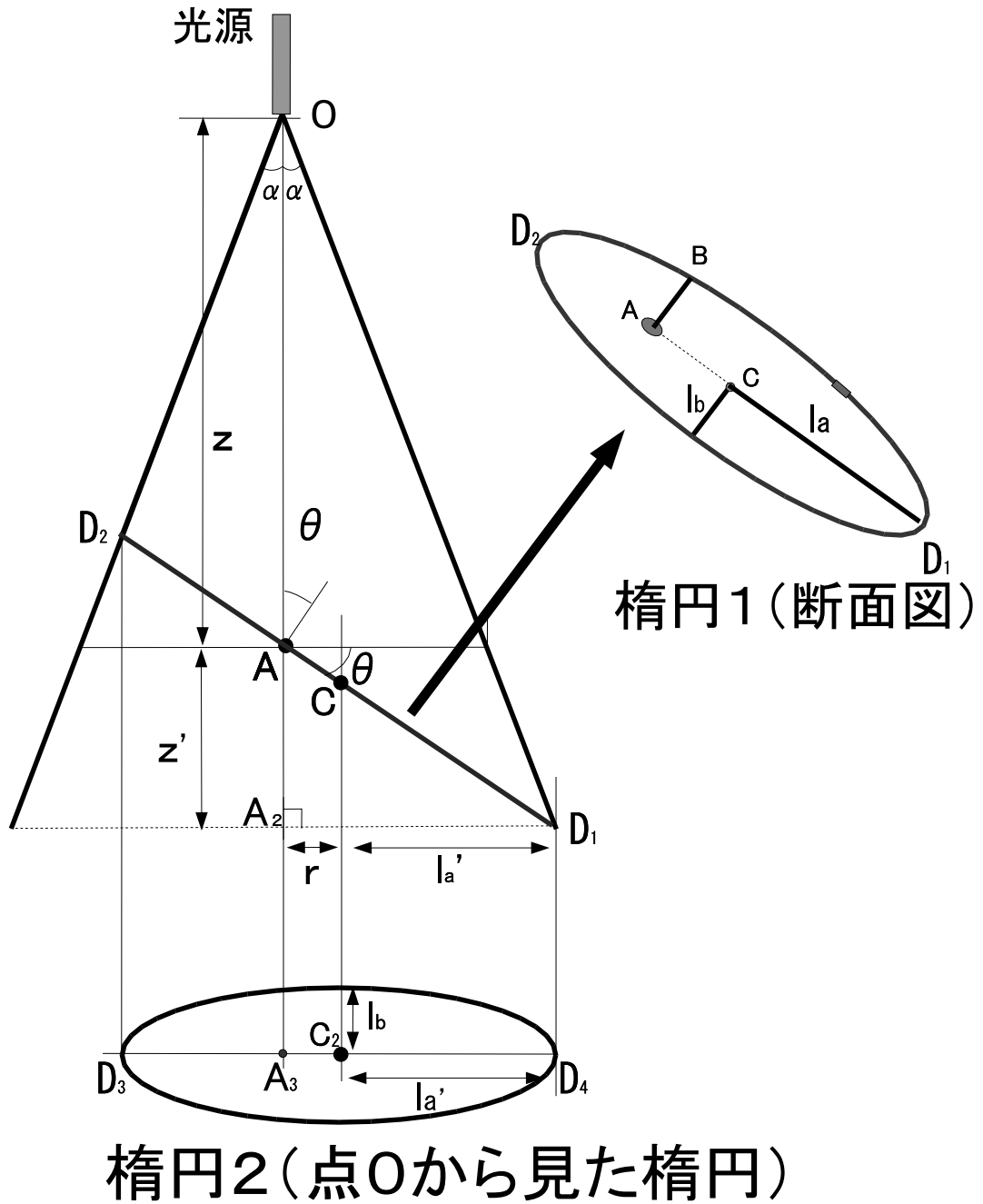


図 4: 横から見たとき

が得られる. 更に, 式変形を行い,

$$\cos \theta = \frac{l_b}{\sqrt{l_a^2 - |AC|^2}} \quad (6)$$

がえられ, $\cos \theta$ と $|AC|$ の関係式が得られる.

次に $|AC|$ を求める.

楕円 2 において, $|D_3D_4|$ は, $\triangle OD_2D_1$ と光の広がり角度 α そして光源の傾きの角度 θ の関係より,

$$|D_3D_4| = 2l'_a = \frac{2z \tan \alpha}{1 - \tan^2 \alpha \tan^2 \theta} \quad (7)$$

と求められる.

楕円 2 の方程式において次の関係式が得られる.

$$\frac{|AC|^2}{l_a^2} + \frac{z^2 \tan^2 \alpha}{l_b^2} = 1 \quad (8)$$

楕円 1 において, $|D_2A|$ の値は, $\triangle OD_2A$ と α 関係より,

$$|D_2A| = z \tan \alpha \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{1 + \tan \alpha \tan \theta} \quad (9)$$

が得られる. 楕円 1 の長軸 l_a は,

$$l_a = |AC| + |D_2A| \quad (10)$$

であり,

$$|AC| = l_a - |D_2A| \quad (11)$$

(9.9) 式を代入して,

$$|AC| = l_a - z \tan \alpha \frac{\sqrt{1 + \tan^2 \theta}}{1 + \tan \alpha \tan \theta} \quad (12)$$

がえられた . よって、(9.6) 式と $\tan \theta$ と $\cos \theta$ の関係式,

$$1 + \tan^2 \theta = \frac{1}{\cos^2 \theta} \quad (13)$$

より ,

$$|AC|^2 = \frac{l_a^2(l_a^2 - l_b^2) \tan^2 \alpha}{l_b^2 + l_a^2 \tan^2 \alpha} \quad (14)$$

がえられ , 更に式変形を行うと ,

$$|AC| = \sqrt{\frac{l_a^2(l_a^2 - l_b^2) \tan^2 \alpha}{l_b^2 + l_a^2 \tan^2 \alpha}} \quad (15)$$

このようにして , $|AC|$ を楕円の特徴量と光の広がり角度 δ より算出する事が出来た .