

バーチャル空間に挿入可能な三次元スケッチペン

長坂 信吾^{1,a)} 浦西 友樹¹ 黒田 嘉宏¹ 井村 誠孝¹ 大城 理¹

概要：本稿では、タッチパネル式のディスプレイと製作したタッチペンを用いて三次元図形を描画できるシステムを提案する。提案システムでは、ユーザが伸縮可能なタッチペンを持ち、それを画面に向かって押し込むと、ディスプレイではタッチペンがディスプレイに入り込んでいるかのような映像を提示する。伸縮可能なタッチペンには可変抵抗を取り付け、伸縮量に応じて変化する出力電圧からペンの縮み量を計測する。また、タブレット端末に取り付けたカメラでユーザの視点位置を計測し、ユーザの視点位置に応じた映像を提示する。試作したシステムを用いて被験者実験を行った結果、提案システムでは、ユーザに簡単な操作説明をするだけで三次元図形を描画できた。提案システムを用いることで、奥行き方向に一定な曲線の描画や、ペンの押し込み方向に伸びる直線の良好な描画が可能であることが示された。

1. はじめに

三次元モデリングに広く用いられる Computer Aided Design (CAD) システムは、精密な三次元形状をコンピュータ上でモデリングできる。CAD ではマウスやキーボードを使って、各部位の長さや角度などの数値データを入力し、入力された数値データをもとに三次元形状を生成する。そのため、良好な三次元形状をモデリングするためにシステムの習熟を要するという問題点が存在する。

そこでより直接的に三次元形状をモデリングするために、ペン型のデバイスを持ち、手書きでスケッチをするように三次元モデリングを実現できるシステムが多く提案されている。これらのシステムを用いることで、ユーザはより直接的かつ簡単に三次元形状を生成できるようになった。Igarashi らにより提案された Teddy[1] では、マウスやペンタブレットによって描かれた二次元スケッチから、システムが三次元形状を推定することによって三次元形状が生成される。このシステムでは、ユーザは二次元スケッチを描画するだけで手軽に三次元形状を得られる。一方で、ユーザの意図したものとは異なった形状が生成されることがあるといった問題点が存在する。これとは別に、ユーザの意図に対し、より忠実な三次元形状を生成するためのシステムとして、現実空間で手やデバイスを動かすことにより、その軌跡に沿って三次元形状を生成するシステムがある。このようなシステムの例として、PHANTOM[2] に代表されるペン型ハプティックデバイスを用いて行うものが

ある。ハプティックデバイスを用いることで、簡単にペンの現実空間での動きを計測でき、また力覚を提示することで操作を支援できるという利点がある。これらの利点からハプティックデバイスを用いたシステムは多く提案されている [3][4]。しかし、ハプティックデバイスを用いると、デバイスの可動範囲に手の動きが制限されるという問題点が存在する。この問題を解消するために、センサを手装に装着し、それを現実空間で動かすことで三次元形状を生成できるシステムが提案されている [5]。しかしながらこれらのシステムでは、センサの位置を計測する必要があるため装置が大型になりやすい。また現実空間におけるペン先の点と、バーチャル空間における描画結果が出力される点がユーザからみて一致するには、ヘッドマウントディスプレイなどを用いなければならない、システムが大がかりになりやすいといった問題点がある。

本研究では、大型のデバイスを用いることなく、伸縮可能なタッチペンとタッチパネル式のディスプレイを用いて三次元スケッチシステムを提案する。伸縮可能なタッチペンには可変抵抗を取り付け、出力電圧の変化からタッチペンの縮み量を計測する。ユーザが製作したタッチペンを持ち、ディスプレイに向かってペンを押し込んだ際に、ペンの縮み量に応じてペンがディスプレイ内のバーチャル空間に入り込んでいるかのような映像を提示する。また、ディスプレイ上部に設置したカメラを用いてユーザの視点位置を検出し、ユーザの視点に応じた映像を提示することで、ユーザに奥行き感を与える。提案システムを用いることで、ディスプレイに垂直な奥行き方向を認知しながら三次元形状を生成できるので、ユーザの意図した通り三次元形

¹ 大阪大学 基礎工学研究科
Graduate School of Engineering Science, Osaka University
^{a)} nagasaka@bpe.es.osaka-u.ac.jp

状を生成できると期待される。本稿では、提案システムを用いて、三次元の図を描くことが容易か、またどのような図を描くのに適しているかを確認するために、被験者9名に対して、ディスプレイに表示させる参照図形をなぞらせる実験を行った結果について報告し、提案システムの有用性について考察を行う。

2. 関連研究

現実の三次元空間内でペンを動かすことで、三次元形状を生成するシステムは多く提案されている。[6]で提案されている HapticGEAR は、没入型の立体ディスプレイ内で三次元形状の生成を行うものである。このシステムはインタラクションを可能にしたうえで三次元スケッチを行うことができるシステムであるが、ユーザが大型のデバイスを装着する必要があるため、使う場所が限定される。一方、[7]や[8]で提案されている手法は、外界に固定されない空中を自由に動かすことができるデバイスを用いてスケッチを行うことを可能にするものである。またデバイスを手に固定させ、手を支点にして力覚を提示することで、バーチャル物体とのインタラクションを可能としている。これにより本来、物理的な平面上に行うスケッチという動作を、ユーザはより自然に空中で行える。これらのシステムでは、現実空間でのペンの位置や動きを計測するためにセンサを用いている。さらに現実空間でのペンの先の点と、バーチャル空間における描画結果が出力される点を一致させるために、ヘッドマウントディスプレイが用いられる。そのためにシステムが大がかりになり、使う場所が限られてしまう。

本研究では、大型の装置を用いることなく、持ち歩くことができる三次元スケッチシステムを構築することを目指す。本研究で提案するシステムは、タッチパネル式のディスプレイに情報を提示し、現実空間でのペンの先の点と、バーチャル空間における描画結果が出力される点を一致させることで、ユーザは自然で違和感のないスケッチを行える。また、使用する機器はタッチパネル式のディスプレイと伸縮可能なペンのみであり、ユーザにセンサを装着する必要がない点も利点として挙げられる。

3. 提案システム

本節では、提案システムの概要、および各処理を実現するための理論について述べる。

3.1 システム概要

本研究で提案するシステムでは、タッチパネル式のディスプレイと伸縮可能なタッチペンを用いる。システム概要を図1に示す。ディスプレイ上部に設置したカメラを用いてユーザの視点位置を検出し、視点位置に応じた自然な映像を提示することで、ユーザに奥行き感を与えている。ユーザはタッチペンを持ち、ディスプレイに押し当てる。

システムはタッチペンがディスプレイに触れているかを判定し、触れていたらタッチペンの縮み量を計測し、タッチペンが縮んだ分だけディスプレイの中にあるバーチャル空間に入り込んでいるとして、縮んだ量に応じたバーチャルなペン先を表示する。ユーザが描画する線は、バーチャルなペン先の軌跡に沿って描画される。

3.2 タッチペンの構造

図2に製作したタッチペンの全体構造を示す。タッチペンの先には、スタイラスペンが取り付けられており、ユーザの手と電氣的に接続されている。またタッチペンには図のようにバネが取り付けられており、ペンがディスプレイに触れていないとバネの弾性力で伸びる。タッチペンをディスプレイに押し込むと、バネが押し込まれタッチペンが縮む。可変抵抗に接続された歯車が、レールとかみ合い可変抵抗の軸が回転する。バネが伸び切った際に、マイクロコントローラに値を送信することで、縮み量の誤差をその都度補正する。

3.3 縮み量計測

前節で述べた通り、タッチペンの縮み量を計測するために、提案システムでは可変抵抗を用いる。可変抵抗とマイクロコントローラの接続関係を図1に示す。可変抵抗の軸の回転にともなって、端子Bの出力電圧は変化する。可変

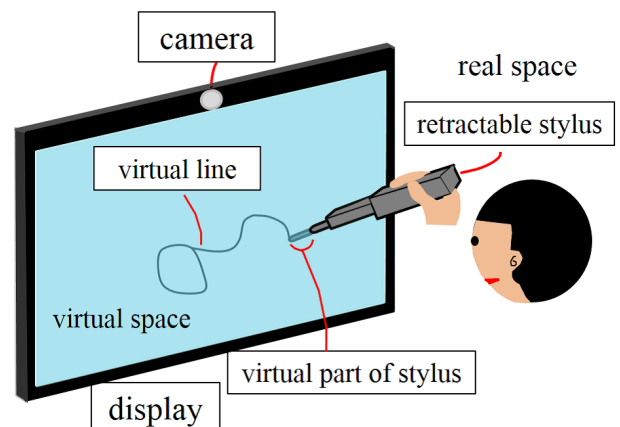


図1 システム概要図

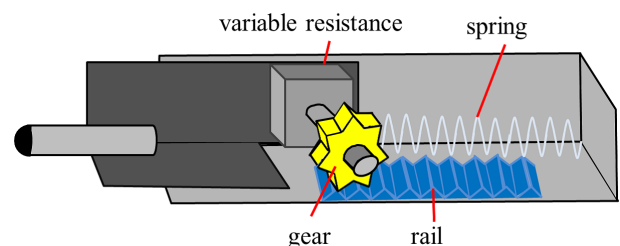


図2 タッチペンの全体構造

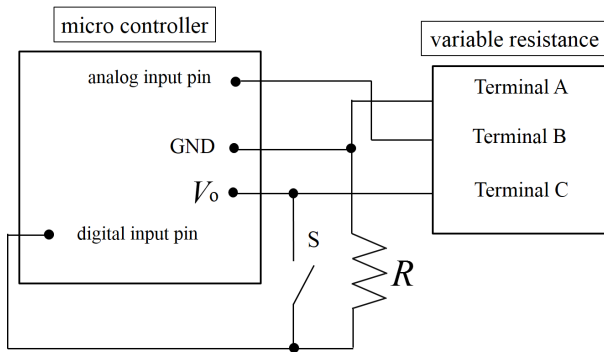


図3 可変抵抗とマイクロコントローラの接続

抵抗の端子 A と端子 B 間の抵抗を R_1 、端子 B と端子 C 間の抵抗 R_2 、端子 A、端子 B、端子 C の電位をそれぞれ、 V_A 、 V_B 、 V_C とした際の、端子 B の電位を式 (1) に示す。

$$V_B = \frac{R_2 V_A + R_1 V_C}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

また $V_A = 0$ 、 $V_C = V_0$ とすると、端子 B の電位 V_B は式 (2) のように示せる。

$$V_B = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_0 \quad (2)$$

可変抵抗の歯車の半径を r とし、可変抵抗の回転角を θ としたときの、タッチペンの縮み量 L を式 (3) に示す。

$$L = r\theta \quad (3)$$

タッチペンの長さが変わることによって、端子 B に印加する電圧が変動する。本研究で用いるマイクロコントローラのアナログ入力ピンは、0 から V_0 の電圧を入力とし、それを 0 から N に量子化してコンピュータに送信する。すなわち、電圧の分解能は $\frac{V_0}{N}$ である。本研究で用いる可変抵抗の総回転角度を $\theta_{\max}$ としたときの、タッチペンの分解能 ΔL を式 (4) に示す。

$$\Delta L = \frac{r\theta_{\max}}{N} \frac{V_0}{V_0} \quad (4)$$

$$\Delta L = \frac{r\theta_{\max}}{N} \quad (5)$$

タッチペンの縮み量が 0 のとき、マイクロコントローラがコンピュータに 0 の値を送るように、タッチペンは縮み量が 0 になると図 3 のスイッチ S が閉じる機構になっている。スイッチ S が閉じると、マイクロコントローラのデジタル入力ピンに High のデジタル信号が送信される。マイクロコントローラでは、デジタル入力ピンに High が送られると、その時のアナログ入力ピンで受信している電圧を基準として値を送信することで、タッチペンの長さが復元した際の出力電圧の誤差を補正する。

3.4 視点位置検出

提案システムでは、ユーザの視点位置に応じた適切な映

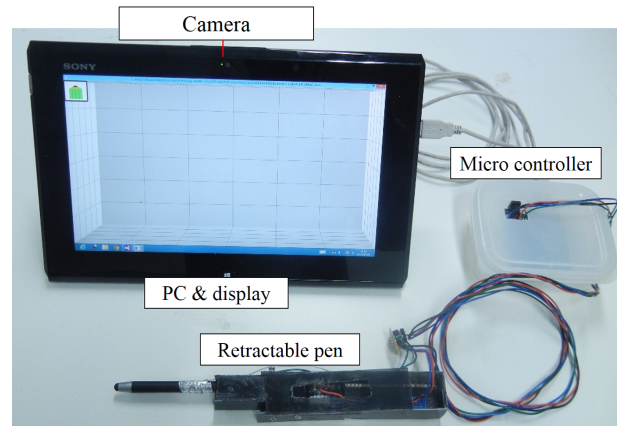


図4 システム概観図



図5 作業風景

像を提示する。提案システムにおいては、ユーザの肌色領域の重心を求めることで視線方向を決定した上で、一定の奥行きに視点が存在するものとして三次元中の視線位置としている。視点位置とバーチャル空間に存在する物体を結び、それがディスプレイ面に交差する点にバーチャル物体を描画することで、ユーザの視点位置に応じた映像提示を実現する。

4. システムの実装

本研究では、伸縮可能なタッチペンを用いての三次元スケッチシステムを実装した。実装システムの概観を図 4 に、提案システムの作業風景を図 5 に示す。また製作したタッチペンを図 6 に示す。

また構築したバーチャル空間を正面から見た際の映像を図 7 に示し、左側から見た際の映像を図 8、右側から見た際の映像を図 9 に示す。これらの図より視点位置が変化すると、それに応じて見え方も適切に変化することが示された。

次に、ペンが入り込んでいく際の映像の例を示す。ペンの縮み量が 0mm のときの映像を図 10 に示し、縮み量が

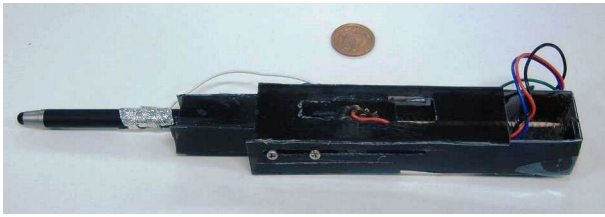


図 6 タッチペン

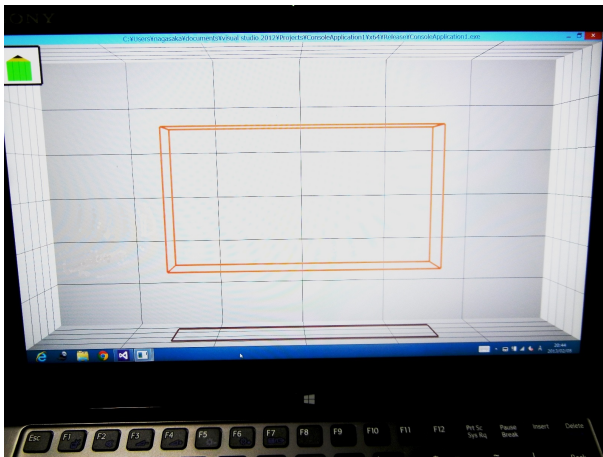


図 7 構築したバーチャル空間

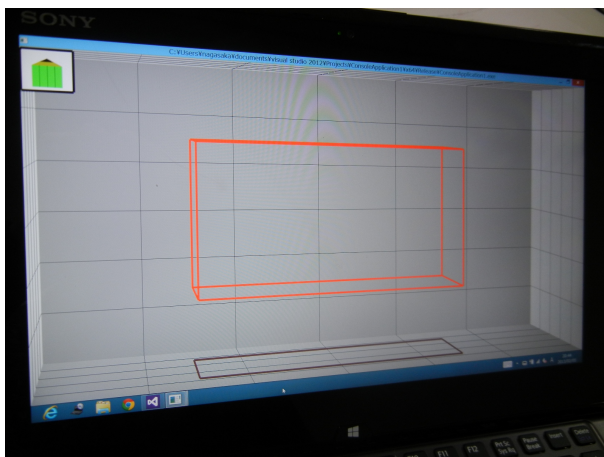


図 8 向かって左から見た図

20mm のときの映像を図 11 に示す。

5. 実験結果

提案システムの有効性を確かめるために、本研究で構築したシステムを用いて、被験者 9 名に対して実験を行った。本実験においては、被験者は画面に表示される参照図形をなぞる試行を行った。実験の際に被験者がなぞった参照図形を、図 12 および図 13 に示す。

被験者が直方体に沿って描いた図形の例を図 14 および図 15、円錐に沿って描いた図形の例を図 16 および図 17 に示す。図 15 に示した図形は、図 14 に示した図形をディス

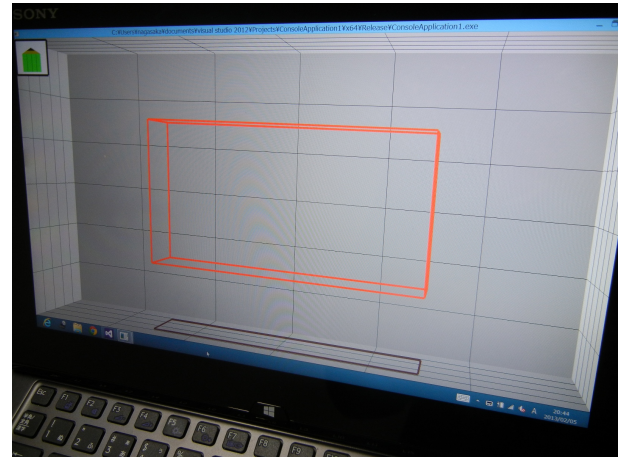


図 9 向かって右から見た図

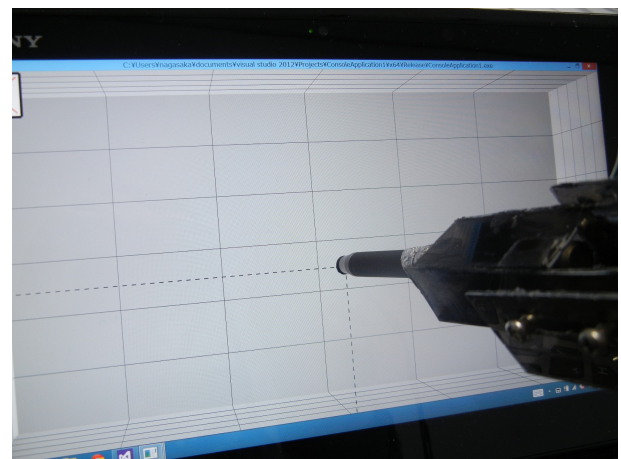


図 10 縮み量が 0mm の際の映像

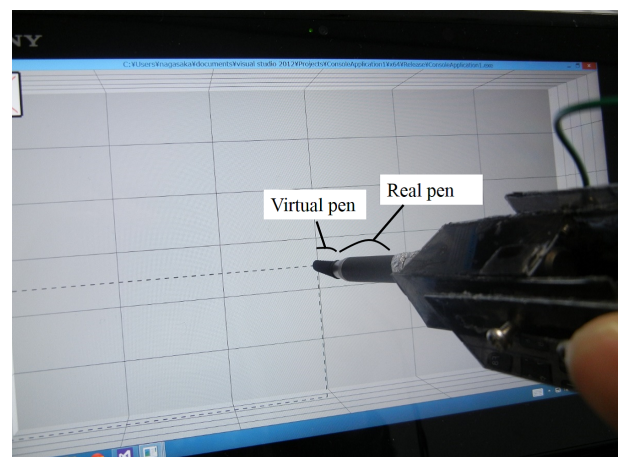


図 11 縮み量が 20mm の際の映像

プレイに平行で図形の中心を通る直線に対して反時計周りに 45 度回転させた図形で、図 17 に示した図形は、図 16 に示した図形を同様に 90 度回転させた図形である。描画の正確性の指標として、被験者が描画した点 X_i と、その点から一番近い参照図形上の点 P_i との距離の平均を表す誤

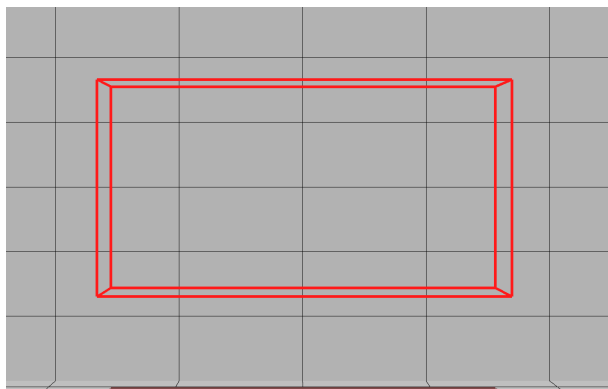


図 12 実験用図 1(直方体)

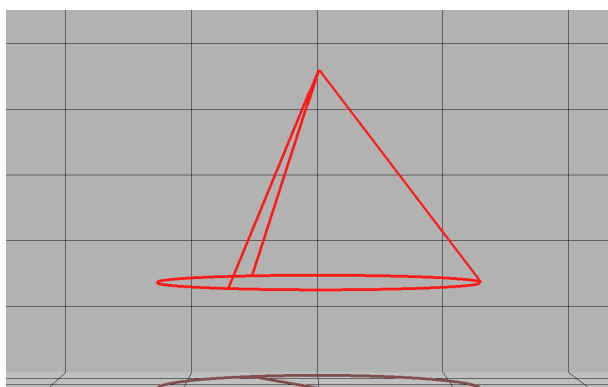


図 13 実験用図 2(円錐)

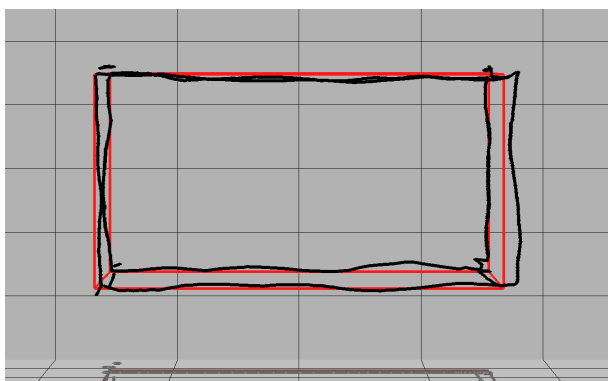


図 14 実験結果 正面から見た直方体

差度 R を用いる．式 (6) に R の定義を示す． M は被験者が描画した線を一定の時間間隔でサンプリングした点の数である．ただし，図 12 の直方体と図 13 の円錐の高さをそれぞれ 1 とする．

$$R = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |\mathbf{X}_i - \mathbf{P}_i| \quad (6)$$

実験結果より，誤差度 R を実験用の図 12 と図 13 におけるそれぞれの部位別に算出した．図 12 の直方体における手前の面を構成する直線，奥の面を構成する直線，奥行き方向の線での誤差度を表 1 に示す．また図 13 の円錐にお

表 1 直方体の誤差度

項目	手前の直線	奥の直線	奥行き方向の直線	直方体全体
平均	0.0869	0.0966	0.0680	0.0774
標準偏差	0.0509	0.0600	0.0235	0.0384

表 2 円錐の誤差度

項目	側面を構成する直線	底面の円	円錐全体
平均	0.168	0.323	0.223
標準偏差	0.0501	0.0116	0.0398

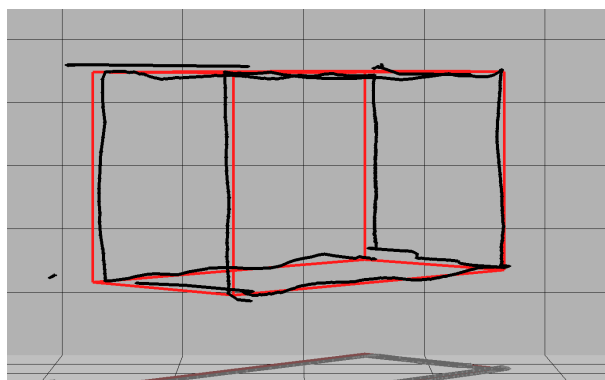


図 15 実験結果 斜めから見た直方体

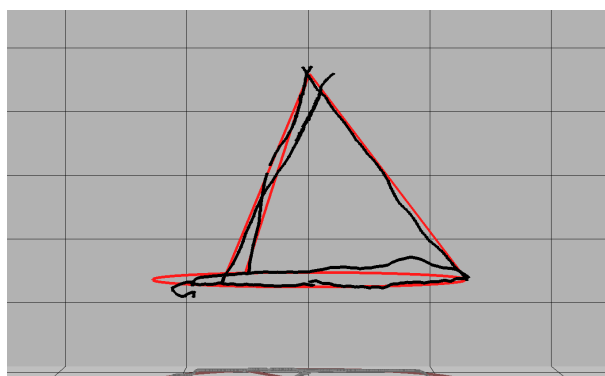


図 16 実験結果 正面から見た円錐



図 17 実験結果 横から見た円錐

ける円錐の底面を構成する円と，側面を構成する三本の線の誤差度を表 2 に示す．

5.1 考察

実験結果より、図 12 の直方体では、手前の面よりも奥に存在する面のほうが誤差度が大きかった。これはペンがバーチャル空間の中で奥に存在するほど、タッチペンのペン先がどこに存在しているかをユーザが認知することが難しいということを示している。また、ペンの押し込み方向への描画はもっとも誤差が小さかった。これはペンを押し込むだけで描画することが可能であることが要因と考えられる。

図 13 の円錐では、直方体のどの部位よりも誤差度が大きかった。これは、提案システムにおいて、ペンをディスプレイと平行に動かす動きと、ペンの押し込む方向への動きを合わせた動きを必要とする描画は困難であることを示している。また、円錐の底面の円の誤差度は上側の直線の誤差度の約 2 倍である。ペンを横に動かしながら奥行き方向を変化させる描画のなかでも、直線よりも曲線のほうが描画が難しいことが分かった。

また、図 16 および図 17 より、ペンを横に動かしながら奥行き方向を変化させる描画であると、奥行き方向に大きく誤差が存在することが分かる。これはユーザが、提案システムにおいてペンがどれくらい入り込んでおり、どこを描いているかを認知することが困難であるということが原因であると考えられる。提案システムにおいては、ペンが縮むことによる手の感覚と、視点を考慮した映像を提示することによる視覚の二つの感覚から奥行き感を提示しているが、これらの感覚のみでユーザに正しい奥行き感を与えることはまだ不十分であると考えられる。ユーザがペンをディスプレイに押し込み、ペンが縮むときに、バネの弾性力が発生し、ユーザはペンを押し込む力が必要になるため、細かい操作をすることや、ペンをディスプレイと平行な方向に対し動かすことが困難になるという問題点が考えられる。このことが曲線を描くことが困難となる原因の一つと考えられる。

6. おわりに

本稿では、タッチパネル式のディスプレイと伸縮可能なタッチペンを用いた三次元スケッチシステムを提案した。試作した提案システムを用いた被験者実験により、簡単に三次元形状を描くことが可能であることが確認できた。しかし今回提案した手法では、タッチペンのバネの弾性力によりユーザが奥行き方向にペンを操作することが困難であり、それが奥行き方向への変化を妨げていると考えられる。この問題を解決するために、タッチペンの先に圧力センサを取り付けて、ユーザによるペンの押し込み力を測定し、それに応じてペンの長さを制御することで、バネの弾性力による扱いにくさが軽減するのではないかと考えられる。

提案システムでは、伸縮可能なペンは三次元スケッチのための入力デバイスとして用いられた。今後は、このペ

ンの伸縮をユーザの押し込む力に応じて制御することで、バーチャル物体にペンを用いて触れるなどのインタラクションが可能となることが期待される。今後はこのようなデバイスを用いて、タッチペンとタブレット端末のみで、バーチャル物体の柔らかさや形状の感触を得るシステムの構築を目指す。

本研究における被験者実験は、大阪大学大学院基礎工学研究科人を対象とした研究に関する倫理委員会の承認(24-7)を得て行ったものである。

参考文献

- [1] T. Igarashi, S. Matsuoka, and H. Tanaka. Teddy: A sketching interface for 3d freedom design. *Proceeding of the 26th annual conference on Computer graphic and interactive techniques*, 1999.
- [2] T. Massie and 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.
- [3] A.D. Gregory, S.A. Ehmann, and M.C. Lin. intouch: interactive multiresolution modeling and 3d painting with a haptic interface. In *Virtual Reality, 2000. Proceedings. IEEE*, 2000.
- [4] M. Foskey, Miguel A. Otaduy, and Ming C. Lin. Art-nova: Touch-enabled 3d model design. In *Proceedings of the IEEE Virtual Reality Conference 2002, VR '02*, pp. 119–126, Washington, DC, USA, 2002.
- [5] S. Schkolne, M. Pruett, and P. Schröder. Surface drawing: creating organic 3d shapes with the hand and tangible tools. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '01*, pp. 261–268, NY, USA, 2001.
- [6] M. Hirose, K. Hirota, T. Ogi, H. Yano, N. Kakehi, M. Saito, and M. Nakashige. Hapticgear: the development of a wearable force display system for immersive projection displays. In *Virtual Reality, 2001. Proceedings. IEEE*, 2001.
- [7] S. Kamuro, K. Minamizawa, and S. Tachi. An ungrounded pen-shaped kinesthetic display: Device construction and applications. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, 2011.
- [8] Michele Fiorentino and Antonio E. Uva. The senstylus: a novel rumble-feedback pen device for cad application in virtual reality. In *In Proceedings of the 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision'2005 (WSCG, 2005*.