

# 器用さ獲得のための情報制御技術の確立

代表研究者 渡辺 哲 陽 金沢大学 理工研究域 機械工学系 准教授

## 1 はじめに

人間は誰しもが器用という訳では無い。特にモノを加工・操作する際の不器用さは大きなデメリットである。仕事の効率は低く、携われる仕事の種類が限定されてしまうこともある。モノづくりにおいて高品質のモノ製作においては、高いスキルが求められる。着物の染色の場合なら、筆で着物の上に模様を描く。この場合、精密な位置と力の制御が求められる。医療手術で行われる組織の切断や焼結などでは、周辺組織に影響が出ないようにやはり精密な位置と力の制御が術者に求められる。このような作業を行うのはいわゆる熟練技術者である。熟練となるためには長いトレーニング期間が必要なため、作業を行える人の数は限られている。トレーニングしたとしても不器用さが改善できず、熟練となり得ないことも有りえる。もし、不器用さを改善できるようなシステムがあれば、以上のようなデメリットは改善できる上、熟練技術者でなくても熟練者のような作業が可能など、様々な面で、生産効率を大幅に向上させることができる。

近年、電子情報技術の発達に伴い、モノを掴む感覚など様々な動作情報を電子データ化することが可能になるとともに、それを人間に対して提示できる環境が整いつつある（ヘッドマウントディスプレイによる視覚情報提示など）。この技術を活用すれば、ヒトへ提示する情報を制御することで、不器用さを改善できる可能性がある。そこで本研究では、まず、ヒトへ提示する情報を変えることでその器用さ（パフォーマンス）がどのように変化するのかを調査した。

現在、人間の器用さをサポートするツールの開発や、人間の器用さに関する様々な研究がおこなわれている。例えば、Dixon らは、描画者が正確に人間の顔を描くことが出来るよう、手順と補正情報を提供する“iCanDraw”というシステムを開発している[1]。Lee らは、描画の際、描画者が描こうとしているものを予想し、データベースから適切な画像を生成し、影として提示する“ShadowDraw”というシステムを開発している[2]。また、曾我らは、デッサン描画時に、描画領域に依存した情報を提示する領域情報提示システムを開発し、そのシステムを用いたデッサンが、システムを利用しないでデッサンを描いたものよりも上手く描けることを実験により確認している[3]。しかし、これらのシステムは器用さ向上の理由が明確になっていない。Koenderink らは、物の形の認識に関する研究を行っている[4]。Isenberg らは、人間とコンピュータの描画について比較を行っている[5]。Cole らは、アーティストによりかかれた線の解析と、コンピュータグラフィックにより生成された線の比較を行っている[6]。これらは、人間の認識や器用さの研究を行っているが、器用さの制御を意図したものではなく、器用さに影響を与える要因には触れられていない。そこで器用さ制御システム開発の第一段階として、提示情報と器用さの関係性、特に直線描画時の視覚提示情報（点線）と器用さ（ここでは位置の制御能力）の関係に関する調査を行った[7][8]。

## 2 研究方法

### 2-1 被験者

19歳から23歳までの右利き日本人学生10名（ $21.5 \pm 1.6$ ）を対象とした。被験者は、手、視覚、触覚に障害を持っていない。文化的差が実験結果に影響を与えることを避けるため、全て日本人被験者とした。金沢大学医学倫理委員会の承認を得た上で実験を実施した。

### 2-2 実験システム

図1に実験システムの概要を示す。被験者は、ペンタブレット（Wacom Intuos5）を用いて直線や曲線を描く。描かれたものはPC（HP ZR2040w）のモニター上に表示される。この際、提示情報を同時に表示することで、被験者の技能がどのように変化するのかを観察する。ペン先の位置及び力が計測できるようになっている。

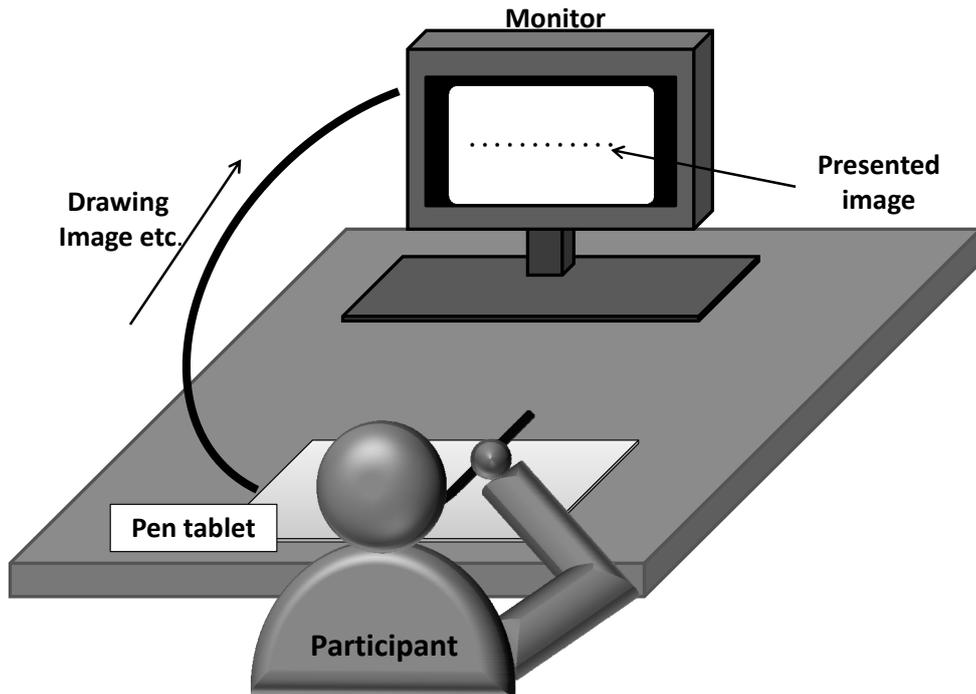


図1 実験システムの概要

### 2-3 刺激

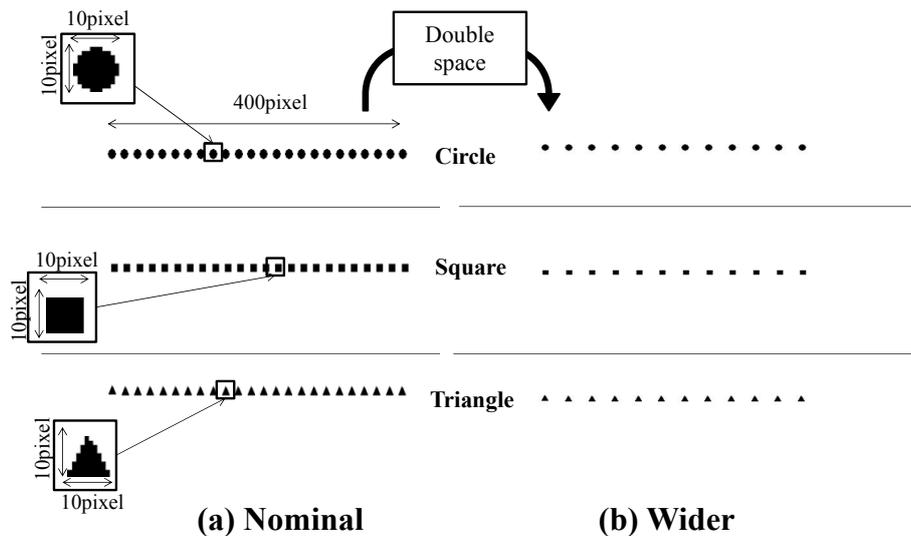


図2 提示情報

図2に器用さを変化させるために提示した視覚情報を示す。被験者は点線に沿って直線を描くように指示されている。ヒトの腕は回転関節から構成されているため、直線を描くのは、曲線より難しいと考えられる。また、日本では文字を学ぶ第一段階として、直線を描く練習を行う。これらの事案か、曲線ではなく直線を題材とした。また、文字を学ぶ際、点線で描かれた文字をなぞるという練習を日本では行う。このことから提示情報として身近な点線を用いた。点線の点の形状と点間距離を変えた合計6種類の点線を用意した。点の形状は、図形の等方性の影響を見るため、円、四角、三角を用いた。基準となる点線は、点間距離が一つの点の幅と同じとなるように設定した。広い点間距離を持つ点線は、点間距離が基準点線の二倍となるように設定した。点線は水平になるように提示した。

### 2-4 実験方法

被験者には、操作に慣れてもらうため、最初に自由にペンタブレットを使用してもらう。被験者が十分に



線を比較することで、器用さの評価を行った。線には太さがあることを踏まえ、位置制御性能を知るため、参照直線と描画直線の中心線通しを比較した(図4)。

図4に示すように、座標系を設定する。参照直線の左端点と右端点の位置を  $p_{rs}$ ,  $p_{re}$  で表す。描画直線の左端点と右端点の位置を  $p_{ds}$ ,  $p_{de}$  で表す。比較のため、下記の三種類の評価指標を設けた。

1. 参照直線と描画直線の左端点位置の差 ( $|p_{rs} - p_{ds}|$ ): 左端点はペンを最初に置く位置である。従って、ペンを置く位置制御の性能評価をこの指標により行うことができる。
2. 参照直線と描画直線の間距離: 参照(目標)直線との差をみることで、作業者の器用さを評価する。
3. 参照直線と描画直線の右端点位置の差 ( $|p_{re} - p_{de}|$ ): 右端点は終点である。従って、如何に目標どおりにペンを停止できるかを評価することができる。

参照直線と描画直線の位置ベクトルを  $p_r = [p_{rx}, p_{ry}]^T$ ,  $p_d = [p_{dx}, p_{dy}]^T$  と表記する。  $x = p_{rx}$  ( $p_{dx}$ ) における  $p_{ry}$  ( $p_{dy}$ ) を  $p_{ry}(x)$  ( $p_{dy}(x)$ ) と表記する。上記二番目の指標は以下のように計算した。図4に示すように、 $x$  軸に沿って  $x = \max(p_{rsx}, p_{dsx})$  から  $x = \min(p_{rex}, p_{dex})$  までを評価対象とした。 $x$  軸の単位は[pixels]ゆえ、各ピクセルにおいて描画直線と参照直線の差を計算した。

$$|p_{ry}(x) - p_{dy}(x)| \quad x \in [\max(p_{rsx}, p_{dsx}), \min(p_{rex}, p_{dex})] \quad (1)$$

式(1)に従って、平均差は下記のように計算できる。

$$d_m = \frac{\sum_{x=\max(p_{rsx}, p_{dsx})}^{\min(p_{rex}, p_{dex})} |p_{ry}(x) - p_{dy}(x)|}{\min(p_{rex}, p_{dex}) - \max(p_{rsx}, p_{dsx})} \quad (2)$$

また、標準偏差は下記のように計算できる。

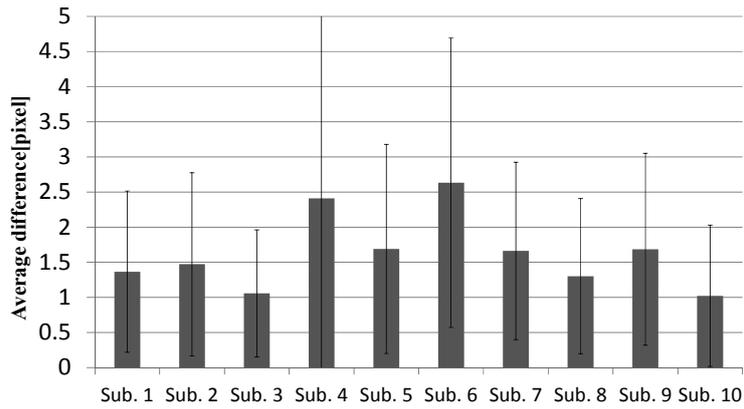
$$d_{std} = \left( \frac{\sum_{x=\max(p_{rsx}, p_{dsx})}^{\min(p_{rex}, p_{dex})} (|p_{ry}(x) - p_{dy}(x)| - d_m)^2}{\min(p_{rex}, p_{dex}) - \max(p_{rsx}, p_{dsx}) - 1} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

  
The line drawn by Sub. 3 when the displayed visual cue was ● ●

  
The line drawn by Sub. 2 when the displayed visual cue was ■ ■ ■

  
The line drawn by Sub. 4 when the displayed visual cue was ● ● ●

図5 描画曲線の例



Average difference between the reference and drawn lines (corresponding to second criterion : $d_m$ )

図6 全データに関する平均差

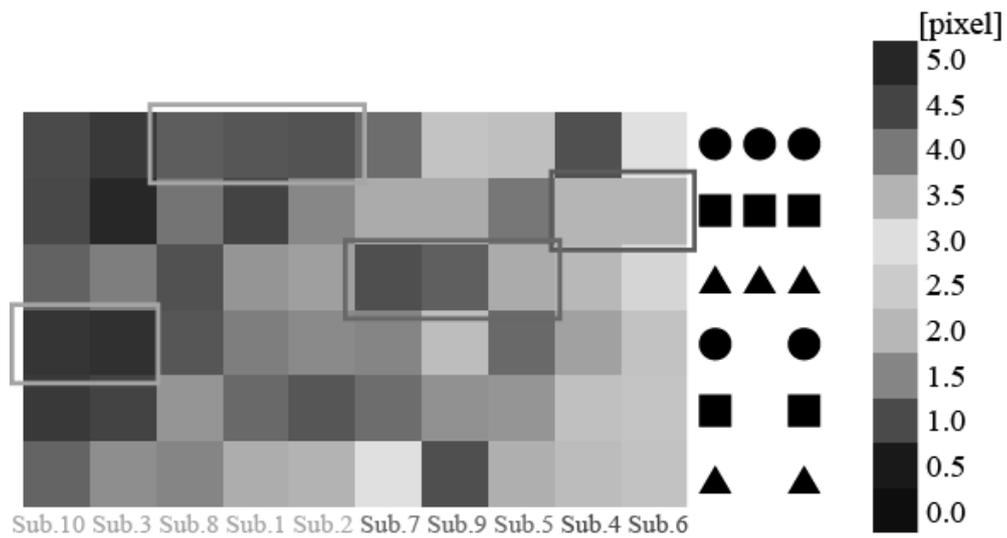


図7 各提示情報における偏差の平均

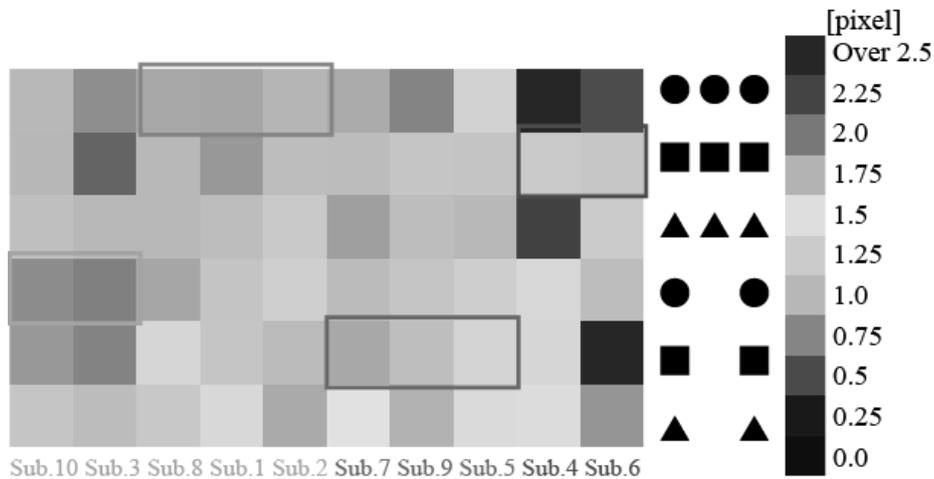


図8 各提示情報における偏差の分散

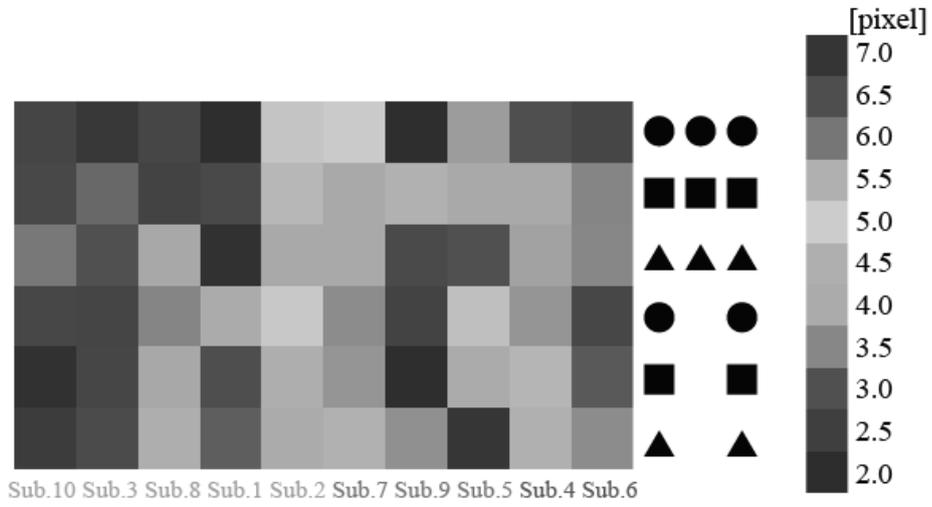


図9 参照直線と描画直線の左端点位置の差の平均

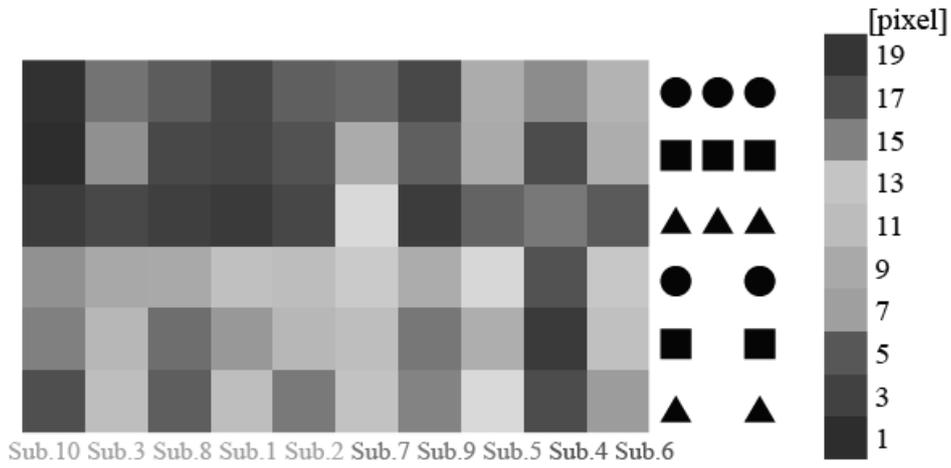


図10 参照直線と描画直線の右端点位置の差の平均

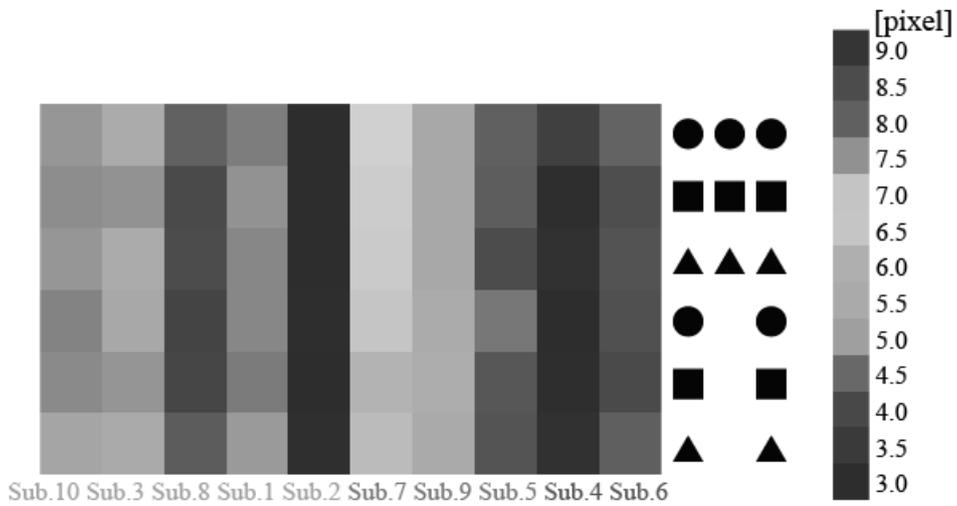


図11 参照直線と描画直線の筆圧差の平均

### 3 結果

描画結果の一例を図5に示す。技能が非常に高い、高い、低い場合の各結果である。まず、最も基本となる二番目の評価指標に関する結果を示す。提示情報の違いを気にせずに全データに関して差の平均を取った結果を図6に示す。なお、平均差で1 [pixel]の違いは、全体で400 [pixel]の違いとなることに注意されたい。この全データに関する平均差が全偏差に対応することから、これに基づいて各被験者の技能を評価する。例えば、全データに関する平均差が大きければ技能は低く、平均差が小さければ技能は高いとする。図7、図8に各被験者、各提示情報における偏差の平均と標準偏差を示す。被験者の順序は、全データに対する平均差の昇順、すなわち技能の高い順となっている。技能の大小の順に表示することで、技能毎の特性を評価することができる。図9には一つ目の評価指標である、参照直線と描画直線の左端点位置の差の平均を、図10には参照直線と描画直線の右端点位置の差の平均を示している。また、参考のため、図11には筆圧の平均に関するデータを示している。

### 4 討論

図6に示す全データに関する差の平均にK-means分類器(K=4)を適用して、被験者を4グループに分けた。技能評価に対応することから、得られた各グループは、技能が非常に高い、高い、普通、低い、に対応する。図7～11において、オレンジ、緑、紫、赤の各色がそれぞれのグループを表している。図7においては、各グループにおいて、偏差が最も小さかった（発揮した技能が最も高かった）提示情報に関する部分を四角で囲んでいる。同様に図8では、各グループにおいて、分散が最も小さかった提示情報に関する部分を四角で囲んでいる。

まず、最も技能が高かったグループ（オレンジ色）に着目する。このグループでは、● ●を提示することが偏差減少に最も効果的であったことが分かる。●●●においても比較的良い結果が生まれていることから、総合すると、●の表示が効果的であったことが分かる。つまり、幾何学的中心が分かるように提示することが効果的と考えられる。● ●を提示する方が●●●を提示するよりも良かったということは、必要以上の情報は逆に効果的でないことが分かる。

次に技能が高かったグループ（緑）に着目する。このグループでは、●●●を提示することが偏差減少に最も効果的であった。●の表示が効果的であった理由は最も技能が高かったグループと同様であるが、技能向上にはより多くの情報を提示する必要があるのがこのグループ、と考えられる。もう一つの特徴は、▲ ▲における低い技能である。幾何学的中心が分かりづらいことと、提示情報が不十分であることが原因と考えられる。

技能が普通であったグループ（紫）に着目する。▲▲▲の提示が偏差減少の観点から技能向上に最も効果的であった。分散減少の観点から言えば、■ ■の提示が効果的であった。このように観点によって最適な提示情報が異なったのは、このグループだけであった。図7から分かるように、● ●、●●●の提示においては、技能が低い。特に、●●●の提示の場合、分散も大きくなっていることから不安定になっていることが分かる。つまり、幾何学的中心をみながら直線を描画することは、このグループの被験者にとって容易でなかったと考えることが出来る。つまり、このグループの被験者は幾何学的中心をターゲットとせず、別の部分をターゲットとする方がやり易かったと考えられる。▲の場合、その底面の水平線がターゲットとなりやすいと考えられる。実際、描画直線の中心位置は紙面向かって下方向に若干ずれていた。▲の場合、水平方向の線が一辺のみで、ここから若干上向き部分の領域をターゲットとすることで、比較的良い結果が得られたのだと考えられる。■ ■を提示した場合、偏差減少の観点からは二番目に良い結果であった。この場合、■ ■は必要以上の情報の提示となったと考えられる。また、■は点でなく領域をターゲットとしてとらえることができるため、比較的良好的な結果を得ることができたのだと考えられる。

最後に、技能が低かったグループ（赤）に着目する。■ ■ ■を提示することが技能向上に最も効果的であったことが分かる。■ ■ ■は最も多くの情報を提示することとなる。このグループに対しては、点でなく領域をターゲットできるようにすることと、より多くのアシスト情報を提示することが技能向上に大事であったと考えられる。●●●では結果が良くないのにも関わらず、● ●や▲ ▲の提示が比較的良好的な結果を得ている点もおもしろい。これは点でなく領域をターゲットとしていることが影響しているのではないかと考えられる。

図9に示す左端点の差に関する結果に着目する。先に述べたように、ペンを最初に置く位置の制御性能をこの結果から見る事が出来る。技能が非常に高い、そして高いグループの被験者において良好な結果が得られている。一方で、技能が普通、低い被験者は必ずしもその技能評価結果と一致せず、被験者によっては技能が低いと判定されていても良好な結果を示している場合がある。先に述べたように、技能が高い二つのグループの被験者においては、幾何学的中心をターゲットとしていると考えられ、それがこのペンを最初に置くという位置制御においても効果的にはたらいたのではないかと考えられる。ただし、それ以外の被験者の結果を勘案すれば、必ずしもペンを置くための位置制御技能と点線に沿って直線を描く技能は一致しないと言える。

図10に示す右端点の差に関する結果に着目する。ペンを停止するための制御技能であるが、変わった結果が見て取れる。技能評価に関わらず、●●●、■●■、▲▲▲を提示することで、とても良好な結果が得られる一方で● ●、■ ■、▲ ▲を提示すると技能が低下することが分かる。つまり、停止技能を向上させるためには、情報量が多い提示情報を提示するのが最も良いということが分かる。なお、全員分のデータを総合すると、▲▲▲を提示するのが最も効果的であった。

最後に、筆圧に関して着目する。被験者に対して筆圧の情報をフィードバックしていないことに注意されたい。図11から分かるように、提示情報に関わらず、およそ一定の筆圧にて各被験者が直線を描画していることが分かる。このことは、あえて力情報をフィードバックしないことで、筆圧を一定に保たせることができるということが分かる。おそらくこれはフィードバックしないことによる精神的プレッシャーが無いことと意識的な制御調整が求められなかったことに起因すると考えられる。手術ロボットで有名な da Vinci 手術システム [9]においては力は術者にフィードバックされない。にもかかわらず、システムは非常に効果的に動く。力加減を意識的に変更することを求められないことが、適切な力発揮につながっている可能性がある。詳細は今後検討する必要がある。

## 5 まとめ

本研究では、ヒトへ提示する情報を制御することで、ヒトの技能を制御するシステムの開発を目的に、その第一段階として、直線描画時に様々な点線情報を提示することで、ヒトの技能がどのように変化するかを調査した。提示する点線に出来る限り沿って直線を描画してもらう実験を行った。提示する点線はいわゆる視覚の手掛かりとなっている。点線の形状(●, ▲, ■)と点間距離(狭い, 広い)を変化させながら直線描画してもらい、その結果を比較、評価した。評価項目は、参照(基準)直線と描画直線の左端点位置の差、参照(基準)直線と描画直線の間の距離、参照(基準)直線と描画直線の右端点位置の差である。それぞれ、ペンを自由空間上から目的位置へと置く際の位置制御性能、目標直線に可能な限り近い直線を描くための技能、目標停止点への停止性能をそれぞれ評価するものである。提示情報に関わらない全データに関する目標直線と描画直線の差に基づき、被験者を「技能が非常に高い、高い、普通、低い」の4グループに分類した。結果から、良い結果を得るために提示すべき点線は、技能に応じて変化することが分かった。つまり被験者の技能を検知し、その技能に応じて提示すべき情報を選択することで、被験者の技能を向上させることができる可能性があることが分かった。本研究結果は、手先と描画結果の表示位置が異なる場合の結果である。手先と描画結果の表示位置が一致する場合についても実験を行い、現在、解析を行っているところである。また、この結果に基づいてヒトの器用さを実際に制御できるかどうかの検証実験を現在進めているところである。今回は、提示は視覚情報のみに基づいているが、聴覚など他の感覚へ刺激する方式もとることができる。詳細な実験やその分析は今後の課題である。

## 【参考文献】

- [1] D.Dixon, M.Prasad, and T.Hammond: iCanDraw: Using Sketch Recognition and Corrective Feedback to Assist a User in Drawing Human Faces, Proceedings of the 28th international conference on Human factors in computing systems. ACM 2010, pp.897-906.
- [2] Y.J.Lee, C.L.Zitnick, and M.F.Cohen: ShadowDraw: Real-Time User Guidance for Freehand Drawing, ACM Transactions on Graphics (TOG), vol.30, no.4. ACM 2011, p.27.

- [3] 曾我真人, 松田憲幸, 瀧寛和: デッサン描画中に描画領域に依存したアドバイスを提示するデッサン学習支援環境, 人工知能学会論文誌, vol.23, no.3. 2008, pp.96-104.
- [4] J.J.Koenderink, A.J.van Droon, C.Christou, and J.S.Lappin: Shape constancy in pictorial relief, Object Representation in Computer Vision II. Springer 1996, pp.149-164.
- [5] T.Isenberg, P.Neumann, S.Carpendale, M.C.Sousa, and J.A.Jorge: Non-photorealistic rendering in context: an observational study, Proceeding of 4th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering. ACM 2006, pp.115-126.
- [6] F.Cole, A.Golovinskiy, A.Limpaecher, H.S.Barros, A.Finkelstein, T.Funkhouser, and S.Rusinkiewicz: Where do people draw lines?, ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH), vol.27, no.3, 2008.
- [7] 長崎修司, 渡辺哲陽: 直線描画時における視覚提示情報がパフォーマンスに与える影響, Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, 2A1-G07(1)-(4), 2013.
- [8] Tetsuyou Watanabe: Effect of visual cues on line drawing performance, Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics (SMC), pp. 3561-3566, 2013.
- [9] S. Jacobs and V. Fal, "Pearls and pitfalls: Lessons learned in endoscopic robotic surgery the da vinci experience," The Heart Surgery Forum, vol. 4, no. 4, pp. 307-310, 2001.

#### 〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
直線描画時における視覚提示情報がパフォーマンスに与える影響	Proceedings of the 2013 JSME Conference on Robotics and Mechatronics	2013年5月23-24日
Effect of visual cues on line drawing performance	Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics (SMC)	2013年10月13-16日
直線描画時における視覚提示によるパフォーマンス制御	計測自動制御学会S I部門講演会	2013年12月18-20日