

# ドローイング学習支援システムへの アウトライン描画段階に対する自動評価機能実装のための 定量的特徴の解析および同定アルゴリズムに関する 基礎的検討

A Basic Study on the Outline Drawing Phase Identification Algorithms and Research  
of Drawing Features for Implement of Auto Drawing Assessment Function in  
Drawing Learning Support System

浅井 雄大<sup>1</sup> 香山 瑞恵<sup>2</sup> 舘 伸幸<sup>2</sup> 永井 孝<sup>3</sup>

Yudai ASAI<sup>1</sup>, Mizue KAYAMA<sup>2</sup>, Nobuyuki TACHI<sup>2</sup>, and Takashi NAGAI<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 信州大学大学院総合理工学研究科

<sup>1</sup> Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

<sup>2</sup> 信州大学工学部

<sup>2</sup> Faculty of Engineering, Shinshu University

<sup>3</sup> ものづくり大学

<sup>3</sup> Institute of Technologists

**Abstract:** We have been building and operating a system to support a drawing learning. The purpose of this research is to add an automatic evaluation function for an outline drawing phase. In this paper, we investigate differences of drawing features between novice and expert, and consider whether the differences can be an evaluation metrics. In addition, to implement this metrics, we attempt to develop an algorithm to identify the end time of the phase.

## 1 はじめに

ドローイングとは、描画対象物(以下、モチーフ)を観察し、ストロークと呼ばれる濃淡をもつ線を用いて、その形状や質感を正確に描画することである。ドローイングは、美術教育における基礎的な技術として位置づけられ[1, 2], 美術入門者が最初に学ぶべき内容とされている[3].

永井らの先行研究[4]では、1回のドローイングを行う過程(以下、ドローイングプロセス)は8つの段階に分けられることを示している(表1参照)。このうち、1~5の段階は、用紙に対するモチーフの構図や比率、モチーフの形状を決定する段階である。以下、この段階を「アウトライン描画段階」と呼ぶ。ドローイングにおいては、モチーフの形状を正確に描画することが求められる。そのため、この段階の正しい描き方を修得することは美術入門者にとって重要である。

ドローイングを上達させるためには、学習者が自

表1: ドローイングプロセスの段階と内容

段階	内容
1	モチーフをよくみる
2	モチーフがどんな位置に置かれているかに注目する
3	画面に対してのバランスを考えながら構図を決める
4	ごく単純な形態の構成としてとらえる
5	モチーフの構造を分解的にみながら形をとらえる
6	モチーフのトーン・質感を描く
7	モチーフとそれ以外との関係を描く
8	ディテールを描く

身のドローイングプロセスや成果物を指導者に評価・指導してもらう必要がある。一般的にこのよう

な指導は、美術学校のような一対複数の授業形態で行われる。しかし、この授業形態では、指導者が学習者一人ひとりのドローイングプロセスを把握することが困難であり、評価・指導するために十分な時間を割くこともできない。

これらの問題を解決するためには、ドローイングプロセスを可視化する必要がある。また、ドローイングの定量的評価により、指導対象となるドローイングの発見および指導に十分な時間を費やすことが可能になる。そこで永井らは、ドローイング学習支援システムを構築した。このシステムでは、保存されたストロークの幾何的情報(以下、ドローイングデータ)からドローイングプロセスの確認やドローイングプロセスに対する定量的評価を行うことができる。

しかし、永井らの先行研究では、アウトライン描画段階における描き方に対する評価指標については、いまだ検討されていない。そこで本研究では、学習者と指導者のドローイングデータを解析し、アウトライン描画段階での描き方に対する定量的評価を行う仕組みを実現することを目的とする。

本稿ではまず、同段階における指導者と学習者の描き方の特徴の違いを調査し、明らかになった相違点が評価指標として利用可能かを検討する。またその評価指標をドローイング学習支援システムに実装するため、アウトライン描画段階終了時刻の同定アルゴリズムの開発を試みる。

## 2 先行研究

永井らの先行研究では、ネットワーク環境を用いた、美術入門者のためのドローイング学習支援システムを構築している。このシステムでは、筆記具としてデジタルペンを、学習プラットフォームとしてPloneで構築したLMS(Learning Management System)を利用している。デジタルペンが記録したドローイングデータをLMSに蓄積する。蓄積されたデータと図1に示したドローイングプロセスビューワを用いてドローイングプロセスを再生することができる。このビューワは、画面上部のドローイングプロセスを再生するエリアと、ドローイングプロセスを時系列解析した画面下部のグラフエリアから構成される。このビューワにより、指導者と学習者のドローイングプロセスが参照可能となる。また、各学習者のドローイングに対する定量的評価の内容を確認することができる。学習者は、これらの機能を用いて自身のドローイングと他者のドローイングとの比較、優れた描画技法の観察などを行うことも可能になる。

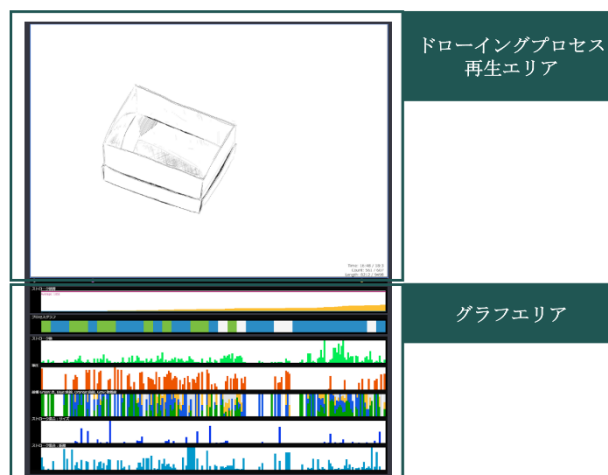


図1:ドローイングプロセスビューワ

それにより、自身のドローイングプロセスを内省することができる。

## 3 研究目的

先行研究をふまえ、本研究では、アウトライン描画段階での描き方に対する自動評価機能の実装を目的とする。この目的を達成するために、まず、同段階における指導者と学習者の描き方の違いを明らかにする。そして、その相違点が評価指標として利用可能であるかを考察する。具体的には、同段階における指導内容のうち、以下の2項目について、指導者が指導内容を意識したドローイングを行っているという仮定の下、指導者と学習者に違いがあるとして調査を行う。

- ・ストロークの本数(以下、ストローク数)を増やして描くこと。

- ・常にモチーフ全体を意識しながら描くこと。

この2つの指導内容をもとに以下の2つのResearch Question(RQ)を設定する。

RQ1:指導者のストローク数は学習者より多いか。

RQ2:ストロークが現れる位置の移動距離には、指導者と学習者の間でどのような違いがあるか。

また、RQ2までの解析で、評価指標としての利用可能性を見いだすことができたパラメータをドローイング学習支援システムに実装するためには、これらのパラメータを自動で算出する必要がある。そのためには、アウトライン描画段階終了時刻を自動で同定するアルゴリズムが必要となる。そこで、以下の2つのRQにしたがって、同定アルゴリズムの開発を行い、その実装可能性について検討する。

RQ3:全解析対象ドローイングのアウトライン描画段階終了時刻を同一時刻とする場合、個々のドロ

ーイングの終了時刻との差の総和が最も小さくなるのはどの時刻か。

RQ4:個々のドローイングの終了時刻に対する全解析対象ドローイング共通の終了時刻との誤差と、本稿で提案するアルゴリズムを適用した時刻との誤差に有意な差はあるか。

## 4 解析対象データ

### 4.1 予備解析の対象

本研究では、ドローイング学習支援システムのLMS上に蓄積された841個のドローイングプロセスデータを使用する。これらのデータは、2012-2022年までの11年間、美術専門学校でのデジタルドローイングクラスにて収集されたものである。この授業は、デジタルペンを用いて、指定されたモチーフを規定時間内に描く授業である。規定時間は20分、用紙のサイズはA3(297[mm]×420[mm])であり、対象モチーフは紙箱(前半3回)と紙袋(後半3回)である。本研究では、予備解析の対象として学習者3名(以下、学習者A、学習者B、学習者C)と、指導者1名の計4名のドローイングデータを使用する。この学習者3人は、デジタルドローイングクラス内での成長の度合いが、ほかの学習者より高いと指導者によって判断された者である。成長の度合いが高い学習者を選出した理由は、本稿で見つかった指導者と学習者の相違点が、今後成長指標として利用できるかを検討する可能性があるためである。また、この学習者3人は、すべてのドローイングにおいてアウトライン描画段階終了時刻(後述)を定義することができ、かつ、熟練度が多様な描画者である。

### 4.2 アウトライン描画段階終了時刻の定義

本研究では、各ドローイングデータのうち、アウトライン描画段階の区間データに対して解析を行う。そのため、同段階とそのあとに続く段階を区切る時刻を定義する必要がある。そこで本研究ではこの時刻を、「1番最初のハッチングが描かれる時刻の前で、1番最後に引かれたストロークが記録された瞬間」と定義する。ハッチングとは、モチーフの明暗や質感を描画するために引かれる平行線の集合体である。なお、この時刻の推定結果は美術専門家へのヒアリングにもとづいている。以下、0[s]から表2、3に示した時刻までを、各ドローイングのアウトライン描画段階として解析を行う。また、ドローイング終了時点での成果物とアウトライン描画段階終了時点での成果物の例をそれぞれ図2、3に示す。

表2:アウトライン描画段階の推定終了時刻(紙箱)[s]

	1回目	2回目	3回目
学習者A	40	322	394
学習者B	695	70	243
学習者C	99	142	142
指導者	209	150	197

表3:アウトライン描画段階の推定終了時刻(紙袋)[s]

	1回目	2回目	3回目
学習者A	274	152	148
学習者B	386	311	159
学習者C	155	110	-
指導者	279	-	-

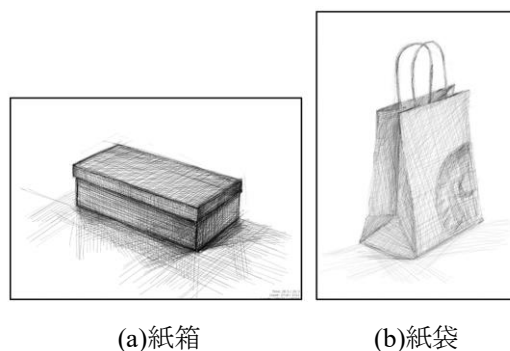


図2:ドローイング終了時点での成果物の例

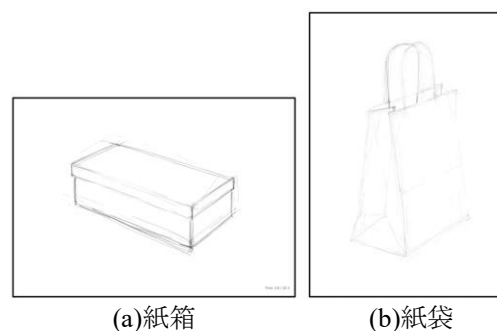


図3:アウトライン描画段階終了時点での成果物の例

## 5 RQ1:ストローク数

RQ1では、学習者と指導者のアウトライン描画段階のストローク数を比較する。

### 5.1 予備解析の結果と考察

まず、紙箱モチーフにおける指導者のストローク数の平均値は369[本]であった。紙袋モチーフにおい

表 4: 予備解析におけるストローク数(紙箱)[本]

	1 回目	2 回目	3 回目
学習者 A	13	178	195
学習者 B	313	64	127
学習者 C	171	269	264
指導者	525	302	280

表 5: 予備解析におけるストローク数(紙袋)[本]

	1 回目	2 回目	3 回目
学習者 A	137	74	138
学習者 B	347	334	192
学習者 C	311	188	-
指導者	541	-	-

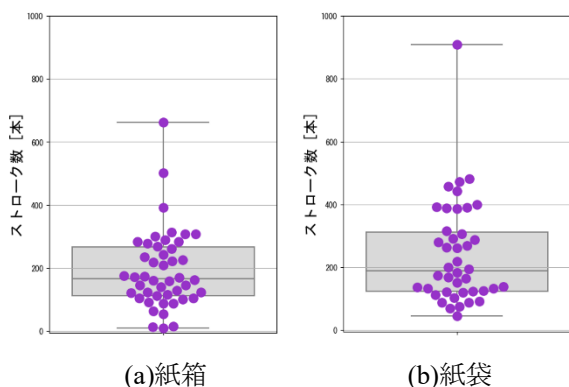


図 4: 追加解析におけるストローク数[本]

では、ストローク数が 541[本]であることがわかった。

また、表 4 より、学習者 B の紙箱 1 回目のドローイング(313[本])以外で、指導者のストローク数平均値が学習者より多いことがわかる。紙袋モチーフにおいては、指導者のほうが学習者の全ドローイングよりもストローク数が多いことが確認できた(表 5)。

## 5.2 追加解析の結果と考察

追加解析では、予備解析での傾向が 2015 年度の学習者 25 名にもみられるのかを確認する。本年度の学習者を選んだ理由は、学習者のドローイング能力のレベルが他年度より広範囲にわたっているためである。予備解析と同様の手法を、より広範囲のレベルの学習者に適用し、予備解析と同様の傾向がみられるかを確認する。また、今回は、アウトライン描画段階がみられない学習者については解析対象外とする。

追加解析の結果を図 4 に示す。図 4 では、それぞれの点が各学習者のドローイングにおけるストローク数を表している。予備解析と合わせて、105 個の学習者のドローイングのうち、101 個のドローイン

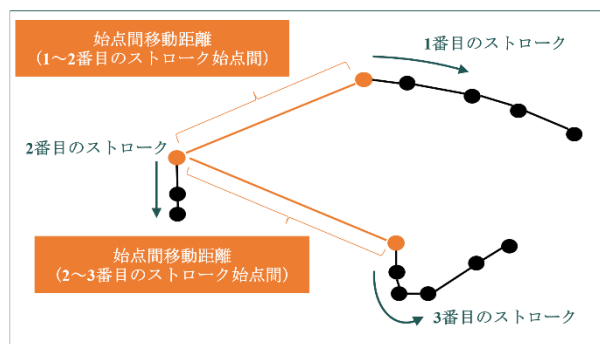


図 5: 始点間移動距離の概念図

グにおいてアウトライン描画段階におけるストローク数が指導者より少ないという結果となった。

この結果から、今回の解析対象においては、ストローク数を増やすように意識できていない学習者が比較的多いことがわかる。よって、アウトライン描画段階におけるストローク数は、学習者より指導者のほうが多いといえる。

## 6 RQ2: ストロークの移動距離

アウトライン描画段階では、常にモチーフの全体像を意識して描くように指導される。ドローイングでは、観察した箇所を描画し、再び観察を行うという手順を繰り返す。そのため、常にモチーフの全体像を観察しながら描くと、ストロークが常に全体的に現れると考えた。そこで RQ2 では、ストロークが現れる位置に着目して解析を行う。

### 6.1 始点間移動距離

ストロークを構成する座標群のうち、最初に計測された点をストローク始点とする。この点は、描画者が観察していた位置を反映する重要な点であると考えられる。よって、以下ではストロークの位置の代表値としてストローク始点を用いる。

また、図 5 に示すように、あるストロークの始点と、次に引かれるストロークの始点の距離(以下、始点間移動距離)を求める。学習者と指導者のドローイングに含まれるすべてのストローク間で始点間移動距離を求め、それらの合計値を比較する。その合計値が大きくなるということは、ストロークの移動が全体的に行われていることを示すのではないかと考えた。逆に、その値が小さければ局所的な描画をしていると考えられる。

### 6.2 予備解析の結果

まず、紙箱モチーフにおける指導者の始点間移動距離の合計値の平均値は 17186[mm]であった。紙袋

表 6:始点間移動距離の合計値(紙箱)[mm]

	1 回目	2 回目	3 回目
学習者 A	858	11372	13010
学習者 B	4272	2278	3854
学習者 C	5707	9293	10711
指導者	24120	13578	13860

表 7:始点間移動距離の合計値(紙袋)[mm]

	1 回目	2 回目	3 回目
学習者 A	8779	4493	5606
学習者 B	5702	6408	8887
学習者 C	9338	7853	-
指導者	21735	-	-

モチーフでは、始点間移動距離の合計値は 21735[mm]であることがわかった。

また、表 6 に示すように、紙箱モチーフにおいては、指導者のすべてのドローイングにおいて平均値が学習者より大きいことが確認できた。紙袋モチーフにおいても、指導者のほうが学習者の全ドローイングよりも始点間移動距離の合計値が大きいことが確認できた(表 7)。

### 6.3 予備解析の考察

#### 6.3.1 解析結果をうけて

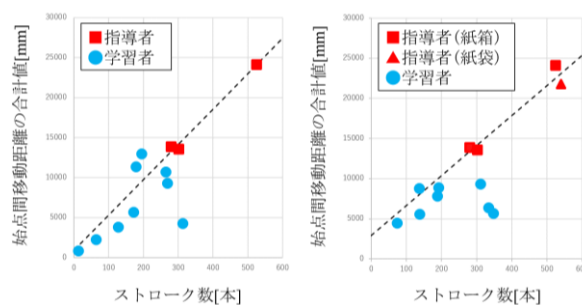
このような結果が得られたのは、指導者が常に画用紙を全体的に見てドローイングを行っており、ペンの移動量が大きいためであると考えられる。また、指導者と各学習者間での始点間移動距離の合計値の大小関係にはストローク数の大小関係と似た傾向がみられた。

#### 6.3.2 ストローク数との相関

次に、始点間移動距離の合計値とストローク数の関係を確認した。その結果、紙箱と紙袋の場合の相関係数はそれぞれ 0.84 と 0.75 となり、いずれも強い相関を示した。ストローク数が増加すると、必然的にストローク始点の数も増加するため、始点間移動距離もおのずと増加すると考えられる。

#### 6.3.3 線形回帰

紙箱を対象としたドローイングにおいて、ストローク数と始点間移動距離の合計値の散布図上に、指導者の点のみから回帰直線を破線で描いたものが図 6(a)である。この回帰直線の関係式の導出には、最小二乗法を用いた。この図において、回帰直線から最も外れている点(学習者 B の紙箱ドローイング 1 回目)に着目する。このドローイングのドローイングプロセスを確認すると、短いストロークをつなげてモチーフの形状を描画している様子がみられた。美



(a)紙箱

(b)紙袋

図 6:ストローク数と始点間移動距離の合計値の関係 ((a)紙箱と(b)紙袋。■と▲は指導者。)



(a)成果物

(b)ストローク始点

図 7:局所的な描画をしている指導対象ドローイング

術専門家によると、これは局所的な描画をしているという理由で指導対象となるドローイング(図 7 参照)である。また、図 6(b)においても、局所的な描画をしているドローイング(学習者 B の 1, 2 回目)は、回帰直線から最も離れている点と、2 番目に離れている点に対応することが確認された。

このように、局所的な描画をしているドローイングにおいては、ストローク数が指導者を上回っていても、始点間移動距離の合計値が指導者より小さいという違いがあることがわかる。このことから、ストローク数に対して始点間移動距離の合計値が極端に小さいドローイングを参照することで、局所的な描画をしているドローイングを自動的に検出できるようになると考える。それにより、指導者はモチーフ全体を意識できていない指導対象となるドローイングをより容易に発見できるようになると考えられる。また、散布図と回帰直線を用いて指導者に提示することで、学習者の値が指導者の値からどれだけ離れているかを視覚的にわかりやすく表すことができると思われる。

## 7 アウトライン描画段階終了時刻の同定

前節までの解析で、ストローク数や始点間移動距



離の合計値といったパラメータが評価指標として利用できうることを示した。しかし、これらのパラメータをドローイング学習支援システムで算出するためには、アウトライン描画段階終了時刻を自動的に推定する機能が必要である。そこで、本節からは、この終了時刻を同定するアルゴリズムの開発を試みる。なお、4.2節で推定した時刻を、各ドローイングのアウトライン描画段階終了時刻の正解データ(以下、正解時刻)とする。

## 7.1 RQ3:共通の時刻による同定

### 7.1.1 手法

まず、アウトライン描画段階終了時刻を、解析者が設定した共通の時刻(共通時刻)で同定することができるかを検証する。ここでは、正解時刻におけるストローク数と共通時刻におけるストローク数の分布を比較する。なお、今回の解析対象ドローイングにおける正解時刻の最大値は 695[s]であった。そのため、共通時刻を 0~695[s]の間で 1[s]ずつ変化させ、共通時刻と正解時刻におけるストローク数の分布の 2 群に対して検定を行う。

正解時刻におけるストローク数の分布には正規性がない。また、各群は同一の描画者で構成される。そのため、検定手法として、対応のあるノンパラメトリック検定であるウィルコクソンの符号順位和検定を用いる( $p=0.05$ )。

### 7.1.2 結果と考察

正解時刻におけるストローク数の分布に有意差が見られなかったのは、共通時刻を 155~191[s]とした場合の分布であった。また、各描画者のストローク数の平均絶対誤差(以下、MAE)の最小となったのは、共通時刻を 168[s]に設定した場合であった。

この結果より、168[s]を共通時刻とした場合に、最も正確な同定ができることがわかる。しかし、描画者個人でみると、ストローク数の MAE が 119[本]と、大きくなってしまった。

## 7.2 RQ4:提案アルゴリズムによる同定

ここでは、アウトライン描画段階終了時刻の同定をより正確に行うために、ドローイングデータを用いた同定アルゴリズムの開発を試みる。4.2節で示した定義より、アウトライン描画段階終了直後にハッチングが描画される。したがって、最初に描かれるハッチングを検出することができれば、アウトライン描画段階終了時刻を同定することができると考えた。

### 7.1.1 使用するパラメータ

今回は、ハッチングを描く際の指導内容に基づき、使用するパラメータを選定する。指導内容は次の 2

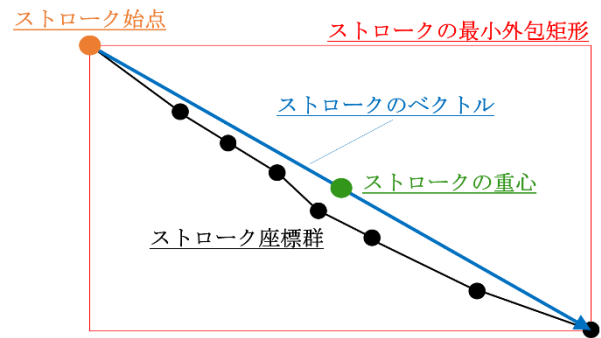


図 8:使用するパラメータの概念図

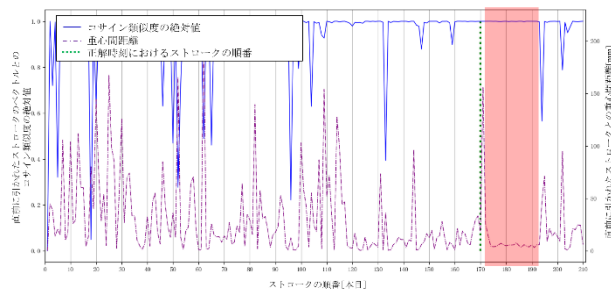


図 9:ストロークどうしのコサイン類似度と重心間距離の時系列変化

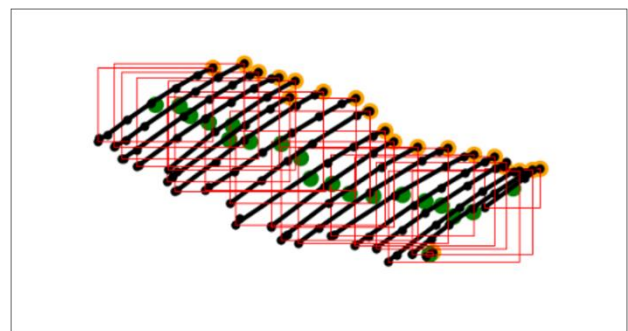


図 10:ハッチングとみられるストローク群

項目である。

- ・複数の直線を平行に描く
- ・直線どうしの間隔を狭めて描く

なお、本アルゴリズムの開発にあたり、各描画者が上記の指導内容を意識してドローイングを行っているとは仮定する。これらの指導内容に対応するパラメータは次のとおりである。

- ・直前に引かれたストロークのベクトルとのコサイン類似度の絶対値
- ・直前に引かれたストロークとの重心間距離

ストロークのベクトルは、ストロークの最小外包矩形のうち、ストローク始点に最も近い頂点から対角に位置する頂点までのベクトルとする。また、ストロークの重心は、最小外包矩形における対角線の中

点とする(図 8 参照).

### 7.1.2 各パラメータの時系列変化

次に、各パラメータの時系列変化を確認した。すると、図 9 の赤色で示した領域のように、正解時刻直後で、連続して、ストロークどうしのコサイン類似度の絶対値がある値を上回り、同時に、重心間距離がある値を下回る区間が存在することが確認された(図 10 参照)。この区間に含まれるストロークを見ると、平行かつ、短い間隔でストロークが引かれていた。すなわち、この区間ではハッチングが行われていることがわかった。以下では、別の描画者がハッチングを行う際にも、上記のような時系列変化がみられると仮定する。そして、各パラメータの適切な閾値を探索する。

### 7.1.3 閾値の設定

ここでは、正解時刻におけるストローク数との MAE が最も小さくなるような閾値候補を組み合わせる。対象は、4.1 節で示した学習者 A, B, C と指導者 1 名が描いたドローイングである。

その結果、最適なアルゴリズムを、「直前に引かれたストロークのベクトルとのコサイン類似度の絶対値の下限を 0.9 に、直前に引かれたストロークの重心どうしの距離の上限を 7[mm] に設定し、7[本]以上連続でそれらの閾値を超えた場合に、そのストローク群をハッチングとみなし、そのストローク群の直前にストロークが引かれた時刻をアウトライン描画段階終了時刻(以下、推論時刻)とする」とした。

### 7.1.4 新規データへの適用結果と考察

7.1.3 節で定義したアルゴリズムを、7.1.2 節で示した 4 名の描画者と 2015 年度の学習者 25 名のドローイング、合計 109 個に適用した。ここでは、7.1 節で最適とした共通時刻(168[s])と推論時刻におけるストローク数の誤差の分布を比較する。また、共通時刻と推論時刻それぞれにおいて、正解時刻との誤差の分布を求め、比較を行う。検定手法には、ウィルコクソンの符号順位和検定を用いる( $p=0.05$ )。

ストローク数誤差の分布を図 11 に示す。検定の結果、推論時刻におけるストローク数の誤差の方が、共通時刻における誤差よりも有意に小さいことがわかった( $p=0.01$ )。また、推論時刻における誤差の MAE は 92[本]であり、共通時刻における誤差の MAE(119[本])よりも小さいことがわかった。

また、図 12 に終了時刻誤差の分布を示す。検定の結果、正解時刻に対する推論時刻との誤差の方が、共通時刻との誤差よりも有意に小さい結果となった( $p=0.02$ )。そして、正解時刻に対する、推論時刻との誤差の MAE は 66[s]であり、共通時刻との誤差の MAE (82[s])よりも小さくなった。

これらの結果より、提案アルゴリズムによる同定

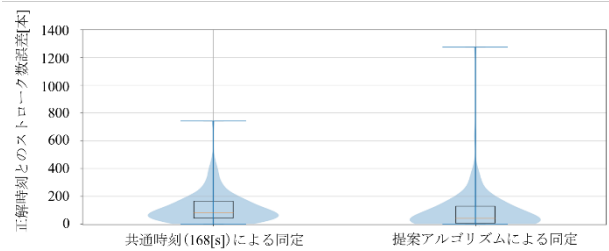


図 11:ストローク数誤差の分布

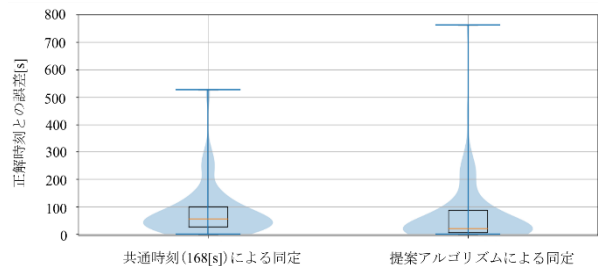


図 12:終了時刻誤差の分布

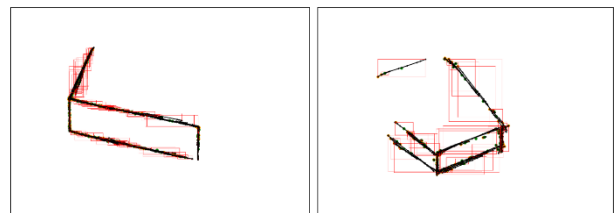


図 13:正しく推論できなかったドローイング

の方が、共通時刻による同定よりも精度がよいことがわかる。しかし、複数のドローイングにおいて、正解時刻よりも極端に早い時刻を推論時刻としてしまう現象が確認された。これらのドローイングの描画過程を見ると、図 13 のように、描画者は、短く、かつ同じ方向のストロークをつなげてアウトラインを描いていた。よって、そのようなストロークをハッチングとして誤検出してしまったと考えられる。

## 8 おわりに

本研究の目的は、ドローイングにおけるアウトライン描画段階に対する自動評価機能の実装である。そのために本稿ではまず、アウトライン描画段階における指導者と学習者の描画特徴の違いについて解析し、評価指標として利用可能かを考察した。また、利用可能性のあるパラメータによる評価を学習支援システムに実装するため、アウトライン描画段階終了時刻の同定アルゴリズムの開発を行った。

その結果、ストローク数や始点間移動距離の合計

値といったパラメータについて、学習者と指導者の間で差があることが確認できた。また、アウトライン描画段階終了時刻の同定について、提案アルゴリズムの方が共通時刻による同定よりも高い精度を示した。しかし、正解時刻と推論時刻の誤差が極端に大きい描画者も存在したため、ドローイング学習支援システムに適用するには、より精度の高い同定アルゴリズムが必要であると思われる。

今後は、データ数を増やして今回と同様の解析を行い、今回明らかになった学習者と指導者の相違点が有意であるかを検証する。また、提案アルゴリズムに対して、ストローク自体の向きとストローク重心が移動する向きの類似度などのパラメータを追加するなどして、改良を行っていく。

## 謝辞

遠隔ドローイング学習支援システムを 2012 年より導入およびドローイングプロセスデータの収集にご協力いただいている日本外国語専門学校留学科海外芸術大学留学コースの教員と学生、関係者の皆様に感謝申し上げます。本研究の一部は科研費(23K17015)により支援されています。

## 参考文献

- [1] 佐藤聖徳. 美術・デザイン系大学におけるデッサン指導の発展的試み. 静岡文化芸術大学研究紀要, Vol. 4, pp. 153–162, 2004.
- [2] 岩田弥富. 造形的修練としての素描論. 芸術選書, No. 7. 芸大出版会, 1971.
- [3] 関根英二. 美術体系の試み. 美術教育学会大学美術教科教育研究会報告, Vol. 6, pp. 89–100, 1984.
- [4] 永井孝, 崎本貴之, 香山瑞恵. 美術入門者に対するドローイングプロセスモデルによる学習支援ツールの検討. 人工知能学会第二種研究会資料, Vol.2017, No.23, pp.10–14, 2017.