

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

連結図における重み付きグラフの
エッジ表現に関する研究

小林愛実

修士（工学）

（コンピュータサイエンス専攻）

指導教員 三末和男

2014年 3月

概要

グラフ構造を直感的に示すことができる連結図の表現は、グラフの可視化によく用いられる。特に本研究では、各エッジが 1 つずつ重みを持つ、重み付きグラフに焦点を合わせた。連結図の中で、重みはエッジ（線）に「太さ」や「濃淡」といった視覚変数を割り当て、表現されることが多い。ここで、「長さ」が効果的な視覚変数であることはよく知られている。そのため、閲覧者が重み付きグラフを見る際に、エッジの長さから無視できない影響を受ける可能性がある。しかし、2次元平面または3次元空間上の連結図において、我々はエッジの長さを制御することができない。また、読み取られるエッジの重みはグラフが表現している意味にも影響される。

以上の点を踏まえ本研究では、重み付きグラフを連結図で表現するためのガイドラインを開発することを目的とし、2つの実験を実施した。1つ目の実験では、意図的にエッジ長を制御した連結図を用い、視覚変数が持つ効果について計測した。2つ目の実験では、一般的な連結図を想定し、長さの影響を受ける場合の各視覚変数の効果について調べた。

実験結果の分析では、エッジ表現と、長さの関係を基に分類したグラフの意味に着目し、分析結果を基にガイドラインを作成した。このガイドラインには、視覚変数とグラフの意味を基に任意の重みを表現可能なエッジ表現を導出する式が含まれている。この式は、エッジの長さで表現したい重みを基に、エッジの太さ（明度）を決定する。表現したいグラフの全てのエッジに対してこの式を適用することで、閲覧者の読み取り誤差を小さく表現可能な連結図を描くことができる。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	重み付きグラフとは	1
1.2	連結図 (Node-link Diagram) とは	1
1.3	連結図による重み付きグラフの可視化	1
1.4	研究の目的	2
1.5	本論文の構成	2
第2章	関連研究	3
2.1	視覚変数	3
2.2	重み付きグラフの可視化手法	3
2.3	グラフ可視化に関する評価研究	4
第3章	エッジ表現とグラフの意味	6
3.1	実験の概要	6
3.2	エッジ表現	6
3.3	グラフの意味	7
第4章	実験1	8
4.1	実験の目的	8
4.2	実験の設計	8
4.2.1	エッジ表現	8
4.2.2	グラフの意味	9
4.2.3	グラフィレイアウト	9
4.2.4	実験タスク	10
4.2.5	タスクの実施回数	11
4.2.6	実験ツール	12
4.2.7	実験環境	13
4.3	実験の流れ	14
4.4	被験者	14
4.5	実験結果	14
4.6	考察	17
4.6.1	エッジが長いほど重みも大きいグラフ	17
4.6.2	エッジが短いほど重みは大きいグラフ	18
4.6.3	長さ結びつけづらいグラフ	18
第5章	実験2	19
5.1	実験の目的	19
5.2	実験の設計	19
5.2.1	エッジ表現	19
5.2.2	グラフの意味	20
5.2.3	グラフィレイアウト	20
5.2.4	実験タスク	20
5.2.5	タスクの実施回数	21

5.2.6	実験ツール	22
5.2.7	実験環境	22
5.3	実験の流れ	22
5.4	被験者	22
5.5	実験結果	22
5.6	考察	27
5.6.1	エッジが長いほど重みも大きいグラフ	27
5.6.2	エッジが短いほど重みは大きいグラフ	27
5.6.3	長さとは結びつけづらいグラフ	28
第6章	議論	29
6.1	視覚変数を決めるためのガイドライン	29
6.2	長さの違いによる影響	30
6.3	重みの読み取り精度	30
第7章	まとめ	32
	謝辞	33
	参考文献	34
付録A	実験に用いた誓約書, 実験手順書およびアンケート	37
付録B	実験1の結果を表す散布図	44
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (長さの表現)	44
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (太さの表現)	45
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (明度の表現)	46
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (長さの表現)	47
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (太さの表現)	49
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (明度の表現)	50
	長さとは結びつけづらいグラフ (長さの表現)	51
	長さとは結びつけづらいグラフ (太さの表現)	52
	長さとは結びつけづらいグラフ (明度の表現)	53
付録C	実験2の結果を表す散布図	54
	表現に関する情報を与える場合	54
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (太さの表現)	54
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (明度の表現)	57
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (太さの表現)	60
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (明度の表現)	63
	長さとは結びつけづらいグラフ (太さの表現)	66
	長さとは結びつけづらいグラフ (明度の表現)	69
	表現に関する情報を与えない場合	72
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (太さの表現)	72
	エッジが長いほど重みも大きいグラフ (明度の表現)	75
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (太さの表現)	78
	エッジが短いほど重みは大きいグラフ (明度の表現)	81
	長さとは結びつけづらいグラフ (太さの表現)	84
	長さとは結びつけづらいグラフ (明度の表現)	87

図目次

図 1.1 連結図によるグラフの可視化例	1
図 1.2 重み付きグラフの連結図による表現の例	2
図 4.1 使用したエッジ表現 (視覚変数)	8
図 4.2 ランダムレイアウト	9
図 4.3 グラフ描画例	11
図 4.4 実験ツール	13
図 5.1 使用する表現の比較	19
図 5.2 グラフ描画例	21

第1章 はじめに

本章では，研究に関する語句の導入，背景や目的及び貢献について述べる．また，本論文の構成についても紹介する．

1.1 重み付きグラフとは

本論文では，重み付きグラフを対象にした，描画のためのガイドラインについて述べる．グラフとは要素同士の連結関係を表す構造のことであり，各要素をノード，要素同士の連結関係をエッジと呼ぶ．また，グラフの中にはエッジやノードが重みをもつものもある．特に本研究では，エッジが重みを持つグラフに着目した．エッジが持つ重みは，ノード間の連結の強さを表す．例えば，ノードが人，エッジが友好関係を表すグラフでは，人同士の親密度の高さが重みに該当する．なお，本論文中で使用する「重み付きグラフ」はエッジが重みを持つグラフのことを指すものとする．

1.2 連結図（Node-link Diagram）とは

連結図はグラフ構造を直感的に表現することができるため，グラフの可視化に広く用いられる．この手法は点と線を用いた表現手法であり，グラフが持つノードを点，エッジを線として描く．1.1 で述べた人間関係を表すグラフを連結図として表現したものが図 1.1 である．ノードである人は点（丸）として描かれ，エッジである人同士の繋がりは線として表現されている．

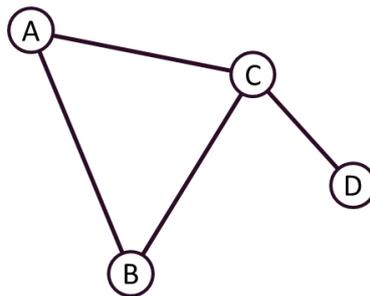


図 1.1 連結図によるグラフの可視化例

1.3 連結図による重み付きグラフの可視化

先に述べたとおり，連結図においてエッジは線分で表現される．線分とともに量の表現に利用できる視覚変数には大きさ（長さ，太さ）や色（明度）などがある．実際，図 1.2 に示すように，多くの連結図でこれらの視覚変数が使用され，重みを表現している．

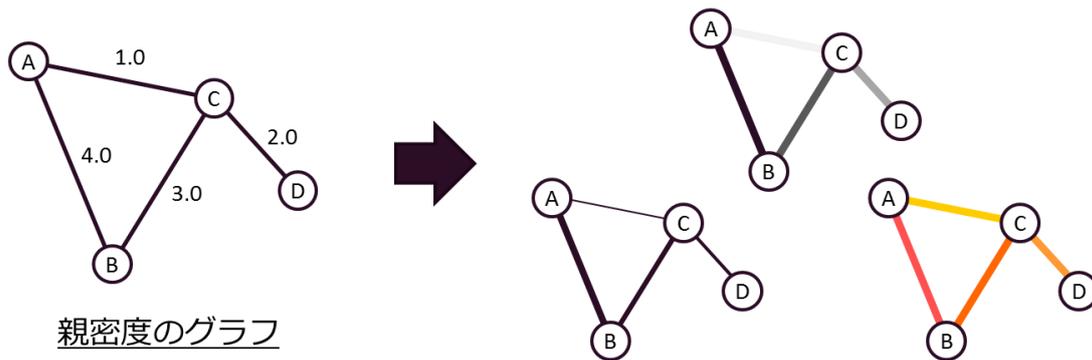


図 1.2 重み付きグラフの連結図による表現の例

重み付きグラフを表現する連結図は数多く存在する.しかし,重みの読み取り精度の点で,視覚変数の利用が十分に検討されているとは言えない.また,連結図はその性質から,リンク(エッジ)への視覚変数の利用に制限がある.というのも,連結図は2次元平面上(あるいは3次元空間内)に埋め込まれるため,リンクの長さを自由に決めることができない.つまり,長さは量を比較的正確に表現可能な視覚変数として知られているが,リンクの長さで重みを表現することは困難である.さらに,他の視覚変数で重みを表現しようとしても,リンクの長さが値の読み取りに影響を与える可能性があり,単純に付加して良いとも限らない.

1.4 研究の目的

上述の問題に対して,本研究では重み付きグラフにおけるエッジの視覚的表現法を開発する.具体的には,長さが自由に制御できない状況において,表現したい重みに対する,他の視覚変数(太さや明度)の決定の仕方を定式化することを目指す.この表現法を様々なグラフ構造に適用させることで,従来の表現では発見が困難であった特徴を容易に,かつ正しく表現できるものと期待している.

1.5 本論文の構成

以下,第2章では,関連研究を紹介する.続いて第3章で被験者実験を行うにあたって,連結図を用いた重み付きグラフの表現について整理する.その後,様々な視覚変数を単独で用いた場合の重みの読み取られ方を調べた実験について第4章で述べる.第5章では,長さ和其他の視覚変数を組み合わせた場合についての実験について記述する.これら2つの実験結果を踏まえ,重み付きグラフを連結図として描画するためのガイドラインについて第6章でまとめる.

第2章 関連研究

本章では、重み付きグラフの表現とその設計に関する研究を以下の3種類に整理し、それぞれの研究について述べる。

- 値を視覚的に表現可能な要素に関する研究
- 重み付きグラフを視覚的に表現するための手法
- 連結図に焦点を合わせた被験者実験から得た知見をまとめた研究

2.1 視覚変数

本研究で扱うエッジは、視覚的には線であり、太さや明度などの表現を付加することにより、重みを表現する。太さや明度のように値を表現可能な視覚的要素は、Bertinによってまとめられ、視覚変数と呼ばれている[1]。特に量的データの表現には位置、大きさ、明度の視覚変数が有効であると述べており、本研究でもこれらの視覚変数に着目した。Mackinlayは、各視覚変数による量的データの表現の精度について述べている[2]。視覚変数の中で、位置の精度が最も高く、次いで長さが優れている。そして、複数ある視覚変数の中では、色と明度の精度が最も低い。また、不確実性を視覚的に表す要素として Sketchiness が提唱されている。Sketchiness は、手で線を描いたような線のブレ具合による表現である。Boukhelifaらは、Sketchiness の読み取り精度について被験者実験を行い、段階的に不確実性を表現することが可能であると示した[3]。Woodらは、Sketchiness の表現を Processing 用のライブラリとして提供している[4]。加えて、視覚変数は静的なものだけに留まらず、アニメーションに着目した研究もなされている。Harozらは、色相とアニメーションについての比較実験を行い、それぞれの制限についてまとめた[5]。

以上のように値を視覚的に表現可能な要素については多くの研究がなされてきている。しかしこれらは、要素1つ1つに着目した研究であり、複数の要素を組み合わせた場合についての言及はなされていない。また、連結図の中では、エッジ同士が重なり合うといった状況が想定される。本研究では、連結図という特殊な環境下でも既存研究と同様の傾向が見られるのかを調査していく。

2.2 重み付きグラフの可視化手法

重み付きグラフを視覚的に表現する際、連結図が行列表現が用いられる。特に、本研究で扱う連結図による表現は、グラフ構造を直感的に示すことができるため、多く使用されている。連結図を使用する場合、エッジが持つ重みはエッジの長さに対応付けされたり[6]、エッジの太さや色などで表現されたりする[7]。つまり、エッジに付加可能な視覚変数を使用してエッジの重みを表現している。一方、行列表現では、行列上のセルを塗りつぶす色やセル内に描かれるグリフにより重みが表現される[8]ことが一般的である。

また、重み付きグラフは様々な分野に存在し、その分野に特化した可視化技術が開発されてきた。例えば、モノの流れに焦点を合わせた可視化は古くから行われており、1965年には

ワインの輸出量を表した地図 (Minard's map of French wine exports for 1864) が発表された[9]. [10] Tobler らは, つながりのある地点間を矢印で結び, 矢印の向きでもの流れる向きを, 矢印の大きさで移動量を表現する手法により流れを可視化した[10]. Phan らは, 階層的クラスタリングの考え方を導入することで, エッジ交差を最小にし, 相対位置はある程度維持しながら描画を決定していく表現手法を開発した[11]. Verbeek らは, スパイラルツリーをベースとした手法を開発した[12]. この手法は, ターゲットのクラスタリングや線の集約を自然にすると共に, 地図上の特徴や境界線を邪魔しないという特徴を持つ. 共著関係を扱った可視化手法も研究されている. Ke らは, 連結図を用いて ACM Library に登録されている著者や論文, トピックスの関係を可視化した[13]. Huang らは, 円を複数の領域に分割し面積で量を表す InterRing という手法を開発し, Ke らと同じデータに適用させた[14]. 脳内ネットワークに焦点を合わせた研究分野では, Gerhard らは脳内の接続関係を 3 次元空間上に描画するツールキットを開発した[15]. Achard らは, 多次元尺度構成法または力指向アルゴリズムを用い, 2 次元の連結図として脳内ネットワークを可視化した[16]. Hagmann らは, 3 次元の連結図と行列表現を組み合わせた可視化手法を開発した[17]. また, エッジで 1 つの重みを表現するだけでなく, 複数の重み付きエッジを比較するための手法も開発されている[18].

Wattenberg によって開発された Arc Diagrams[19]は, テキストデータの繰り返しパターンを可視化するための表現手法である. 横一列に並べられた文字列内の, 繰り返し現れるパターン同士を曲線で繋ぐことにより, 特徴の発見を支援している. この手法を拡張した表現の中には, 重み付きグラフの可視化に焦点を合わせたものも多く存在する. Chen らは, 一般的な文章で使用される単語同士の関係を可視化し, 分析を行った[20]. その中で, 可視化のためのツールを開発し, インタラクティブなフィルタリングの機能を実現した. Weaver らは, 2 つのホテルに宿泊した客の来訪パターンを調べる研究の中で, データを可視化するツールを開発し, Arc Diagrams の表現を取り入れている[21]. Nagel らは, エッジ同士の重なりに着目し, これを解決する Arc Diagrams を開発した[22]. 以上の表現は何れも, 曲線の太さをエッジの重みに対応させることで重み付きグラフを表現している.

その他にも, エッジが持つ視覚変数を用いて量を表現した手法がある. Wattenberg は矢印の太さで量を表す表現を開発した[23]. また, Krzywinski らは, 円の内側に配置されるリボンの太さを変化させることで, 量の違いを表現した[24].

本研究で対象としている連結図を用いた表現手法の多くは, エッジに太さや明度, 色といった表現を付加することにより重みを表現している. しかし, どの表現をどのような変化率で与えるかは様々であり, 体系化されていない.

2.3 グラフ可視化に関する評価研究

グラフ構造の可視化手法に関する評価研究も数多く行われている. グラフ構造の可視化手法は 2 種類に大分されるが, それぞれの特徴について Ghoniem らはまとめた[25]. その中で, 本研究で対象としている連結図はパスの探索に優れ, 特に小さなグラフでは優れた表現であると述べられている. なお, Marriott らによって, 小規模グラフの Memorability についてはまとめられている[26].

連結図が持つ, エッジ表現に焦点を合わせた研究も行われている. Telea らは Edge Bundling Layouts に関する比較実験を行った[27]. Holten らは有向エッジに着目し, 向きを表すことに適したエッジ表現についてまとめた[28]. その中で, 一般的によく用いられてきた矢印による向きの表現よりもエッジ全体を三角形にする表現の方が向きの表現に適して

いるという事実が発見された。また Holten らは、エッジ表現の更なる特性を調べるべく、追加実験も行っている[29]。Xu らもグラフの可読性に関する実験を行い、様々な種類の曲線エッジについて述べた[30]。

連結図が持つ特性に関する研究は様々になされてきた。何れもグラフ構造を可視化する際の指針として使用することができる。しかし、エッジによる重みの表し方の良さについては追求されておらず、現在は設計者の一存により決定されている。

第3章 エッジ表現とグラフの意味

被験者実験を行うに当たり，エッジ表現とグラフの意味について導入する。

3.1 実験の概要

既存の重み付きグラフの可視化では，エッジの長さが様々であるにも関わらず，単に太さや明度を変化させて重みを表現しているものが多い．長さが統一されていない重み付きエッジにおいて，様々な視覚変数で表現された重みは正しく読み取られているのだろうか，と疑問に思った．同時に，閲覧者が読み取る重みは少なからず長さの違いによる影響を受けているのではないかと考えた．

これらの考えの正しさを調べるために，下の 2 つの場合についてエッジの表現と重みの関係を調べる実験を実施した：

- 1) 様々な視覚変数を単独で用いた場合
- 2) 長さその他の視覚変数を組み合わせた場合

実験 1 では，長さや太さといった視覚変数の中の 1 変数のみがエッジにより異なるグラフについて調査を行う．被験者にエッジの重みがどの程度に読み取れるかを答えてもらい，視覚変数と重みの関係を明らかにする．この実験では，取得されたデータに対して回帰分析を行い，重みと視覚変数の関係を表す式を導出する．

実験 2 では，長さが統一されていない，一般的な連結図を想定した調査を行う．この実験では，長さその他の視覚変数 1 つがエッジ毎に異なる連結図について，エッジの重みがどの程度に読み取れるかを調べる．そして，回帰分析を行い，2 つの視覚変数と読み取られる重みの関係を定式化する．もし，長さの影響を完全に無視出来るのであれば，2 つの実験で導出された式は一致するはずである．

3.2 エッジ表現

実験を行うに当たり，既存の連結図を用いた重み付きグラフの表現ではどのような表現によって重みを示しているのかを調査した．調査対象には visualcomplexity.com という様々な可視化表現を掲載する web サイトの中で“graph”というキーワードで検索を行い，検索結果 330 件の内の重み付きグラフらしい 30 件の可視化表現を用いた．その結果，以下の 4 種類のエッジ表現が見つかった．なお，「高さ」を用いた表現とは，3 次元空間を描画領域とし，エッジが伸びている高さを用いて重みを表現したものである．また，複数の表現を組み合わせる重みを表現しているものも見られた．そのため，下記の件数合計が 30 を超える数字となっている．

- 太さ：22 件
- 明度：7 件
- 色相：4 件
- 高さ：1 件

3.3 グラフの意味

本来、重み付きグラフは要素間の連結関係と連結の強さを表す。しかし、閲覧者はグラフがどのような関係を表しているのかを念頭に置き、連結図を見る。その際、同じ連結図の同じエッジに着目したとしても、グラフの意味によって閲覧者が異なる重みを読み取る可能性があるのではないかと考えた。例えば、長さの異なる2本のエッジを考えた時、ノードが家、エッジが道路、重みが物理的な距離を表す場合、長いほうが重みは大きいと感じる。しかし、ノードが人、エッジが友好関係、重みが親密度を表すグラフの場合を考えると、短い方が重みは大きいと感じるのではないだろうか。このように、重みの読み取りはグラフの意味からの影響を受けると考えられる。そこで、エッジの長さとの関係を元に、グラフの意味を大きく3種類に分類した：

- エッジが長いほど重みが大きく感じる
- エッジが短いほど重みが大きく感じる
- 長さとう重みを結びつけづらい

この分類を参考に実験を行う（4章で詳しく述べる）。

第4章 実験 1

本章では、視覚変数を単独で用いた場合のエッジの表現と重みの感じ方の関係を調べる実験について述べる。

4.1 実験の目的

被験者に対して連結図を提示し、その中のあるエッジについて重みがどの程度に感じられるかを答えてもらう実験を行った。この実験では、エッジに付加した視覚変数の値と閲覧者に読み取られる重みの対応を表す式を導出する。実験結果に影響を与え得る要素として、エッジの表現とグラフの意味を考え、各3種類ずつ用意した。ところで、視覚変数による量的データの表現の精度については Mackinlay によりまとめられている。本実験では、直線を用いた連結図の中でも既存研究と同様の傾向が見られるかどうかという観点からも調査を行う。

4.2 実験の設計

4.2.1 エッジ表現

本研究では、エッジの長さによる重みの読み取られ方への影響を調べたいと考えている。そのため、長さの視覚変数が持つ効果を測るため、長さを用いた表現（図 4.1(a)）について実験を行う。また、3.2 で調べた既存のエッジが持つ重みの表現には、太さや明度が多く使われていた。そこで、先に述べた長さの表現に加えて、太さを用いた表現（図 4.1(b)）、明度を用いた表現（図 4.1(c)）を対象とした。

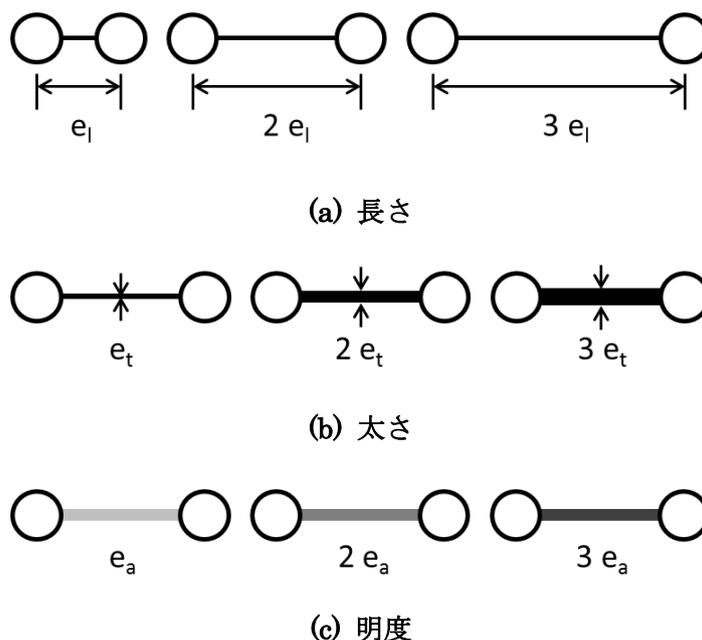


図 4.1 使用したエッジ表現（視覚変数）

4.2.2 グラフの意味

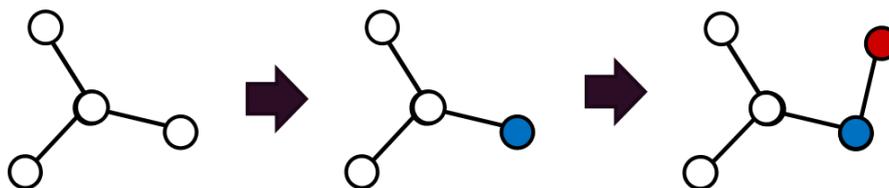
グラフの意味は3章で分類した3種類を使用し、カテゴリ1に分類されるグラフには重みが距離のグラフが当てはまるだろうと考えた。このグラフでは、ノードが街を表し、エッジは街間の道路を、エッジの重みは街間の距離を表すものとした。カテゴリ2のグラフとして、ノードを人とし、エッジが友好関係の有無、エッジの重みが親密度を表すグラフを考えた。カテゴリ3のグラフには、重みが輸送量のグラフを割り当てた。このグラフは、工場をノードとして持ち、エッジは工場間の物流の有無を、エッジには輸送量という重みが与えられている。

4.2.3 グラフレイアウト

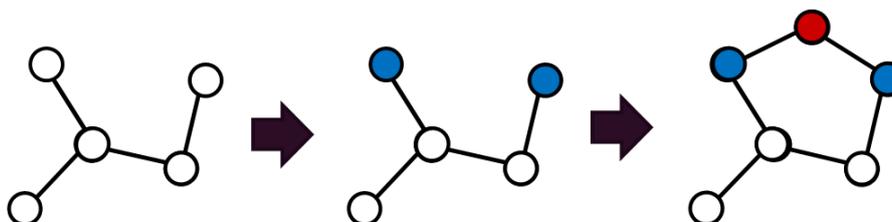
被験者に提示する連結図は、ランダムなレイアウトの連結図を使用した。今回使用するグラフは、意図的にエッジの長さを制御する必要がある。しかし、通常のグラフ描画手法ではこれを実現することは難しい。そのため、2種類のレイアウト手法を用いてノードの配置を決定した。

1つ目は、木の構造を生成する手法である。この手法では、予め与えられた1つのノードを基に木構造を形成していく。図4.2(a)に示すように、1つのノード(図内青色)をランダムに選択し、そのノードから任意の長さ l のエッジを任意の角度 θ で描くことができる新しいノード(図内赤色)を配置する。これを繰り返すことにより木構造の連結図を描くことができる。

また今回、木を生成する手法と並行して、環を生成する手法も取り入れた。この手法はある程度の大きさのグラフが形成されていることを前提とし、グラフ内の2つのノードの間にノードを追加していく。図4.2(b)では、ノード数5のグラフから2つのノード(図内青色)をランダムで選択し、2点から任意の長さ l のエッジを描くことが可能な新しいノード(図内赤色)を配置する。これを繰り返すことにより、環の構造を持つ連結図を描くことができる。



(a) 木を生成するレイアウト手法

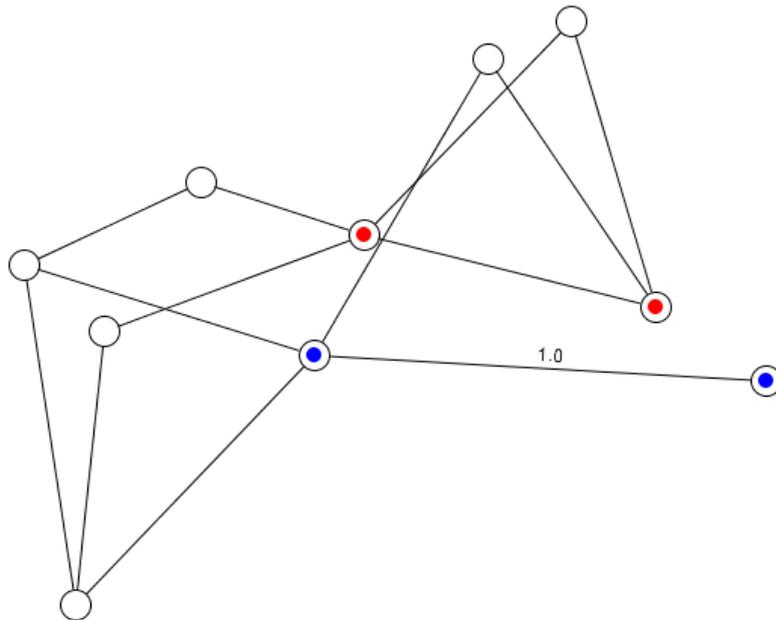


(b) 環を生成するレイアウト手法

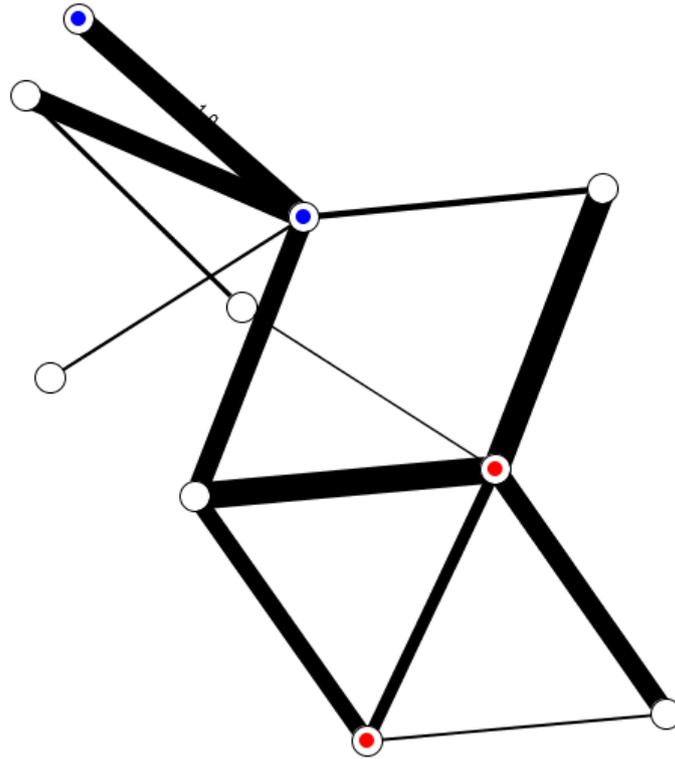
図 4.2 ランダムレイアウト

4.2.4 実験タスク

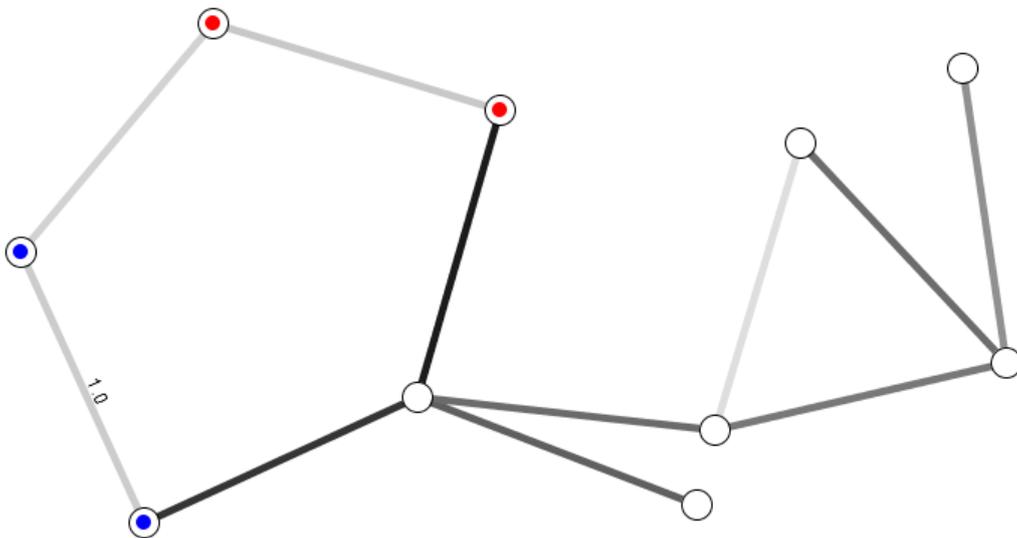
被験者に連結図内のエッジの重みを読み取ってもらうタスクを実施した。まず、赤色と青色のノードがそれぞれ 2 つ含まれる連結図を被験者に提示する。このグラフはランダムに生成されたものである。被験者により提示されるグラフ構造は異なるが、1 つのグラフが持つノード数は全て等しいものとし、3 種類のエッジ表現の何れか 1 つのみを使用した。実際に使用したグラフの一例を図 4.3 に示す。図 4.3(a)はエッジの長さにはばらつきを与え、太さと明度は一定にしたグラフである。図 4.3(b)はエッジの太さがエッジ毎に異なり、長さとは明度は全て等しい。図 4.3(c)はエッジの明度がそれぞれ異なるグラフとなっている。ここで、連結図内の青いノードに挟まれたエッジを基準エッジとし、重みは全て 1.0 とした。赤いノードに挟まれたエッジは回答エッジであり、基準エッジを参考にした時に、重みがどの程度に読み取れるかを回答してもらった。なお、事前に行った予備実験においてノード数の違いによる影響を調べたが、概ね同等の結果が得られたため、今回の実験では全てノード数 10 とした。



(a) 長さの視覚変数を用いた描画例



(b) 太さの視覚変数を用いた描画例



(c) 明度の視覚変数を用いた描画例

図 4.3 グラフ描画例

4.2.5 タスクの実施回数

今回の実験では、被験者 1 人に対して 1 つのグラフの意味を割り当てた。そして、上述の 3 種類の視覚変数に対してそれぞれ 5 つの値の範囲を設定し、その中から基準エッジと回答

エッジを決定した (表 4.1). 基準エッジは 5 つの範囲に対して, それぞれの範囲の最大値を使用した. 例えば, 長さを用いた表現で範囲 2 に属する基準エッジは長さ 120 となる. 一方, 回答エッジは各範囲内でランダムに決められた表現を使用した. 例えば, 太さを用いた表現で範囲 4 に属する回答エッジは, 太さ 12 を超え 16 以下の実数値をとる. なお, 1 つのグラフ内に描かれる基準エッジと回答エッジの値の範囲は重ならないものとし, エッジの表現は 3 種類, 基準エッジは 5 種類, 回答エッジは 4 つの範囲内の値を取るように, 1 人の被験者には 60 種類のグラフを見てもらった. そして, 60 種類のグラフに対してデータの充実を図るため, 各 2 回ずつ合計 120 回のタスクを実施した.

表 4.1 表現の範囲

表現	範囲 1	範囲 2	範囲 3	範囲 4	範囲 5
長さ					
	$0 < x \leq 60$	$60 < x \leq 120$	$120 < x \leq 180$	$180 < x \leq 240$	$240 < x \leq 300$
太さ					
	$0 < x \leq 4$	$4 < x \leq 8$	$8 < x \leq 12$	$12 < x \leq 16$	$16 < x \leq 20$
明度					
	$0 < x \leq 0.2$	$0.2 < x \leq 0.4$	$0.4 < x \leq 0.6$	$0.6 < x \leq 0.8$	$0.8 < x \leq 1.0$

4.2.6 実験ツール

本研究では, 一般的なモニタ上で使用される連結図を想定し, 実験を行った. そのため, 実験自体も PC 上で実施できるような実験ツールを Java を用いて開発した (図 4.4). このツールは, 大きく分けて 2 つの領域から構成される. 左側には被験者に提示する連結図を表示した. 右側には提示しているグラフが持つ意味やエッジの重みに関する情報と, 被験者が読み取ったエッジの重みを入力するためのフォームと次のタスクへ進むボタンを設置した. なお, このボタンをクリックすると, 左側の連結図が更新され, 直前とは異なる表示に切り替わる. 被験者には新しい連結図について, 重みを読み取るタスクを行ってもらおう.

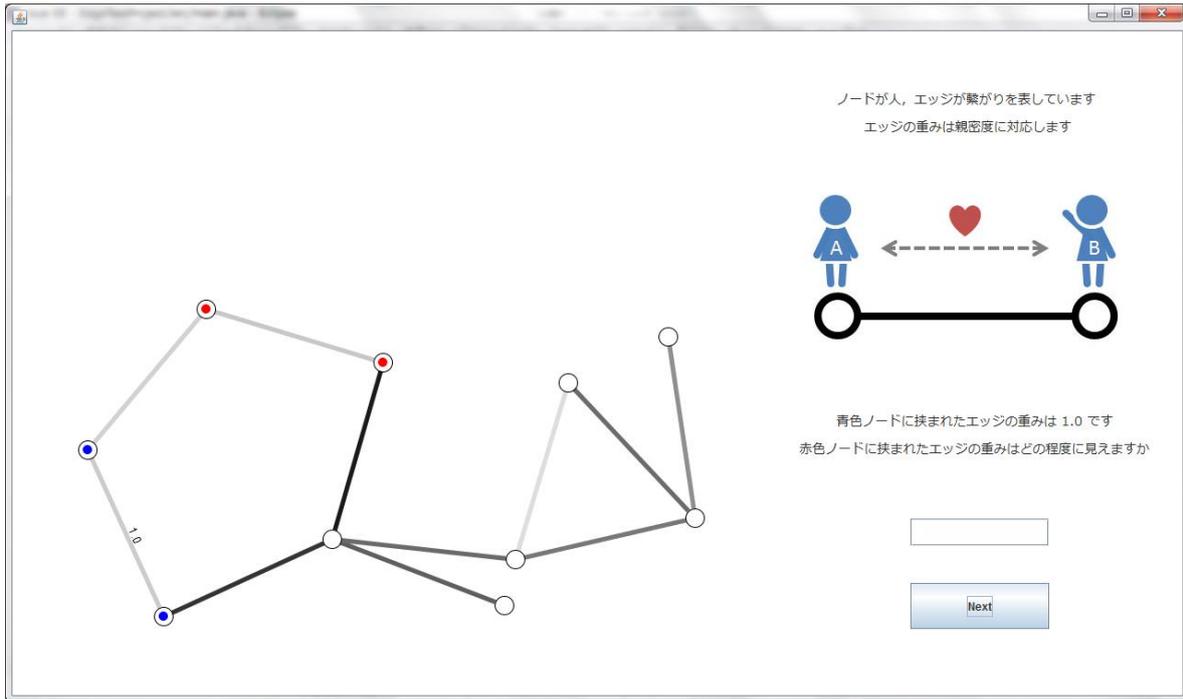


図 4.4 実験ツール

なお、この実験ツールでは以下の情報を記録する：

- グラフの意味
- グラフのノード数
- 使用している視覚変数
- 各エッジの座標（エッジによって繋がれる 2 つのノードがもつ座標）
- 各エッジの長さ
- 各エッジの太さ
- 各エッジの明度
- 入力された数値（被験者による回答）
- 回答を終えた時刻（Next ボタンが押された時刻）

4.2.7 実験環境

実験は全て同じ 1 台のラップトップコンピュータを用いて行った。このコンピュータは Lenovo 社製の ThinkPad X201i 32491EJ で、画面サイズは 12.1 インチ、画面解像度は WXGA (1280x800)であった。ここで、人の視覚的な認知特性を調べる多くの既存研究では、照明条件や画面と目の距離、角度といった条件を統一した状態で実験が行われてきた。しかし、本研究が対象としている連結図を閲覧者が見る実際のシーンでは、これらの実験のように様々な条件が統一されていることはまずない。閲覧者は様々な環境光の下、様々な距離、角度から連結図を見ることが想像される。しかしながら、想定され得る全ての状況を再現し、網羅的に実験を行おうと考えると、今回想定している 30 名程度の実験では被験者への負担

があまりにも大きくなってしまふ。そこで、今回の実験では比較的よく利用されるシーンを想定し、全てのタスクを室内で、かつ蛍光灯の光の下で行う、という制限の下、実施した。

4.3 実験の流れ

実験は以下の流れで実施した。実験にかかる時間は個人差があったものの、1人当たり概ね30分程度を必要とした。なお、実験に使用した書類を付録Aとして掲載している。

- 1) 実験の趣旨について説明し、同意書への署名を依頼
- 2) タスクと使用するエッジ、グラフの意味について説明
- 3) 実験ツールの使い方について説明
- 4) 不明点が無いことを確認し、タスクを実施
- 5) 全てのタスクを終えた後、アンケートを実施

4.4 被験者

30人の被験者を対象に実験を行った。被験者は全員が大学生及び大学院生で、その内23人が男性、7人が女性であった。また、今回の被験者は全員が情報系の学生であり、グラフに関する最低限の知識は持っていたと考えられる。

4.5 実験結果

実験1では、エッジ表現と閲覧者がエッジから読み取る重みの関係を調べるために、基準となるエッジに対して指定されたエッジの重みがどの程度に読み取れるかを答えてもらう実験を行った。得られた実験データから、エッジに付加した視覚変数の値と被験者が読み取った重みの関係を回帰曲線として導出した。回帰分析を行うにあたっては、ステューヴンスのべき法則 (Stevens' power law) を参考にした。この法則によると、物理刺激の強さとそれによる感覚の強さは式(1)で表される。式内 I は物理刺激の強さを、 $\Psi(I)$ は感覚の強さを表している。加えて、 α は刺激の種類によって決まる指数であり、 k は比例定数である。この法則に従い、本研究ではべき乗モデルを使用した回帰分析を行った。

$$\psi(I) = kI^\alpha \quad (1)$$

またこの時、標準的な値にどの程度の誤差が見込まれるかを示す残差標準誤差 (RMS 誤差) E も求めた。決定係数 R^2 は式(2)により算出される。式内の y_i は実測値、 f_i は回帰式による予測値を表す。また、標準誤差 E は、縦軸の標準偏差 σ_y と決定係数 R^2 を元に式(3)を用いて導出した。なお、決定係数は1に近いほど、標準誤差は小さいほど、回帰曲線の精度が高く、個人差も小さい。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - f_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

$$E = \sigma_y \times \sqrt{1 - R^2} \quad (3)$$

加えて、分析を行う際、連結図内で使用したエッジ表現（長さや太さ、明度）と連結図内に1つ存在する1.0の重みを表現した基準エッジ（図4.3内の青ノードに挟まれたエッジ）に使用した視覚変数の値によって実験データを分類した。表4.2は、この分類を元に導出した回帰曲線と残差標準誤差についてまとめたものである。また、回帰曲線で使用されている W は、被験者が読み取った重みを表現しており、変数 v はエッジに付加した視覚変数の値（長さ100、太さ10など）である。なお、基準エッジの値については、4.2.5で詳しく述べている。

表4.2では、1つのグラフの意味、エッジ表現に対して5つの分類を行い、それぞれの回帰曲線を導出した。しかし、表4.2(b)内の長さの表現を使用した場合は、1種類の基準エッジに対して2種類の回帰曲線を導出した。これは、実験データから2つの異なる傾向が見られ、それぞれについて分析を行ったためである。なお、実験データを散布図として表現したものを付録Bとして掲載している。

表 4.2 実験結果

(a) エッジが長いほど重みも大きいグラフ

表現	基準エッジの範囲	回帰式	残差標準誤差
長さ	1	$W = 0.016 \cdot V^{1.0}$	0.74
	2	$W = 0.0065 \cdot V^{1.1}$	0.25
	3	$W = 0.0058 \cdot V^{0.99}$	0.13
	4	$W = 0.0034 \cdot V^{1.0}$	0.080
	5	$W = 0.0036 \cdot V^{0.99}$	0.14
太さ	1	$W = 0.35 \cdot V^{0.95}$	2.0
	2	$W = 0.036 \cdot V^{1.5}$	0.51
	3	$W = 0.044 \cdot V^{1.2}$	0.18
	4	$W = 0.043 \cdot V^{1.1}$	0.093
	5	$W = 0.026 \cdot V^{1.3}$	0.11
明度	1	$W = 4.2 \cdot V^{0.98}$	0.92
	2	$W = 2.4 \cdot V^{0.94}$	0.67
	3	$W = 1.8 \cdot V^{0.91}$	0.37
	4	$W = 1.3 \cdot V^{0.91}$	0.20
	5	$W = 1.1 \cdot V^{0.87}$	0.16

(b) エッジが短いほど重みは大きいグラフ

表現	基準エッジ の範囲	回帰式	残差標準誤差
長さ	1	$W = 0.0089 \cdot V^{1.2}$	1.1
		$W = 150 \cdot V^{(-1.2)}$	0.14
	2	$W = 0.0046 \cdot V^{1.1}$	0.21
		$W = 87 \cdot V^{(-0.93)}$	0.28
	3	$W = 0.0031 \cdot V^{1.1}$	0.12
		$W = 190 \cdot V^{(-1.0)}$	1.0
	4	$W = 0.0021 \cdot V^{1.1}$	0.087
		$W = 360 \cdot V^{(-1.1)}$	0.93
	5	$W = 0.0012 \cdot V^{1.2}$	0.081
		$W = 230 \cdot V^{(-0.92)}$	1.4
太さ	1	$W = 0.14 \cdot V^{1.3}$	2.0
	2	$W = 0.063 \cdot V^{1.3}$	0.49
	3	$W = 0.060 \cdot V^{1.1}$	0.17
	4	$W = 0.044 \cdot V^{1.1}$	0.092
	5	$W = 0.021 \cdot V^{1.3}$	0.098
明度	1	$W = 3.9 \cdot V^{0.86}$	0.91
	2	$W = 3.3 \cdot V^{1.2}$	0.89
	3	$W = 2.1 \cdot V^{1.0}$	0.51
	4	$W = 1.2 \cdot V^{0.72}$	0.14
	5	$W = 1.1 \cdot V^{0.90}$	0.16

(c) 長さ結びつけづらいつラフ

表現	基準エッジの範囲	回帰式	残差標準誤差
長さ	1	$W = 0.015 \cdot V^{1.0}$	0.55
	2	$W = 0.0037 \cdot V^{1.2}$	0.23
	3	$W = 0.005 \cdot V^{0.99}$	0.13
	4	$W = 0.0025 \cdot V^{1.1}$	0.090
	5	$W = 0.0028 \cdot V^{1.0}$	0.074
太さ	1	$W = 0.24 \cdot V^{1.0}$	0.92
	2	$W = 0.11 \cdot V^{1.1}$	0.43
	3	$W = 0.069 \cdot V^{1.1}$	0.14
	4	$W = 0.034 \cdot V^{1.2}$	0.093
	5	$W = 0.033 \cdot V^{1.1}$	0.095
明度	1	$W = 3.9 \cdot V^{1.1}$	0.61
	2	$W = 2.8 \cdot V^{1.2}$	0.58
	3	$W = 1.9 \cdot V^{1.0}$	0.38
	4	$W = 1.3 \cdot V^{0.85}$	0.32
	5	$W = 0.98 \cdot V^{0.77}$	0.16

4.6 考察

4.6.1 エッジが長いほど重みも大きいグラフ

表 4.1(a)を見ると、長さを用いたエッジ表現では、エッジが長くなるほど重みが重く読み取られる傾向にあった。つまり、エッジの長さとおエッジの重みの間には正の相関が見られた。スティーヴンスのべき法則によると、長さを表す変数 V に掛かる係数は 1.0 とされており、本実験の結果からも同程度の値が導出された。また、分析に際して合わせて計算した残差標準誤差に関しては基準エッジの長さを 200 とする範囲 4 の値が最も小さく、精度が高いといえる。

本研究で扱うエッジの太さは、スティーヴンスのべき法則で紹介されている視覚刺激の中の長さに該当する。これは、人がエッジの太さを読み取るとき、エッジの幅、つまりエッジの縦の長さを読み取ると考えたためである。先に述べた通り、長さの変数 V に掛かる係数は 1.0 である。これを踏まえて実験結果を見ていくと、係数値が 1.0 となる回帰式は導出できなかった。しかし、基準エッジの範囲 1 の時 0.95、範囲 4 の時 1.1 の値を示しているため、近い特性を持っている表現だと考えている。なお、太さの表現においても範囲 4 が最も小さい残差標準誤差を示した。

同様に明度の表現について考えていくと、変数 V に掛かる係数は 1.2 が理想的である。しかし、本実験の結果からは同等の値は算出されず、全体的に低い値を示す傾向となった。これは、グラフの意味による影響を受けている可能性があるのではないかと考えている。なお、3種類の表現では長さの表現を用いた場合が最も残差標準誤差が小さくなった。

4.6.2 エッジが短いほど重みは大きいグラフ

エッジの重みを人同士の親密度としたグラフ（表 4.1(b)）では、長さの表現を用いた場合に 2つの傾向が見られた。一方は、エッジが長くなるほど重みを大きく読み取り、もう一方は小さく読み取る結果となった。それぞれの傾向を示した被験者の人数は概ね同じであった。また、基準エッジの範囲 1 ではエッジが長いほど重いと読み取っていた被験者の一部は、その他の範囲においてエッジが短いほど重みが大いくと読み取っていた。そのため、この表現を実際に使用する際は何かしらの説明を与える必要があるのかもしれない。

太さを用いた表現では、理想と考えている係数值 1.0 と一致する回帰式は導出できなかったが、範囲 3 及び範囲 4 では 1.1 と近い値が算出された。なお、残差標準誤差は範囲 4 が最も小さい。

また、明度の表現では 4.6.1 の結果と比べて、変数 V に掛かる値が全体的に大きい値となった。特に基準エッジ 2 の時には係数值が 1.2 となり、既存研究と一致した。なお、明度と太さの表現では、太さの表現の方が残差標準誤差は小さい値となった。

4.6.3 長さ結びつけづらいグラフ

表 4.2(c)を見ると、長さを用いた表現の多くの回帰式で、理想値に近い 1.0 前後の係数值を計測できていることがわかる。しかしながら、一部の被験者の中には、常に重みが 1.0 であると回答した者も居たため、個人差が現れやすい表現であると考えられる。

太さの表現に関しては、多くの回帰式において 1.0 から 1.2 係数值を得た。明度の表現では、基準エッジの範囲 2 の時、既存研究が示した係数值 1.2 を導出することができた。なお、このグラフについても明度より太さの方が標準誤差は小さい結果を得た。

第5章 実験 2

本章では、長さその他の視覚変数を組み合わせた場合のエッジの表現と重みの感じ方の関係を調べる実験について述べる。

5.1 実験の目的

実験 1 の結果を受け、エッジの長さが統一されていない一般的な連結図についての実験を行った。この実験では、エッジの長さや太さ、または長さや明度がばらついた連結図を被験者に提示し、エッジの重みについて回答してもらった。グラフの意味や連結図の生成方法、実験タスク、実験環境など可能な限り実験 1 と同じ状況においてエッジの長さによる影響を測る。また今回、被験者に対してエッジが持つどの視覚変数をエッジの重みに対応付けしたのかという情報を伝えた場合と伝えなかった場合についての比較も行った。この実験結果を踏まえ、6 章で描画のためのガイドラインとしてまとめる。

5.2 実験の設計

5.2.1 エッジ表現

実験 1 では、長さ、太さ、明度の何れか 1 つのみにばらつきのある連結図について実験を行った。実験 2 では、一般的な連結図を想定し、長さその他の 1 つの視覚変数が様々なエッジをもつ連結図を扱う。例えば、太さの視覚変数について調べる場合、実験 1 では太さと明度は一定であったが (図 5.1(a))、実験 2 では長さもばらついた連結図を用いる (図 5.1(b))。

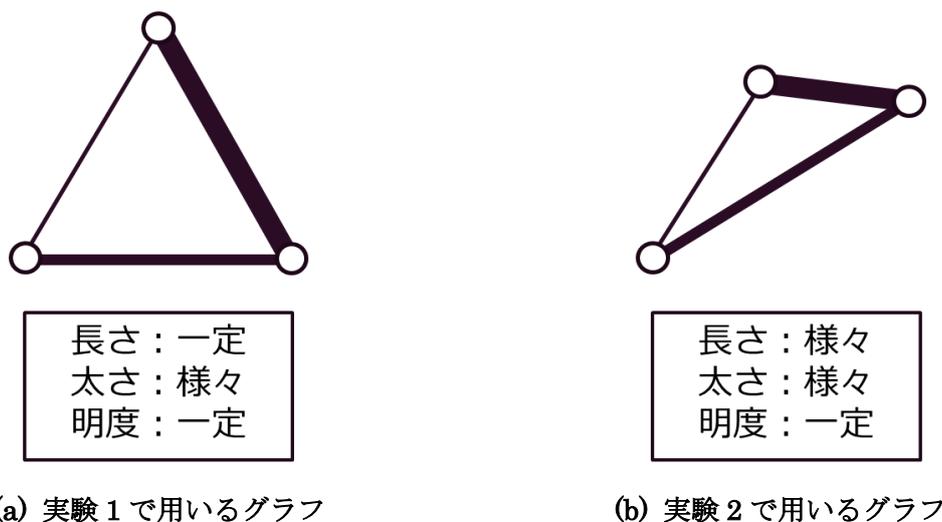


図 5.1 使用する表現の比較

5.2.2 グラフの意味

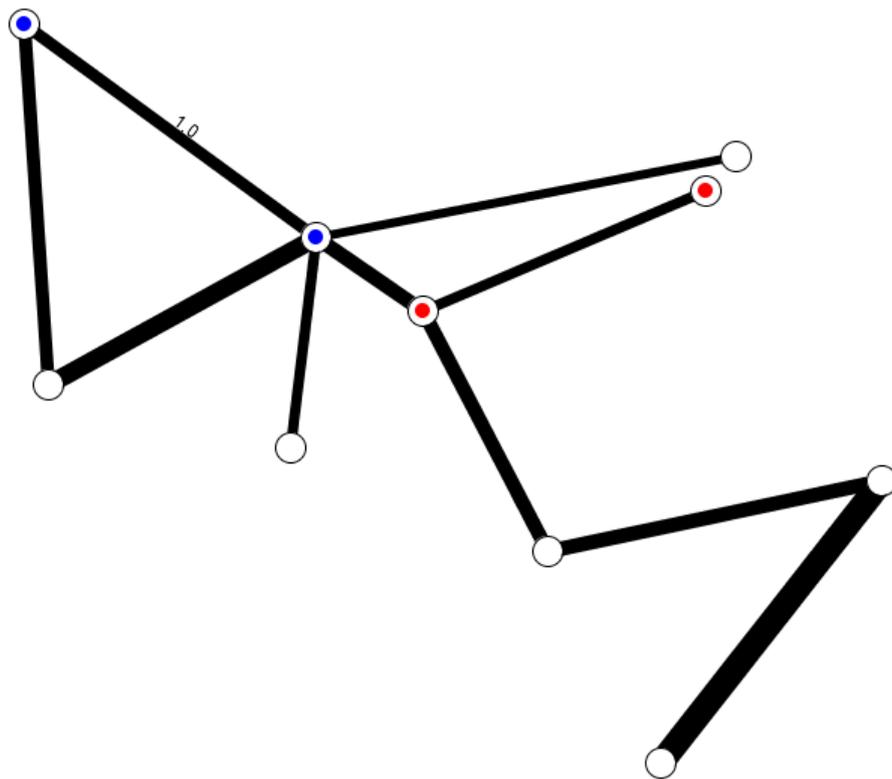
グラフの意味は実験 1 と同じ 3 種類を使用した。ただし、被験者 1 人に対して 1 種類のグラフの意味について実験を行った実験 1 に対し、実験 2 では、1 人当たり 2 種類のグラフの意味について調査を行った (5.2.5 で詳しく述べる)。

5.2.3 グラフレイアウト

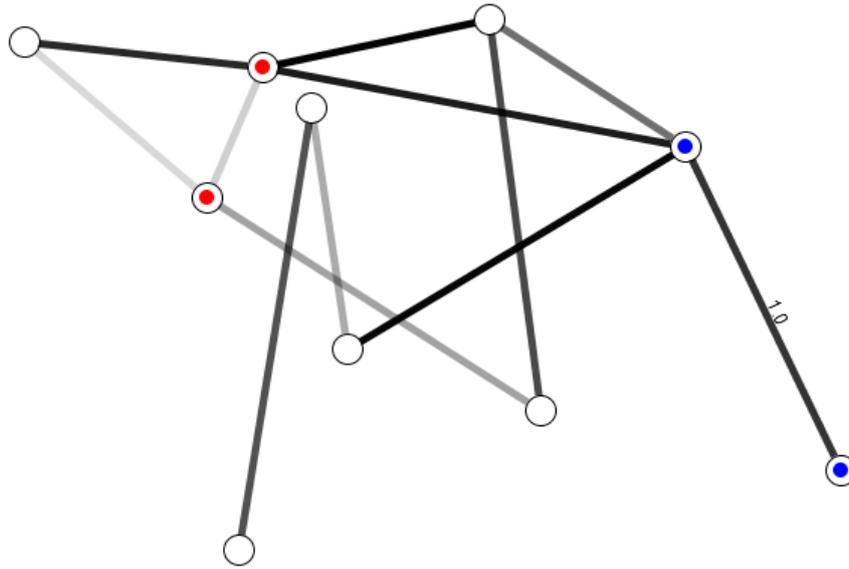
実験に使用する連結図は、4.2.3 で述べた 2 種類のレイアウト手法の組み合わせによりレイアウトを決定した。エッジの長さや太さ、明度の決め方については 5.2.5 で詳しく述べる。

5.2.4 実験タスク

被験者には、実験 1 と同様に赤色と青色のノードを 2 つずつ含む連結図を提示した。そして、青色ノードに挟まれたエッジ (基準エッジ) の重みが 1.0 である時に赤色ノードに挟まれたエッジ (回答エッジ) の重みがどの程度に読み取れるかを回答してもらった。なお、被験者に提示した連結図は、長さや太さが様々なもの (図 5.2(a)) または長さや明度が様々なもの (図 5.2(b)) の何れかである。



(a) 太さの視覚変数を用いた描画例



(b) 明度の視覚変数を用いた描画例

図 5.2 グラフ描画例

5.2.5 タスクの実施回数

今回の実験では、被験者 1 人に対してグラフの意味を 2 つ割り当てた。そして、4.2.5 で示した長さ、太さ、明度に対する各 5 段階の値の範囲を使用し、基準エッジ（青ノード間のエッジ）と回答エッジ（赤ノード間のエッジ）の値を決めた。この時、長さ、太さ、長さ、明度の全ての組み合わせについて調べようと考え、それぞれ 25 種類、合わせて 50 種類の値域の組み合わせが生まれてしまう。更に基準エッジと回答エッジの両方にこれだけの種類の調査が必要となるため、非常に多くの実験が必要となる。実験 2 においても 30 名程度の被験者数を想定していたため、被験者への負担があまりにも大きくなってしまった。そこで実験 2 では、表 5.2 に丸で示される種類に限定した実験を行い、結果をまとめる。具体的には、25 種類ある値域の中から 8 種類を使用した。この 8 種類は、エッジが短く細い（明るい）、長く太い（暗い）、短く太い（暗い）、長く細い（明るい）エッジを表すものである。結果的に、1 つのグラフの意味に対して、エッジの表現を 2 種類、基準エッジを 4 種類（全体では 8 種類あるが被験者 1 人には 4 種類を実施）、回答エッジの変化範囲を 16 種類用意し、各 1 回ずつ合計 128 回のタスクを実施した。なお、グラフの意味を変更する際は、2 時間以上の休憩を挟んで実験を行った。

表 5.1 表現の範囲

		太さまたは明度				
		範囲 1	範囲 2	範囲 3	範囲 4	範囲 5
長さ	範囲 1	○	×	×	×	○
	範囲 2	×	○	×	○	×
	範囲 3	×	×	×	×	×

範囲 4	×	○	×	○	×
範囲 5	○	×	×	×	○

5.2.6 実験ツール

実験には、4.2.6 で述べたツールと同じものを使用した。ただし、5.2.1 で述べた通り、今回の実験では、長さその他の1つの視覚変数（太さまたは明度）が変化するように、前回と異なる特徴を持つデータを使用した。

5.2.7 実験環境

今回の実験でも、4.2.7 で述べたものと同じ1台のラップトップコンピュータを使用して実験を行った。実施場所も実験1と同様に、蛍光灯の下という制約の元で実施した。

5.3 実験の流れ

実験は以下の流れに従って行った。今回の実験では、被験者1人に対して2種類のグラフの意味についての実験を実施した。2度の実験を続けて行った場合、先に使用したグラフの意味から何かしらの影響を受ける可能性がある。そこで、1度目と2度目の実験の間に少なくとも2時間以上の休憩を挟むことで、影響を排除した。

- 1) 実験の趣旨について説明し、同意書への署名を依頼
- 2) タスクと使用するエッジ、グラフの意味について説明
- 3) 実験ツールの使い方について説明
- 4) 不明点がないことを確認し、タスクを実施
- 5) アンケートを実施
- 6) 休憩（2時間以上）
- 7) グラフの意味を変更してタスクを実施
- 8) アンケートを実施

5.4 被験者

30人の情報学を学ぶ大学生及び大学院生を実験参加者とし、実験を行った。この内、21人が男性、9人が女性であった。なお、この被験者の中には4章で述べた実験の被験者も含まれている。

5.5 実験結果

実験から得たデータを使用した基準エッジ毎に分類し、回帰曲線を導出した。この結果を表5.2及び5.3に示す。この実験では、2つの視覚変数にばらつきがあるエッジについて調査を行った。回帰分析にあたっては、4章で導出された各視覚変数の特性を表す回帰式を掛けあわせたモデル（式(4)）に近づくと仮説をたて、分析を行った。式内の W は閲覧者が読み取る重みの値を示し、 L はエッジの長さ、 V は明度または太さの値を表す。また、 a は式

全体にかかる比例定数であり， b, c は各変数に掛かる定数である．

$$W(L,V) = a \cdot L^b \cdot V^c \quad (4)$$

加えて，導出された回帰式に対して，t検定を行った．式(4)内の係数 a, b, c について，係数値が意味を持たない（0 である）という帰無仮説を立て，この仮説を棄却可能かどうかを調べた．なお，今回の検定では有意水準を 5%と設定した．加えて，実験データを散布図として表現したものを付録 C として掲載している．

表 5.2 表現に関する情報を与えた場合の実験結果

(a) エッジが長いほど重みも大きいグラフ

表現	基準エッジの範囲		回帰式	残差標準誤差	t 検定の p 値		
	長さ	太/明			a	b	c
太さ	1	1	$W = 0.21 \cdot L^{0.16} \cdot V^{0.75}$	0.84	0.039	0.030	$2.9e^{-9}$
	2	2	$W = 0.069 \cdot L^{0.11} \cdot V^{1.1}$	0.33	0.013	0.040	$4.9e^{-14}$
	4	4	$W = 0.058 \cdot L^{-0.033} \cdot V^{1.1}$	0.13	$1.3e^{-4}$	0.29	$2e^{-16}$
	5	5	$W = 0.030 \cdot L^{0.061} \cdot V^{1.1}$	0.13	0.0074	0.26	$5.6e^{-16}$
	1	5	$W = 0.14 \cdot L^{-0.0067} \cdot V^{0.81}$	0.71	0.24	0.96	$9.3e^{-4}$
	2	4	$W = 0.045 \cdot L^{0.10} \cdot V^{0.96}$	0.29	0.037	0.13	$2.7e^{-10}$
	4	2	$W = 0.080 \cdot L^{0.075} \cdot V^{1.0}$	0.52	0.043	0.28	$7.8e^{-12}$
明度	5	1	$W = 0.27 \cdot L^{-0.15} \cdot V^{1.3}$	1.2	0.039	0.0086	$1.3e^{-13}$
	1	1	$W = 1.4 \cdot L^{0.22} \cdot V^{0.65}$	1.0	0.0078	0.0038	$1.8e^{-7}$
	2	2	$W = 1.38 \cdot L^{0.10} \cdot V^{0.88}$	0.48	0.0055	0.14	$5.7e^{-9}$
	4	4	$W = 0.79 \cdot L^{0.084} \cdot V^{0.99}$	0.19	$8.8e^{-4}$	0.14	$4.0e^{-13}$
	5	5	$W = 0.62 \cdot L^{0.081} \cdot V^{0.81}$	0.18	0.0013	0.18	$4.1e^{-11}$
	1	5	$W = 0.81 \cdot L^{0.072} \cdot V^{1.1}$	0.25	0.0034	0.28	$6.9e^{-10}$
	2	4	$W = 1.2 \cdot L^{0.0012} \cdot V^{0.90}$	0.22	$2.2e^{-4}$	0.98	$7.0e^{-12}$
	4	2	$W = 1.5 \cdot L^{0.11} \cdot V^{0.86}$	1.0	0.091	0.32	$1.2e^{-5}$
5	1	$W = 1.0 \cdot L^{0.082} \cdot V^{0.17}$	1.2	0.16	0.57	0.17	

(b) エッジが短いほど重みは大きいグラフ

表現	基準エッジの範囲		回帰式	残差標準誤差	t 検定の p 値		
	長さ	太/明			a	b	c
太さ	1	1	$W = 0.18 \cdot L^{0.024} \cdot V^{1.1}$	0.83	0.0047	0.62	$2e^{-16}$
	2	2	$W = 0.084 \cdot L^{0.55} \cdot V^{1.1}$	0.33	$8.5e^{-4}$	0.16	$2e^{-16}$
	4	4	$W = 0.039 \cdot L^{0.40} \cdot V^{1.1}$	0.12	$4.3e^{-6}$	0.13	$2e^{-16}$
	5	5	$W = 0.041 \cdot L^{-0.050} \cdot V^{1.2}$	0.10	$3.4e^{-5}$	0.14	$2e^{-16}$
	1	5	$W = 0.058 \cdot L^{0.036} \cdot V^{0.93}$	0.18	0.019	0.53	$9.0e^{-11}$
	2	4	$W = 0.042 \cdot L^{0.025} \cdot V^{1.1}$	0.19	0.016	0.65	$1.0e^{-14}$
	4	2	$W = 0.069 \cdot L^{-0.0057} \cdot V^{1.3}$	0.38	0.019	0.92	$2e^{-16}$
	5	1	$W = 0.46 \cdot L^{-0.051} \cdot V^{0.12}$	1.2	0.031	0.42	$2.3e^{-10}$
明度	1	1	$W = 3.0 \cdot L^{0.041} \cdot V^{0.82}$	0.59	$7.3e^{-5}$	0.38	$2e^{-16}$
	2	2	$W = 2.3 \cdot L^{0.019} \cdot V^{0.87}$	0.54	$5.4e^{-4}$	0.74	$3.1e^{-6}$
	4	4	$W = 1.0 \cdot L^{0.017} \cdot V^{0.89}$	0.16	$4.6e^{-7}$	0.66	$2e^{-16}$
	5	5	$W = 0.59 \cdot L^{0.096} \cdot V^{0.65}$	0.22	0.0020	0.14	$2.8e^{-11}$
	1	5	$W = 0.94 \cdot L^{0.53} \cdot V^{0.066}$	0.10	$2.3e^{-6}$	0.89	$2e^{-16}$
	2	4	$W = 1.2 \cdot L^{0.0038} \cdot V^{0.90}$	0.13	$5e^{-6}$	0.99	$2e^{-16}$
	4	2	$W = 3.27 \cdot L^{-0.018} \cdot V^{1.1}$	0.50	0.0080	0.81	$6.4e^{-13}$
	5	1	$W = 8.8 \cdot L^{-0.17} \cdot V^{0.59}$	1.2	0.0090	0.035	$5.8e^{-6}$

(c) 長さ結びつけづらいつらいつらグラフ

表現	基準エッジの範囲		回帰式	残差標準誤差	t 検定の p 値		
	長さ	太/明			a	b	c
太さ	1	1	$W = 0.14 \cdot L^{0.15} \cdot V^{0.90}$	0.69	0.0020	0.0021	$2e^{-16}$
	2	2	$W = 0.077 \cdot L^{0.096} \cdot V^{1.0}$	0.40	0.015	0.080	$2.4e^{-14}$
	4	4	$W = 0.066 \cdot L^{0.023} \cdot V^{0.92}$	0.14	$5.2e^{-4}$	0.52	$2e^{-16}$
	5	5	$W = 0.034 \cdot L^{-0.0066} \cdot V^{0.2}$	0.11	$2.5e^{-4}$	0.87	$2e^{-16}$
	1	5	$W = 0.042 \cdot L^{-0.049} \cdot V^{1.2}$	0.14	0.0016	0.20	$2e^{-16}$
	2	4	$W = 0.065 \cdot L^{-0.032} \cdot V^{1.0}$	0.2	$2.2e^{-5}$	0.25	$2e^{-16}$
	4	2	$W = 0.076 \cdot L^{0.0038} \cdot V^{1.2}$	0.58	0.065	0.96	$3.e^{-12}$
	5	1	$W = 0.17 \cdot L^{0.075} \cdot V^{1.1}$	1.5	0.054	0.27	$6.4e^{-11}$
明度	1	1	$W = 2.1 \cdot L^{0.095} \cdot V^{0.77}$	0.60	$1.6e^{-4}$	0.069	$1.7e^{-13}$
	2	2	$W = 2.8 \cdot L^{-0.11} \cdot V^{0.82}$	0.59	$7.0e^{-4}$	0.85	$3.1e^{-11}$
	4	4	$W = 0.63 \cdot L^{0.098} \cdot V^{0.79}$	0.23	0.0012	0.11	$3.7e^{-10}$
	5	5	$W = 0.52 \cdot L^{0.12} \cdot V^{0.90}$	0.19	0.0022	0.069	$2.5e^{-11}$
	1	5	$W = 0.75 \cdot L^{0.049} \cdot V^{0.80}$	0.16	$1.6e^{-4}$	0.34	$1.7e^{-15}$
	2	4	$W = 1.8 \cdot L^{-0.062} \cdot V^{1.0}$	0.20	$6.1e^{-6}$	0.14	$2e^{-16}$
	4	2	$W = 1.3 \cdot L^{0.19} \cdot V^{1.4}$	0.59	0.0015	0.0019	$1.2e^{-15}$
	5	1	$W = 4.6 \cdot L^{-0.0053} \cdot V^{0.93}$	0.86	$6.8e^{-4}$	0.93	$7.7e^{-13}$

表 5.3 表現に関する情報を与えない場合の実験結果

(a) エッジが長いほど重みも大きいグラフ

表現	基準エッジ の範囲		回帰式	残差 標準誤差	t 検定の p 値		
	長さ	太/明			<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
太さ	1	1	$W = 0.034 \cdot L^{0.84} \cdot V^{0.051}$	1.0	0.057	$1.2e^{-13}$	0.33
	2	2	$W = 0.091 \cdot L^{0.98} \cdot V^{0.019}$	0.59	0.095	$2.4e^{-15}$	0.70
	4	4	-				
	5	5	$W = 0.0030 \cdot L^{1.0} \cdot V^{0.046}$	0.20	0.073	$3.0e^{-16}$	0.26
	1	5	$W = 0.010 \cdot L^{0.90} \cdot V^{0.18}$	1.5	0.58	0.0084	0.20
	2	4	$W = 0.085 \cdot L^{0.42} \cdot V^{0.17}$	0.86	0.47	0.092	0.43
	4	2	$W = 0.081 \cdot L^{0.31} \cdot V^{0.46}$	0.73	0.30	0.063	0.043
	5	1	$W = 0.015 \cdot L^{0.54} \cdot V^{0.92}$	1.22	0.45	0.025	0.0015
明度	1	1	$W = 0.026 \cdot L^{0.92} \cdot V^{0.0098}$	0.88	0.023	$2e^{-16}$	0.79
	2	2	$W = 0.012 \cdot L^{0.92} \cdot V^{-0.059}$	0.35	0.0049	$2e^{-16}$	0.025
	4	4	$W = 0.0057 \cdot L^{0.054} \cdot V^{0.01}$	0.14	$7.9e^{-4}$	$2e^{-16}$	0.63
	5	5	$W = 0.0033 \cdot L^{1.0} \cdot V^{0.014}$	0.15	0.012	$2e^{-16}$	0.63
	1	5	-				
	2	4	$W = 0.011 \cdot L^{0.89} \cdot V^{0.048}$	0.34	0.11	$1.9e^{-9}$	0.12
	4	2	$W = 0.016 \cdot L^{0.80} \cdot V^{0.063}$	0.25	0.12	$3.2e^{-8}$	0.28
	5	1	$W = 1.5 \cdot L^{0.046} \cdot V^{0.67}$	0.74	0.15	0.73	0.0013

(b) エッジが短いほど重みは大きいグラフ

表現	基準エッジの範囲		回帰式	残差標準誤差	t 検定の p 値		
	長さ	太/明			a	b	c
太さ	1	1	$W = 0.18 \cdot L^{0.087} \cdot V^{0.96}$	1.1	0.042	0.21	$3.7e^{-10}$
	2	2	$W = 0.094 \cdot L^{0.065} \cdot V^{0.14}$	0.66	0.053	0.34	$3.6e^{-10}$
	4	4	$W = 0.030 \cdot L^{-0.10} \cdot V^{1.5}$	0.35	0.12	0.25	$1.7e^{-9}$
	5	5	$W = 0.044 \cdot L^{0.086} \cdot V^{0.89}$	0.25	0.081	0.37	$2.2e^{-8}$
	1	5	$W = 0.043 \cdot L^{0.012} \cdot V^{1.0}$	0.11	$1.4e^{-4}$	0.75	$2e^{-16}$
	2	4	$W = 0.11 \cdot L^{-0.11} \cdot V^{0.98}$	0.14	$5.3e^{-4}$	0.0052	$2e^{-16}$
	4	2	$W = 0.10 \cdot L^{-0.013} \cdot V^{1.1}$	0.37	0.0084	0.76	$2e^{-16}$
	5	1	$W = 0.77 \cdot L^{-0.14} \cdot V^{0.86}$	0.96	0.0052	0.0077	$3.1e^{-12}$
明度	1	1	$W = 1.4 \cdot L^{0.15} \cdot V^{0.41}$	1.2	0.042	0.12	$2.8e^{-4}$
	2	2	$W = 3.0 \cdot L^{-0.010} \cdot V^{1.0}$	0.48	$1.0e^{-4}$	0.83	$1.1e^{-13}$
	4	4	$W = 1.4 \cdot L^{0.0011} \cdot V^{0.90}$	0.24	$2.0e^{-4}$	0.98	$7.3e^{-15}$
	5	5	$W = 0.45 \cdot L^{0.14} \cdot V^{0.81}$	0.18	0.0032	0.029	$2.3e^{-11}$
	1	5	$W = 0.82 \cdot L^{0.023} \cdot V^{0.67}$	0.15	$4.0e^{-5}$	0.60	$4.0e^{-13}$
	2	4	$W = 1.9 \cdot L^{-0.094} \cdot V^{0.82}$	0.17	$3.8e^{-5}$	0.041	$2e^{-16}$
	4	2	$W = 7.2 \cdot L^{-0.21} \cdot V^{1.0}$	0.58	$6.4e^{-4}$	$8.6e^{-4}$	$9.9e^{-12}$
	5	1	$W = 3.7 \cdot L^{-0.013} \cdot V^{0.85}$	0.64	$9.9e^{-5}$	0.79	$7.9e^{-14}$

(c) 長さ結びつけづらいつらいつらグラフ

表現	基準エッジの範囲		回帰式	残差標準誤差	t 検定の p 値		
	長さ	太/明			a	b	c
太さ	1	1	$W = 0.16 \cdot L^{0.12} \cdot V^{0.97}$	1.7	0.14	0.17	$1.2e^{-6}$
	2	2	$W = 0.035 \cdot L^{0.064} \cdot V^{1.4}$	0.47	0.026	0.25	$2e^{-16}$
	4	4	$W = 0.036 \cdot L^{0.0098} \cdot V^{1.2}$	0.15	0.0035	0.84	$2e^{-16}$
	5	5	$W = 0.042 \cdot L^{0.0020} \cdot V^{1.1}$	0.16	0.012	0.97	$1.0e^{-13}$
	1	5	$W = 0.076 \cdot L^{-0.25} \cdot V^{0.95}$	0.13	$1.1e^{-4}$	0.56	$2e^{-16}$
	2	4	$W = 0.089 \cdot L^{-0.36} \cdot V^{0.94}$	0.20	0.0040	0.50	$2e^{-16}$
	4	2	$W = 0.12 \cdot L^{0.044} \cdot V^{0.93}$	0.38	0.010	0.39	$4.0e^{-13}$
	5	1	$W = 0.21 \cdot L^{0.026} \cdot V^{1.0}$	1.0	0.023	0.66	$7.0e^{-12}$
明度	1	1	$W = 1.2 \cdot L^{0.22} \cdot V^{0.90}$	0.67	0.0041	0.0014	$2.0e^{-13}$
	2	2	$W = 3.2 \cdot L^0 \cdot V^{1.2}$	0.67	0.0022	1.00	$4.6e^{-13}$
	4	4	$W = 1.1 \cdot L^{0.011} \cdot V^{0.54}$	0.20	$1.3e^{-5}$	0.80	$6.7e^{-12}$
	5	5	$W = 0.58 \cdot L^{0.11} \cdot V^{0.92}$	0.14	$1.0e^{-4}$	0.020	$2e^{-16}$
	1	5	$W = 0.72 \cdot L^{0.084} \cdot V^{0.69}$	0.20	$2.1e^{-4}$	0.11	$8.1e^{-14}$
	2	4	$W = 0.52 \cdot L^{0.17} \cdot V^{0.67}$	0.20	$1.5e^{-5}$	$2.6e^{-4}$	$7.8e^{-16}$
	4	2	$W = 1.5 \cdot L^{0.086} \cdot V^{0.87}$	0.87	0.095	0.46	$1.2e^{-5}$
	5	1	$W = 1.8 \cdot L^{0.12} \cdot V^{0.90}$	0.88	0.0099	0.11	$3.0e^{-8}$

5.6 考察

今回の実験では、実験結果が式(4)の形で回帰可能であると仮定し、分析を行った。その結果、式(4)に加えて、式(5-a)及び式(5-b)の形を持つ回帰式が導出された。それぞれの実験結果について考察していく。

$$W(L,V) = a \cdot V^c \quad (5-a)$$

$$W(L,V) = a \cdot L^b \quad (5-b)$$

5.6.1 エッジが長いほど重みも大きいグラフ

実験 2 では式(4)内の a, b, c で表される係数に対して t 検定を行ったが、表現に関する情報を与えた場合については、多くの回帰曲線において長さ L に掛かる係数 b の p 値が高く、帰無仮説を棄却できなかった。そのため、式(5-a)の形をとるものも多い結果となった。一方、表現に関する情報を与えなかった場合では、太さまたは明度の変数 V に掛かる係数 c の p 値が高く、式(5-b)となるものも多かった。この結果から、閲覧者の多くは潜在的にエッジの長さが距離という重みを持っているものと考えているが、明示的に太さまたは明度が重みを表現していると示すことで概ねエッジの長さによる影響を無視できるものといえる。また、表現に関する情報の有無による読み取り精度は、使用するエッジ表現により違いが現れた。太さの表現を使用した場合、情報を与えた方が残差標準誤差は小さくなった。これに対して明度の表現を用いた場合には情報を与えなかった方が小さい誤差となった。

表現に関する情報を与えた場合について、基準エッジの太さまたは明度が同じもの同士を比べたところ、どちらの表現を使用した場合も基準エッジの長さと同士の範囲が同じものの方が残差標準誤差は小さいものとなった。ここで、基準エッジの長さと同士の範囲が同じ、とは短く細い（明るい）または長く太い（暗い）エッジを基準として回答エッジについて答えてもらった場合である。基準エッジの長さと同士の範囲が異なる場合は、短く太い（暗い）または長く細い（明るい）エッジを基準としている。この結果から、閲覧者は長さと同士の対応によって重みの読み取りに何らかの影響を受けていることが伺える。また、最も残差標準誤差が小さくなる基準エッジは、長く太い（暗い）エッジであった。このことから、閲覧者は短く細い（明るい）エッジから長く太い（暗い）エッジの違いを読み取るよりも、長く太い（暗い）エッジから短く細い（明るい）エッジを読み取る方がばらつきは小さいとわかる。加えて、太さと明度の表現についても残差標準誤差を比べると、太さの表現の方が小さい結果となった。つまり、エッジが長いほど重みも大きいグラフにおいては、表現に関する情報を与えた上で太さの表現を使用することが望ましい。

5.6.2 エッジが短いほど重みは大きいグラフ

エッジが短いほど重みは大きいグラフについても同様に見ていくと、表現に関する情報を与えた場合は、どちらの表現を用いた場合も殆どの回帰曲線において係数 b に対する t 検定の p 値が大きく、式(5-a)の形となった。一方、情報を与えなかった場合については、長さ L の影響を無視できるものとそうでないものが含まれる結果となった。閲覧者に重みを表現しているエッジ表現について説明しておくことで、より確実に長さの影響を排除することがで

きるといえる。表現に関する情報の有無による読み取り精度に関して太さを用いた表現では、基準エッジの長さと同様の範囲が同じ場合、表現に関する情報を与えた場合の方が残差標準誤差は小さくなった。しかし、基準エッジの長さと同様の範囲が異なる場合、情報を与えない方が誤差は小さい結果となった。この結果から、基準となるエッジの長さと同様の範囲の対応によって閲覧者は影響を受けるものと考えられる。一方、明度を用いた表現では、基準エッジによる違いは見られなかった。

5.6.1と同様に、表現に関する情報を与えた場合について基準エッジの長さと同様の範囲（明度）の範囲が同じ場合とそうでない場合について比較する。太さを用いた表現では、範囲が同じ場合の方が残差標準誤差は小さい。しかしながら、明度の表現では概ね範囲が異なる方が誤差は小さい結果となった。太さの表現においては、長いほど太い、短いほど細い、という対応が直感的であるのに対し、明度の表現では長いほど明るい、細いほど暗い、という組み合わせが被験者にとって違和感のない表現だったものと考えられる。なお、太さの表現において残差標準誤差が最も小さかったのは長く太いエッジを基準としたものであった。一方、明度の表現では短く暗いエッジが最も誤差は小さかった。この2つを比較すると、概ね同じ残差標準誤差を示しており、同程度の精度があるといえる。

5.6.3 長さと同様の範囲と結びつけづらいグラフ

長さと同様の範囲と結びつけづらい意味を持つグラフについては、表現に関する情報を与えた場合も与えなかった場合も概ね長さの影響が無視され、式(5-a)の形となった。言い換えれば、エッジの長さは重みと無関係であると伝えなくとも、閲覧者自身がそのように判断してグラフを見ているのだといえる。表現に関する情報の有無による読み取り精度については、5.6.2と同様の結果となった。太さを用いた表現では、基準エッジの長さと同様の範囲が同じ場合、表現に関する情報を与えた方が残差標準誤差は小さく、基準エッジの長さと同様の範囲が異なる場合、情報を与えない方が誤差は小さい。また、明度を用いた表現では、基準エッジによる違いは見られなかった。

表現の情報を与えた場合に限定して見ていくと、太さの表現では、基準エッジの長さと同様の範囲が同じ場合の方が残差標準誤差は小さい結果となった。これは、エッジが短いほど重みは大きいグラフと同じ結果である。その一方で、明度を用いた表現では規則性は見られなかった。加えて、太さの表現では長く太いエッジを基準とした時、最も残差標準誤差が小さくなった。一方、明度の表現では短く暗いエッジが最も誤差は小さかった。この2つを比較すると、太さの表現を用いたほうが残差標準誤差は小さい。つまり、太さの表現を用いることで閲覧者毎の読み取りのばらつきを抑えた表現が可能になる。

第6章 議論

本章では、2つの実験結果及びその考察を元に作成した、重み付きグラフを連結図として表現するためのガイドラインについて述べる。また、実験の中で得られた知見についても紹介する。

6.1 視覚変数を決めるためのガイドライン

エッジの表現に関する情報を被験者に与えた場合の実験結果（表 5.2）を見ていくと、同じグラフの意味と表現を使用した際、複数の回帰式の中で太さまたは明度の変数 V に掛かる係数 c が近い値であることに気づく。多くの回帰式は長さ L の影響を無視できるため、式(5-a)を参考に式(6)が成り立つのではないかという仮説を建てた。式(6)では、回帰式全体に掛かる比例定数 a が基準エッジの太さ（明度）の値 v によって変化する変数 $a(v)$ であると考えた。実験結果から変数 $a(v)$ を導出し、回帰式へ当てはめたものを表 6.1 に示す。今回は、太さと明度の実験結果を比較し、残差標準誤差が小さかった方を採用しているが、親密度を重みとしたグラフについては誤差に大きな違いが見られなかったため、太さと明度の両方について計算した。

$$W(V, v) = a \cdot V^c = a(v) \cdot V^c \quad (6)$$

表 6.1 エッジの太さ（明度）から重みを導出する式

グラフの意味	表現	回帰式
距離	太さ	$W(V, v) = (-0.0034 v + 0.10) \cdot V^{1.0}$
親密度	太さ	$W(V, v) = (-0.0083 v + 0.18) \cdot V^{1.1}$
	明度	$W(V, v) = (-3.1 v + 3.6) \cdot V^{0.87}$
輸送量	太さ	$W(V, v) = (-0.0024 v + 0.098) \cdot V^{1.0}$

本研究で開発を目指しているガイドラインは、予めグラフィックレイアウトが決定されている連結図である。ノードの位置やエッジの長さが決められた上で各エッジが持つ重みをどのように表現するか、という課題に取り組んでいる。そこで、実際に使用されることを考えて表 6.1 の式を表 6.2 の様に変形し、ガイドラインとして示す。連結図の設計者は、表現したいグラフが 3.3 で示した 3 種類の内のどれに属するかを調べ、その上で使用するエッジ表現を決定する。その後、該当する回帰式を使用し、重み 1.0 とするエッジの太さ（明度）と表現したい重みから各エッジの表現を導出していくことで連結図全体を完成させることができる。

表 6.2 エッジ表現の値を導出する式

グラフの意味	表現	回帰式
長さに正の相関	太さ	$V(v, W) = \frac{W}{-0.0034v + 0.10}$
長さに負の相関	太さ	$V(v, W) = \left(\frac{W}{-0.0083v + 0.18} \right)^{0.91}$
	明度	$V(v, W) = \left(\frac{W}{-3.1v + 3.6} \right)^{1.1}$
長さとは無関係	太さ	$V(v, W) = \frac{W}{-0.0024v + 0.098}$

6.2 長さの違いによる影響

表 5.2 及び表 5.3 では、被験者に対して「この連結図は太さ（明度）を用いてエッジの重みを表現している」と伝えた場合と伝えなかった場合の実験結果をまとめた表である。表現に関する情報を与えずにエッジが長いほど重みも大きいグラフについて調べた表 5.3(a)ではエッジの長さの影響を強く受ける回帰曲線が多く導出された。しかし、その他の実験結果からは概ね長さを無視できる回帰式が見られた。つまり、エッジが長いほど重みも大きいグラフ以外であれば、エッジの長さは無視して考えても問題なく、長さの影響を受ける場合であっても予めどの表現がエッジの重みを表しているのか示すことでこの影響を無効化することができる。

ここで、今回の実験の被験者は全て大学生及び大学院生であるが、その多くは情報系の学生であった。彼らにとって連結図は比較的身近な表現であり、本来エッジの長さが意味を持たないことを知っていたと考えられる。そのため、比較的長さに対応付けしやすい重みが距離のグラフについては長さの違いを読み取ったものの、その他のグラフに対しては被験者個人が頭の中で長さを無視するように補正を加えていた可能性がある。今回の被験者とは経歴の全く異なる被験者を対象として実験を行うと新たな知見が得られるのかもしれない。

6.3 重みの読み取り精度

Mackinlay によると、視覚変数の読み取り精度は位置が最も良く、次いで長さが優れている。そして濃淡が最も精度は低い。本研究のエッジ表現に当てはめると、エッジの長さとは太さは長さの視覚変数であり、エッジの明度は濃淡である。そのため、Mackinlay の主張が連結図という環境下においても認められるのであれば、4 章で行った視覚変数毎の特性を調べた実験において、長さとは太さ、と明度の間に精度の違いが生じるはずである。ここで、表 6.3 に実験 1 で得られた残差標準誤差の内、書く表現毎に最も小さい値を示したものをまとめた。3 種類のグラフの意味についてそれぞれ見ていくと、どのグラフの意味においても、長さ、太さ、明度、または太さ、長さ、明度の順に残差標準誤差は小さい。つまり、既存研究と同様の結果を得ることができ、Mackinlay の主張は連結図においても正しいといえる。

表 6.3 各視覚変数の最良な残差標準誤差

	距離のグラフ	親密度のグラフ	輸送量のグラフ
長さ	0.13	0.12	0.074
太さ	0.093	0.092	0.093
明度	0.16	0.14	0.16

第7章 まとめ

本論文では、エッジに重みを持つグラフを連結図で表現する際の、重みの読み取られ方について述べてきた。特に、長さが自由に制御できない状況において、表現したい重みに対する他の視覚変数（太さや明度）の決定の仕方を定式化し、ガイドラインとしてまとめることを目的とし、2つの実験を行った。1つ目の実験では、長さや太さ、明度の視覚変数をエッジに対して単独で使用した場合について調査を行った。2つ目の実験では、長さが統一されていない、一般的な連結図を想定し、長さや太さ、または長さや明度がエッジ毎に異なる連結図について、エッジの重みがどの程度に読み取れるかを調べた。その結果、エッジが長いほど重みを大きく感じるグラフの意味については、閲覧者に重みと表現の対応について伝えなかった場合、エッジの長さから重みを読み取ろうとする傾向が見られた。その他のグラフの意味については、重みと表現の対応に関する情報の有無に関わらず概ね長さを無視して読み取っているという結果を得た。これを踏まえて、我々は実際の利用シーンを想定したガイドラインを提案した。このガイドラインでは、既存のレイアウト手法などによってエッジ長が決められ、表現したい重みが分かっている場合について、エッジの視覚変数をどのように与えるべきか指針を与えた。加えて、実験1の結果から明度よりも長さまたは太さの方が残差標準誤差は小さく、読み取り精度が高いことがわかった。これは視覚変数に関する既存研究と同じ結果であり、連結図という環境下においても同様の性質が認められることを示した。

本研究では2度の実験を実施し、それぞれの実験では30人の被験者に対して1度に100回程度のタスクをこなしてもらった。この回数は被験者の負担も考慮し、1度の実験が30分程度で終わるように設計したものであるが、より多くの実験データを集めることで実験結果の信頼性を高めることができるのではないかと考えている。また、今回の実験ではエッジの長さに注目し、代表的な太さと明度の表現を用いて重みを表現するためのガイドラインを作成したが、エッジ表現には多くの種類が存在する。例えば色相を使った表現や、エッジの形状を変化させる破線や波線といった表現で重みを表現することも可能である。将来的にはこのような様々なエッジ表現についても同様の実験を通してまとめていきたい。加えて、エッジの向きを表現するためのガイドラインをまとめた既存研究があるが、重み付き有向グラフについては研究されておらず、本研究の成果と組み合わせることで新たな知見が生まれるのではないかと期待している。

謝辞

本研究を行うに当たり、指導教員である三末和男准教授には熱心かつ丁寧なご指導を賜りました。研究チームのゼミやミーティングを繰り返す中で、自分の中で不明瞭だった点や誤っていた点について多くの気付きを与えていただきました。今回の実験を実施し、本論文としてまとめることが出来たのは准教授のご指導のおかげです。心より感謝いたします。

また、田中二郎教授、高橋伸准教授、志築文太郎准教授、嵯峨智准教授、**Simona Vasilache** 助教にも、研究室のゼミを通してたくさんの助言やご指摘をいただきました。時には厳しいご指摘もいただきましたが、それ以上に多くの貴重なご意見を賜り、研究の発展へつなげることが出来ました。深く感謝いたします。

インタラクティブプログラミング研究室の皆様には、研究活動だけでなく日常生活も含め、大変お世話になりました。特に **NAIS** チームの皆様にはゼミの中で多くのご意見をいただきました。その中には著者が一人で考えていただけでは思いつくこともなかった、新しい視点も含まれ、研究に対する視野が広がりました。本当にありがとうございました。

実験にご参加いただきました皆様にも感謝しております。皆様のご協力くださったおかげで2つの実験をやり遂げることができました。そして、実験の中で頂いたたくさんのコメントが本研究をより密なものへと発展させる手助けとなりました。厚く御礼申し上げます。

最後になりますが、大学生活を送るに当たりお世話になった全ての方々に深く感謝いたします。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] J. Bertin, *Semiology of Graphics: Diagrams, Networks, Maps*, University of Wisconsin Press, 1984.
- [2] J. Mackinlay, *Automating the Design of Graphical Presentations of Relational Information*, *ACM Trans. of Graphics*, Vol. 5, No. 2, pp.110-141, 1986.
- [3] N. Boukhelifa, A. Bezerianos, T. Isenberg and J.-D. Fekete, *Evaluating Sketchiness as a Visual Variable for the Depiction of Qualitative Uncertainty*, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No. 12, pp. 2769-2778, 2012.
- [4] J. Wood, P. Isenberg, T. Isenberg, J. Dykes, N. Boukhelifa and A. Slingsby, *Sketchy Rendering for Information Visualization*, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No.12, pp. 2749-2758, 2012.
- [5] S. Haroz and D. Whitney, *How Capacity Limits of Attention Influence Information Visualization Effectiveness*, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 18, No.12, pp. 2402-2410, 2012.
- [6] C. Collberg, S. Kobourov, J. Nagra, J. Pitts and K. Wampler, *A System for Graph-Based Visualization of the Evolution of Software*, In *Proceedings of the 2003 ACM symposium on Software visualization*, pp. 77-88, 2003.
- [7] S. Epskamp, A. O. J. Cramer, L. J. Waldorp, V. D. Schmittmann and D. Borsboom, *qgraph: Network Visualizations of Relationships in Psychometric Data*, *Journal of Statistical Software*, Vol 48, No. 4, pp. 1-18, 2012.
- [8] F. van Ham, H. J. Schulz and J. M. Dimicco, *Honeycomb: Visual Analysis of Large Scale Social Networks*, *INTERACT 2009*, pp. 429-442, 2009.
- [9] E. R. Tufte, *The Visual Display of Quantitative Information*, Graphics Press. Chesire, Conneticut, 2001.
- [10] W. Tobler, *Experiments in Migration Mapping by Computer*, *Cartography and Geographic Information Science*, Vol. 14, No. 2, pp. 155-163, 1987.
- [11] D. Phan, L. Xiao, R. Yeh, P. Hanrahan and T. Winograd, *Flow Map Layout*, *IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 219-224, 2005.
- [12] K. Verbeek, K. Buchin and B. Speckmann, *Flow Map Layout via Spiral Trees*, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 17, No. 12, pp. 2536 – 2544, 2011.
- [13] W. Ke, K. Börner and L. Viswanath, *Major Information Visualization Authors, Papers and Topics in the ACM Library*, *IEEE Symposium on Information Visualization*, 2004.

- [14] T.-H. Huang and M. L. Huang, Analysis and Visualization of Co-authorship Networks for Understanding Academic Collaboration and Knowledge Domain of Individual Researchers, International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization, pp. 18-23, 2006.
- [15] S. Gerhard, A. Daducci, A. Lemkaddem, R. Meuli, J.-P. Thiran and P. Hagmann, The Connectome Viewer Toolkit: an open source framework to manage, analyze, and visualize connectomes, *Frontiers in Neuroinformatics*, Vol. 5, 2011.
- [16] S. Achard, R. Salvador, B. Whitcher, J. Suckling and E. Bullmore, A Resilient, Low-Frequency, Small-World Human Brain Functional Network with Highly Connected Association Cortical Hubs, *The Journal of Neuroscience*, Vol. 26, No. 1, pp. 63-72, 2006.
- [17] P. Hagmann, L. Cammoun, X. Gigandet, R. Meuli, C. J. Honey, V. J. Wedeen and Olaf Sporns, Mapping the Structural Core of Human Cerebral Cortex, *PLoS Biol*, Vol. 6, No. 7, 2008.
- [18] B. Alper, B. Bach, N. H. Riche, T. Isenberg, and J.-D. Fekete, Weighted Graph Comparison Techniques for Brain Connectivity Analysis, *Proceedings of the Annual Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 483-492, 2013.
- [19] M. Wattenberg, Arc diagrams: Visualizing structure in strings, *IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 110-116, 2002.
- [20] C. Chen, F. Ibekwe-SanJuan, E. SanJuan, C. Weaver, Visual Analysis of Conflicting Opinions, *IEEE VAST*, pp. 59-66, 2006.
- [21] C. Weaver, D. Fyfe, A. Robinson, D. Holdsworth, D. Peuquet and A. M. MacEachren, Visual exploration and analysis of historic hotel visits, *Information Visualization*, Vol. 6, No. 1, pp. 89-103, 2007.
- [22] T. Nagel, E. Duval, A. V. Moere, K. Kloeckl and C. Ratti, Sankey Arcs - Visualizing edge weights in path graphs, *Eurographics Conference on Visualization*, pp. 1-5, 2012.
- [23] M. Wattenberg, Visual exploration of multivariate graphs, *SIGCHI conference on Human Factors in computing systems*, pp. 811-819, 2006.
- [24] M. Krzywinski, J. Schein, I. Birol, J. Connors, R. Gascoyne, D. Horsman, S. J. Jones and M. A. Marra, Circos: An information aesthetic for comparative genomics, *Genome Research*, Vol. 19, No. 9, pp. 1639-1645, 2009.
- [25] M. Ghoniem, J.-D. Fekete and P. Castagliola, A Comparison of the Readability of Graphs Using Node-Link and Matrix-Based Representations, *IEEE Symposium on Information Visualization*, pp. 17-24, 2004.
- [26] K. Marriott, H. Purchase, M. Wybrow and C. Goncu, Memorability of Visual Features in Network Diagrams, *IEEE Transactions on Visualization and Computer*

Graphics, Vol. 18, No.12, pp. 2477-2485, 2012.

- [27] A. Telea¹, O. Ersoyl, H. Hoogendorp¹ and D. Reniers, Comparison of Node-Link and Hierarchical Edge Bundling Layouts: A User Study, Dagstuhl Seminar Proceedings, No. 09211, Visualization and Monitoring of Network Traffic, 2009.
- [28] D. Holten and J. J. van Wijk, A User Study on Visualizing Directed Edges in Graphs, In Proceedings of international conference on Human factors in computing systems, pp. 2299-2308, 2009.
- [29] D. Holten, P. Isenberg, J. J. van Wijk, J.-D. Fekete, An Extended Evaluation of the Readability of Tapered, Animated, and Textured Directed-Edge Representations in Node-Link Graphs, IEEE Pacific Visualization Symposium, pp. 195-202, 2011.
- [30] K. Xu, C. Rooney, P. Passmore, D.-H. Ham and P. H. Nguyen, A User Study on Curved Edges in Graph Visualization, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 18, No.12, pp. 2449-2456, 2012.

付録 A 実験に用いた誓約書, 実験手順書
およびアンケート

重み付きグラフの視覚的表現に関する実験への協力をお願い

システム情報工学研究科 コンピュータサイエンス専攻
小林 愛実

研究の概要について

この研究は、重み付きグラフの適切な表現を探るためのものです。様々な表現を用いたグラフがどのように見えるかを実験によって調べ、個人差が少なく、人の直感に合った表現を見つけようという研究です。この研究は、大規模グラフを俯瞰するための表現の開発などへつながっていきます。ここでいう「グラフ」とは、物と物のつながり方を表したものです。

被験者の必要性、方法、その成果について

この研究は、人の知覚に関する研究ですので、人を実験参加者とした実験が必要になります。実験では、提示されるグラフを見て、特定のエッジと重みの対応について答えてもらいます。提示されるグラフでは全てのエッジに重みが与えられており、その重みが様々に表現されています。それぞれのグラフについて基準となるエッジとその重みが提示されるので、それを参考に回答を指示されたエッジの、重みと表現の対応を考えてください。万が一、実験中に気分が悪くなったり、頭が痛くなったりした場合は、直ちに実験を止めて、実験実施者に声をかけてください。

個人情報の保護について

学会・論文などでデータを発表する際は、データおよびそれを統計的に処理したものだけを用います。実験参加者を表現するためには、記号・数字を用います。個人を特定できる情報は公表しません。ただし、実験参加者全体については、性別の実験参加者数、年齢の範囲、所属、国籍を公表することがあります。

同意書

私は、重み付きグラフの視覚的表現に関する研究について、研究の概要、被験者の必要性、方法、その成果、危険の回避、個人情報の保護について十分な説明を受けました。

説明の際、本研究に協力することに同意しなくても何ら不利益を受けないこと、さらに、同意後も私自身の自由意思により不利益を受けず、いつでも撤回できることを聞きました。私は、このことを理解した上で被験者になることに同意します。

年 月 日

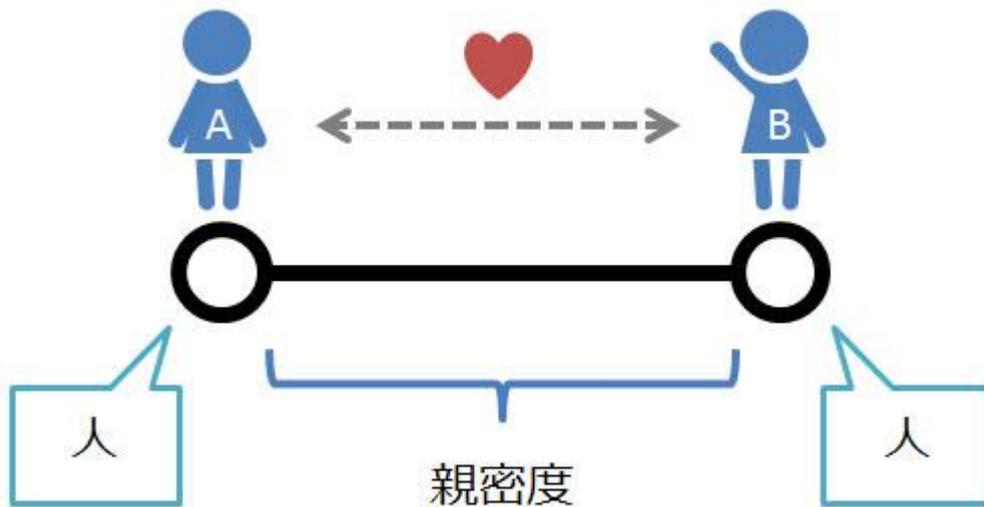
学籍番号 _____

署名 _____

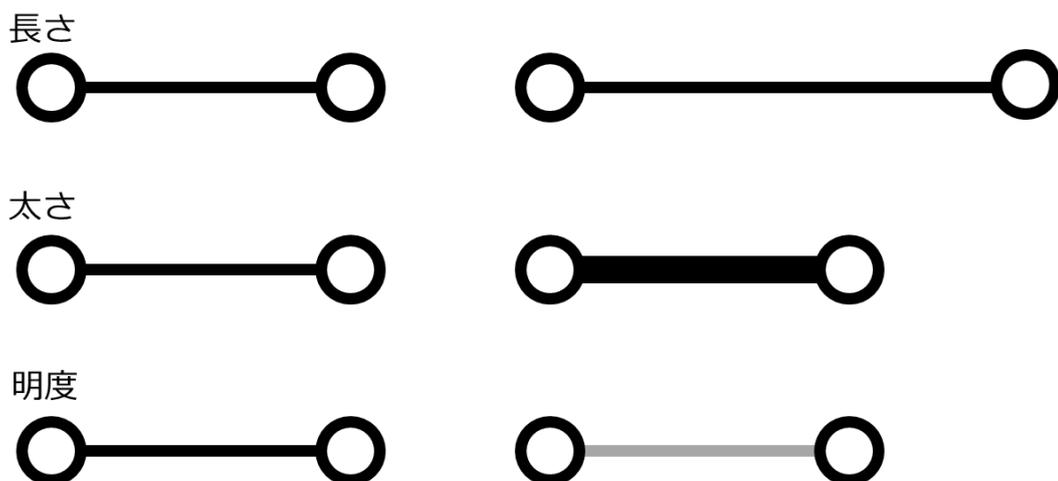
これから見ていただくグラフについて説明します。

< 親密度をあらわすグラフ >

各ノードは人を、各エッジは人同士の繋がりを、各エッジのもつ重みは親密度を表しています。親密度が高いほど重みは大きくなります。

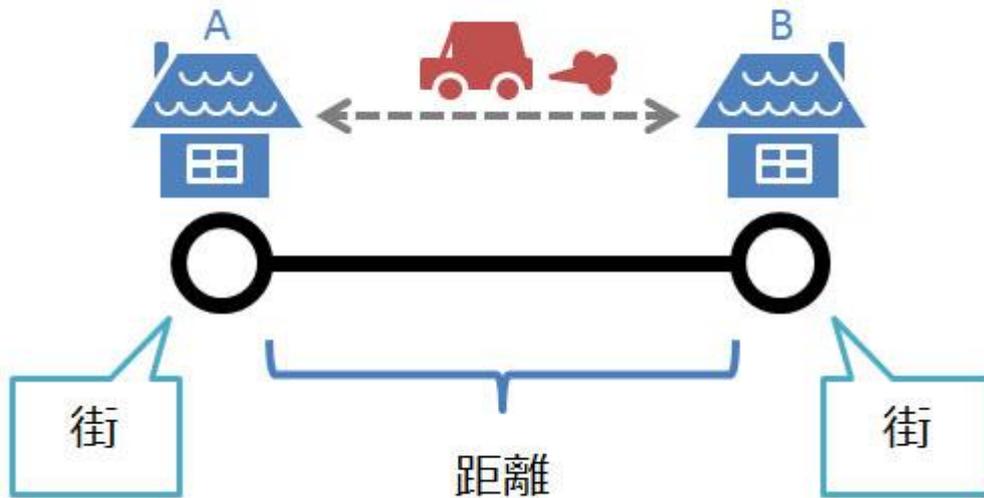


また、今回の実験ではエッジの重みを 3 種類の表現で表します。使用する表現は、“エッジの長さ”、“エッジの太さ”、“エッジの明度”です。1つのグラフに対して1つの表現のみを適用します。ですので、例えば長さの変化を用いたグラフでは、エッジの太さと明度は全て同じとなっています。



< 距離をあらわすグラフ >

各ノードは街を，各エッジは2つの街を結ぶ道を，各エッジのもつ重みは距離を表しています．距離が大きいほど重みは大きくなります．



また，今回の実験ではエッジの重みを 3 種類の表現で表します．使用する表現は，“エッジの長さ”，“エッジの太さ”，“エッジの明度”です．1つのグラフに対して1つの表現のみを適用します．ですので，例えば長さの変化を用いたグラフでは，エッジの太さと明度は全て同じとなっています．

長さ



太さ

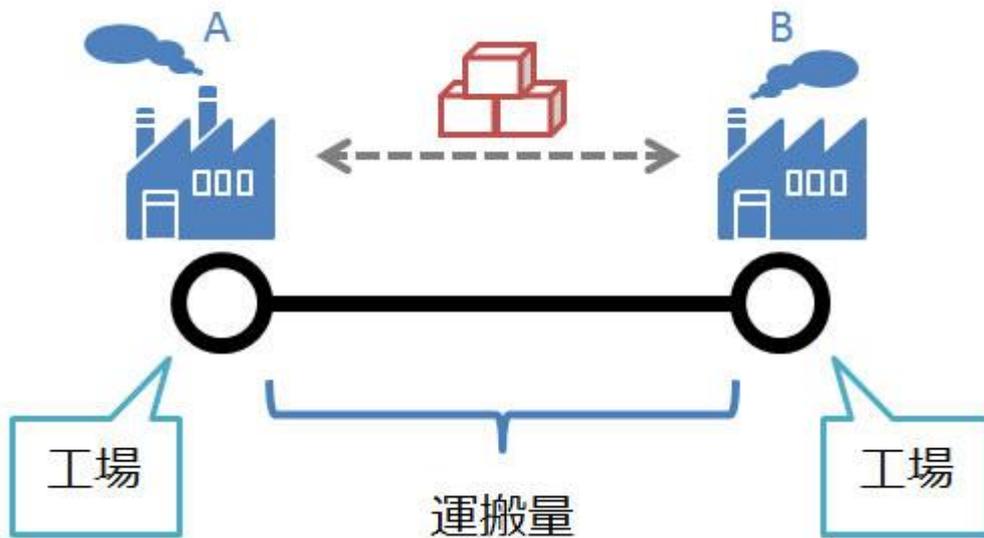


明度



< 運搬量をあらわすグラフ >

各ノードは工場を，各エッジは2つの工場間の物流を，各エッジのもつ重みは運搬量を表しています．運輸量が多いほど重みは大きくなります．



また，今回の実験ではエッジの重みを3種類の表現で表します．使用する表現は，“エッジの長さ”，“エッジの太さ”，“エッジの明度”です．1つのグラフに対して1つの表現のみを適用します．ですので，例えば長さの変化を用いたグラフでは，エッジの太さと明度は全て同じとなっています．

長さ



太さ

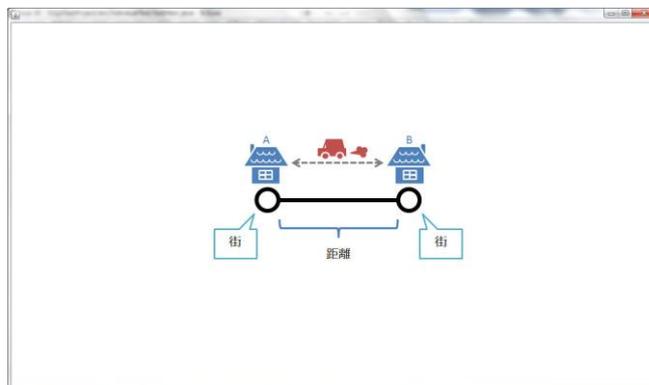


明度



これから表示されるグラフについて以下のタスクを行なってください。

まず、グラフの意味を説明する図が表示されます。



次に、実際の操作画面が表示されます。左側に重み付きグラフが描画され、右上にグラフの意味、右下に入力フォームが表示されます。

ノードが宿、エッジが道路を表し、エッジの重みは距離に対応します

青色ノードに挟まれたエッジの重みは 1.0 です
赤色ノードに挟まれたエッジの重みがどの程度に見えるか入力してください

このグラフは、各エッジに重みが付けられています。青色のノードには含まれたエッジは重みが **1.0** です。

また、グラフ内には赤く色付けされたノードが 2 つあります。このノードに挟まれたエッジに注目してください。先ほどの重みが 1.0 のエッジを基準として、このエッジの重みがどの程度に見えるかを、入力フォームに入力し、**next** ボタンを押してください。

エッジの重みは全て正の実数です。例えば、重み 3.0 程度に見えた場合、“3.0” と、重み 0.5 程度に見えた場合、“0.5” と入力してください。

本実験では、以上のタスクを複数のグラフに対して行っていただきます。

1. ご自身についてお答えください。

氏名	
性別 <input type="checkbox"/> 男 <input type="checkbox"/> 女	年齢 才
所属	国籍

2. 重み付きエッジの表現についてお答えください。

今回の調査では、“長さ”，“太さ”，“明度”の3つの表現を用いてエッジを表しました。エッジの各表現についてどのように感じたか教えてください。

	1	2	3	4	5
長さ					
	不適切		どちらでもない		適切
太さ					
明度					

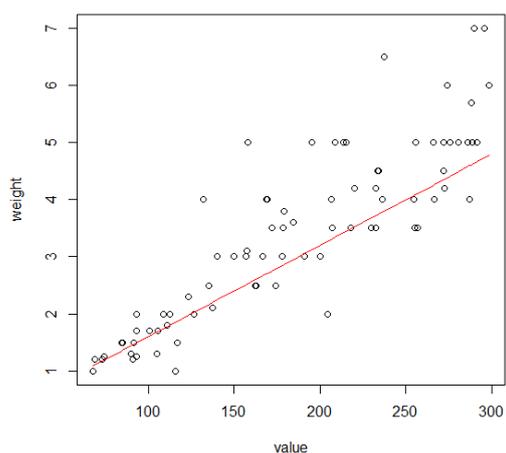
理由：

その他、本実験に関してご意見などありましたらご記入ください。

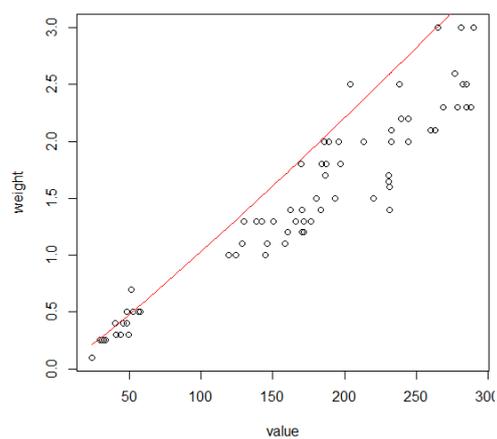
ご協力いただき、ありがとうございました。

付録 B 実験 1 の結果を表す散布図

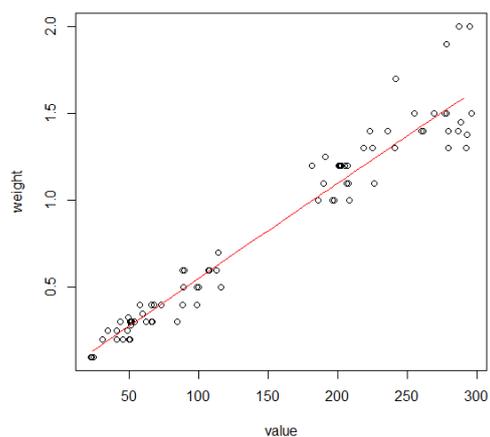
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（長さの表現）



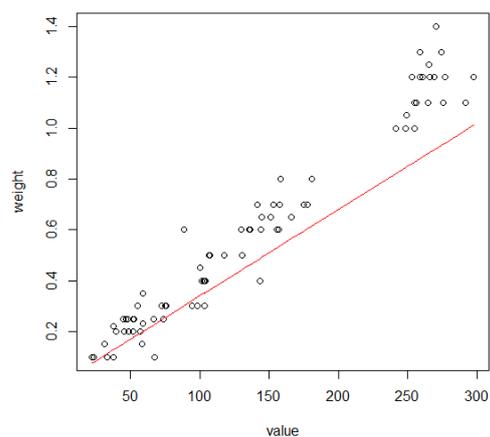
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



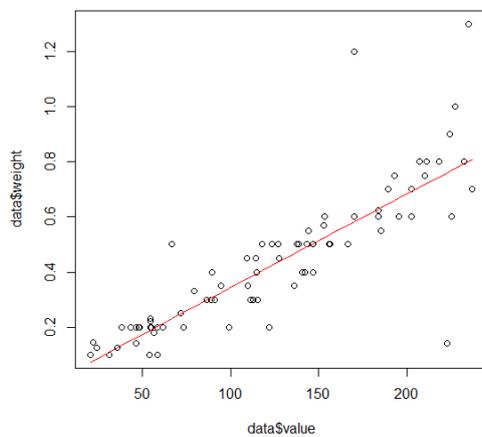
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

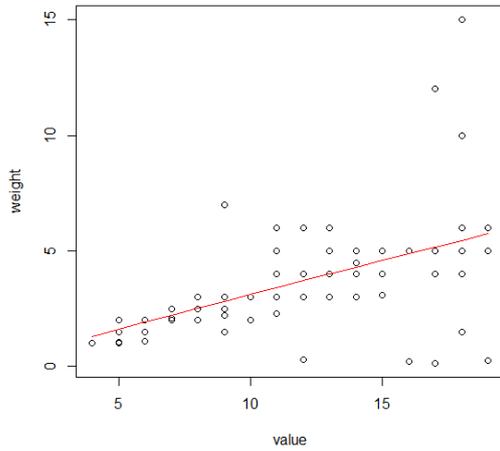


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

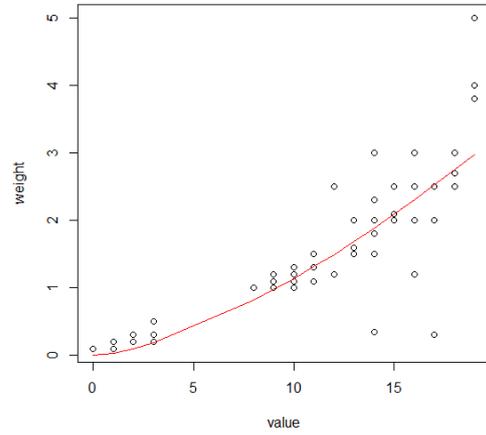


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

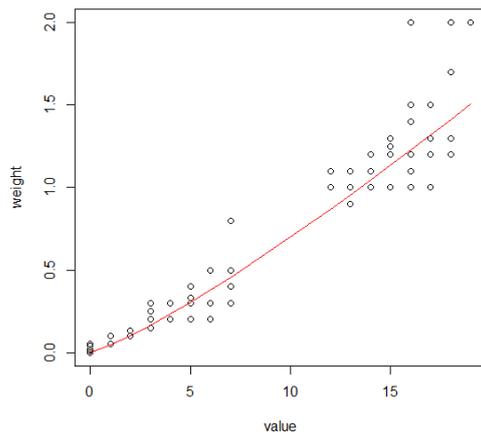
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（太さの表現）



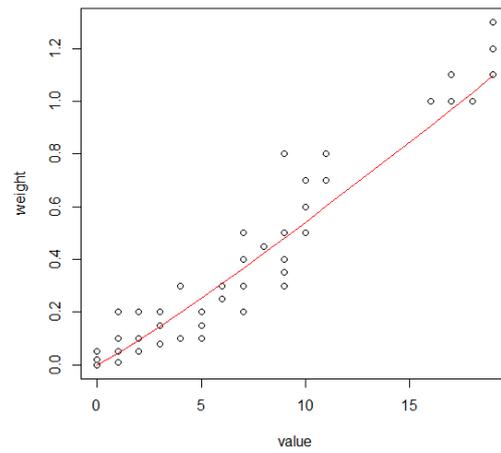
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



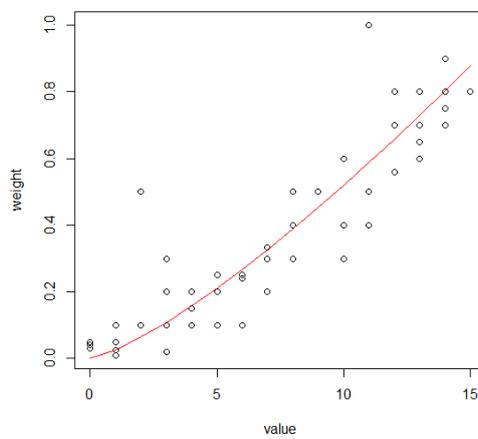
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

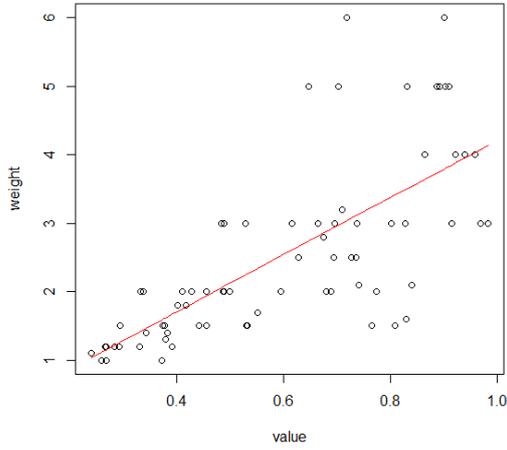


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

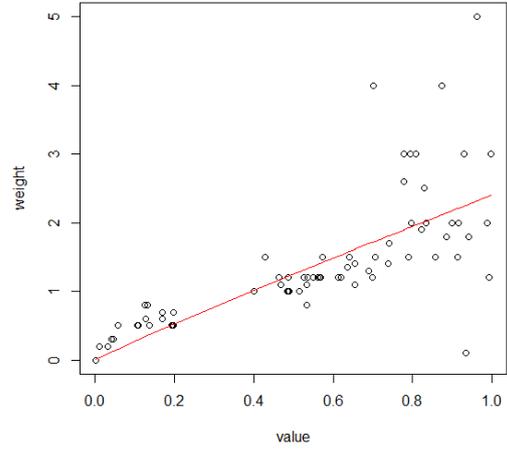


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

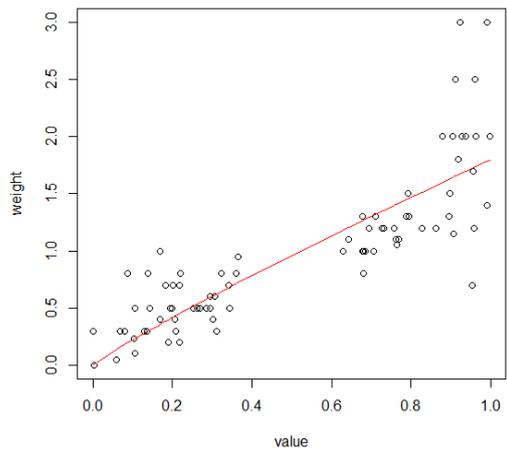
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（明度の表現）



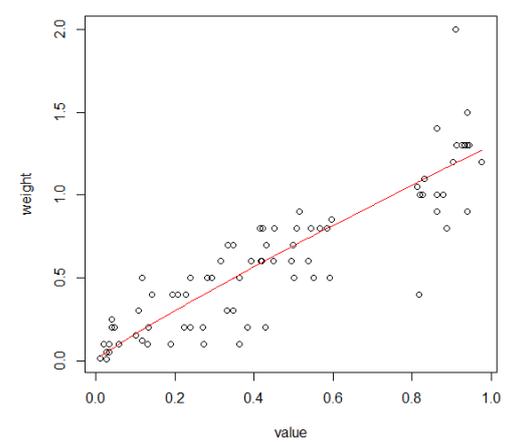
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



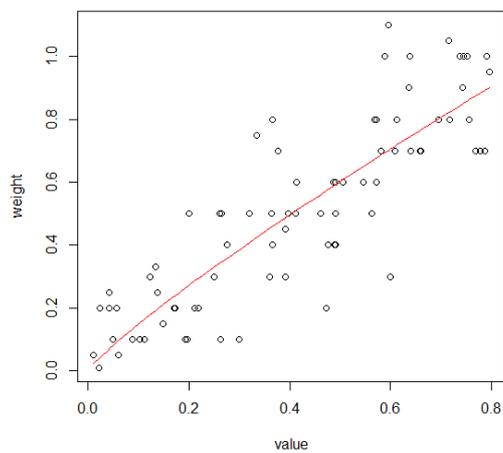
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

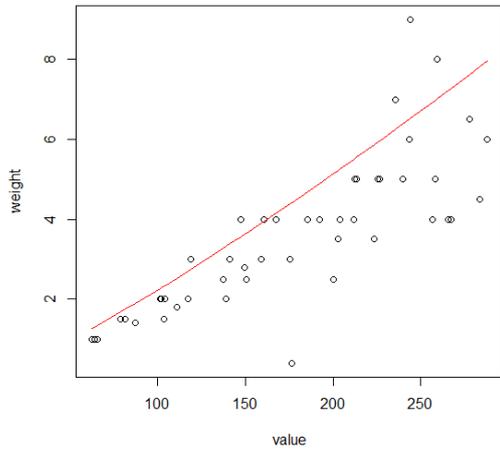


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

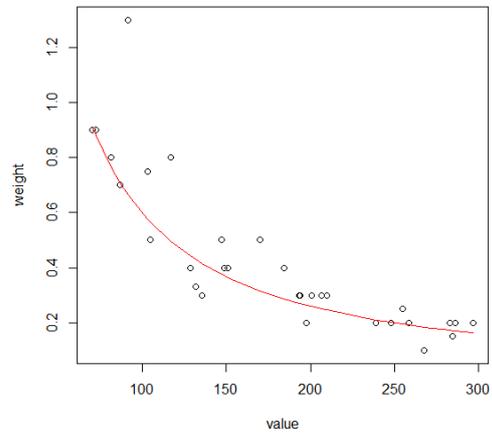


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

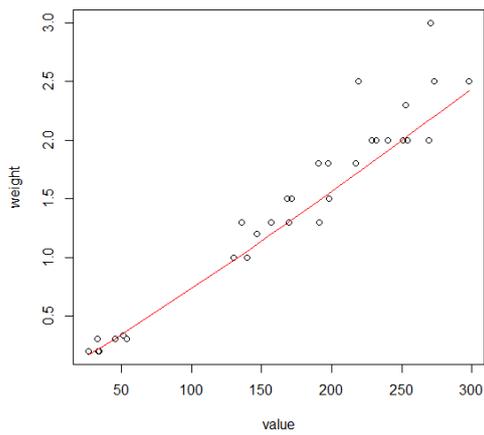
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（長さの表現）



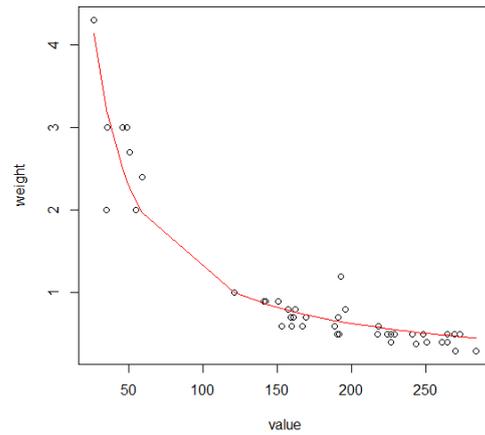
(a1) 基準エッジが範囲 1 の場合



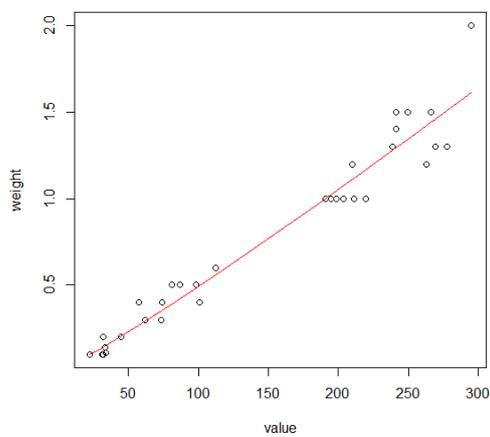
(a2) 基準エッジが範囲 1 の場合



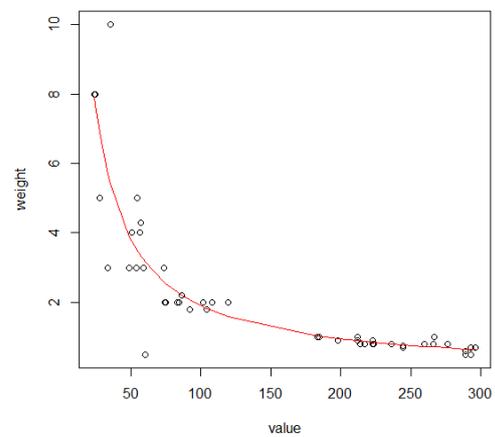
(b1) 基準エッジが範囲 2 の場合



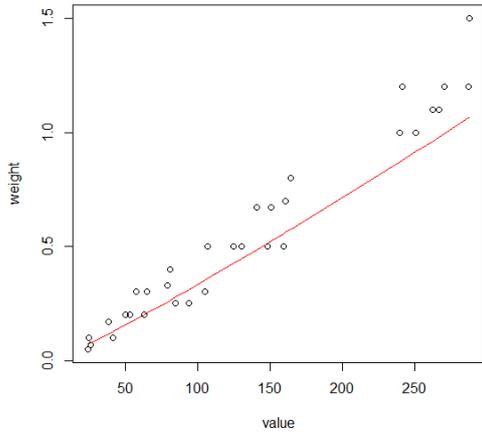
(b2) 基準エッジが範囲 2 の場合



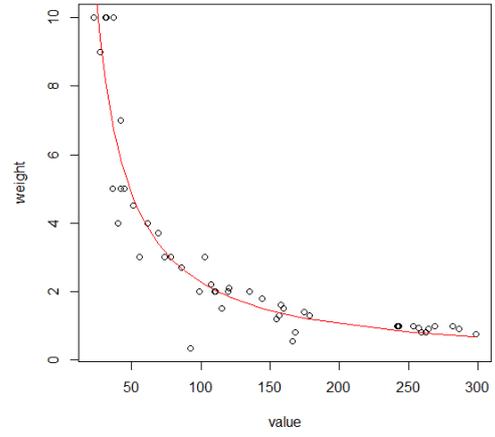
(c1) 基準エッジが範囲 3 の場合



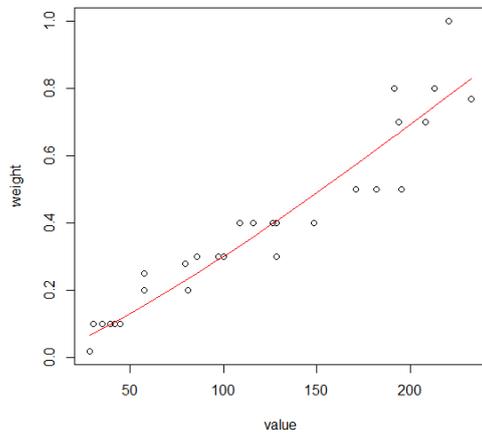
(c2) 基準エッジが範囲 3 の場合



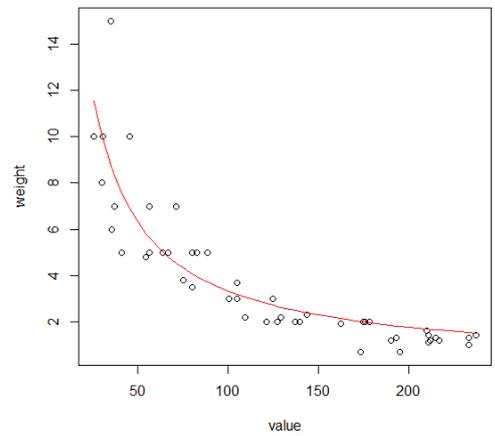
(d1) 基準エッジが範囲 4 の場合



(d2) 基準エッジが範囲 4 の場合

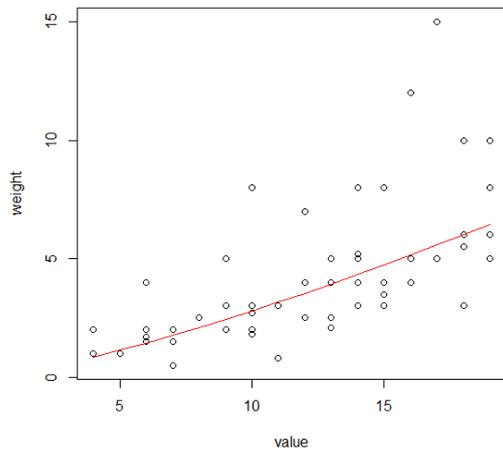


(e1) 基準エッジが範囲 5 の場合

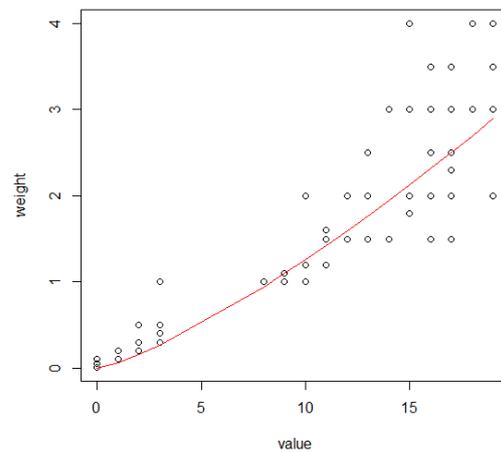


(e2) 基準エッジが範囲 5 の場合

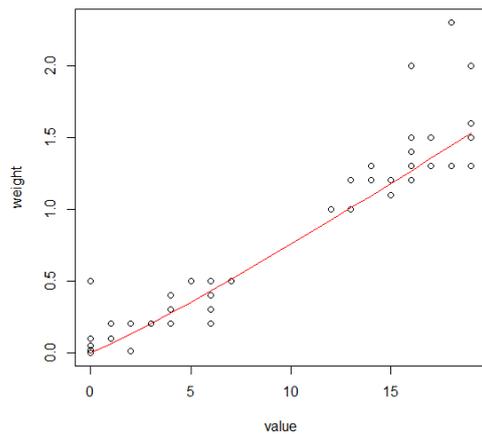
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（太さの表現）



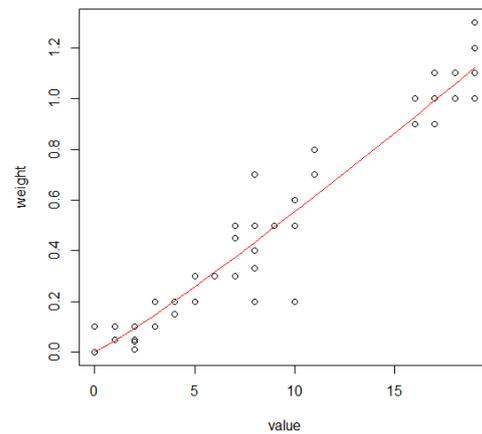
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



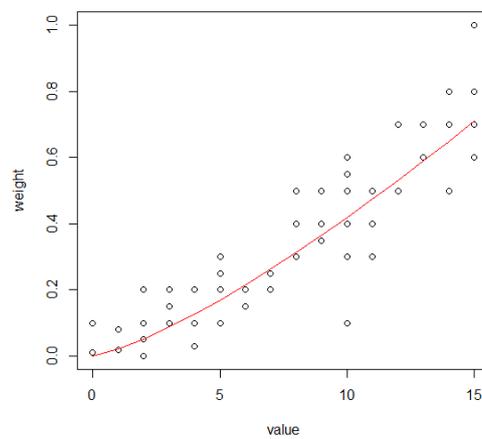
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

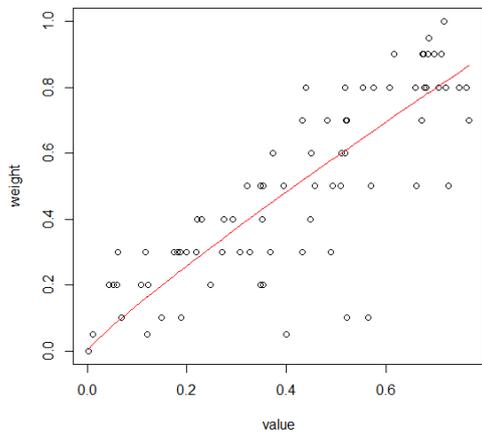


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

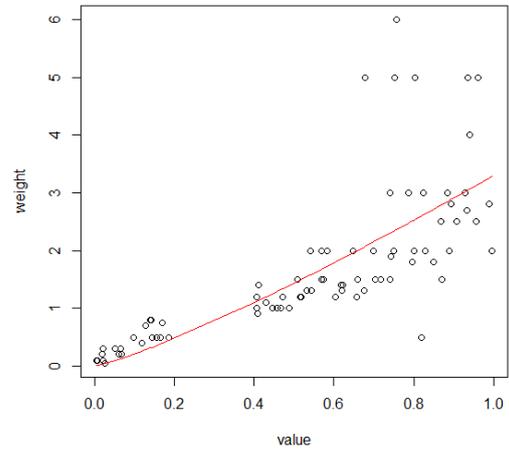


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

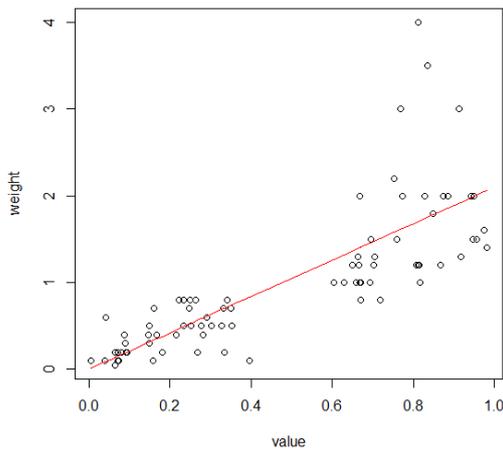
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（明度の表現）



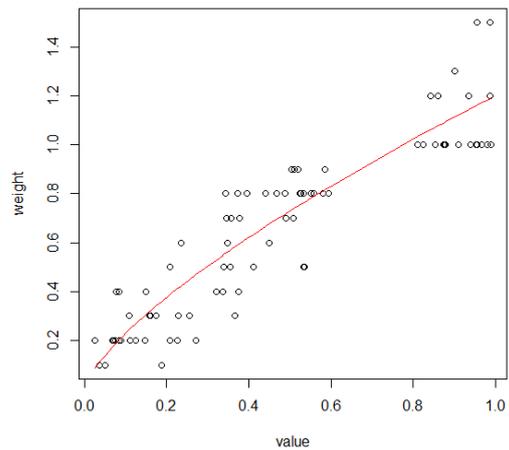
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



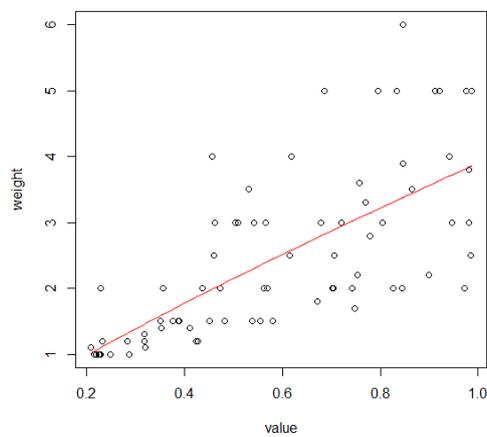
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

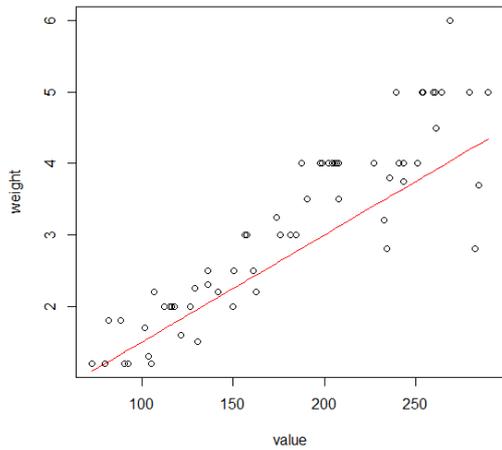


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

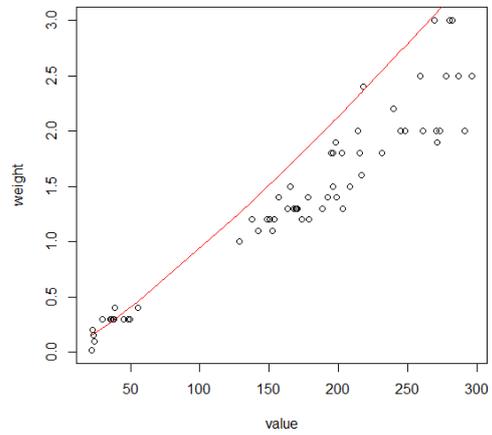


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

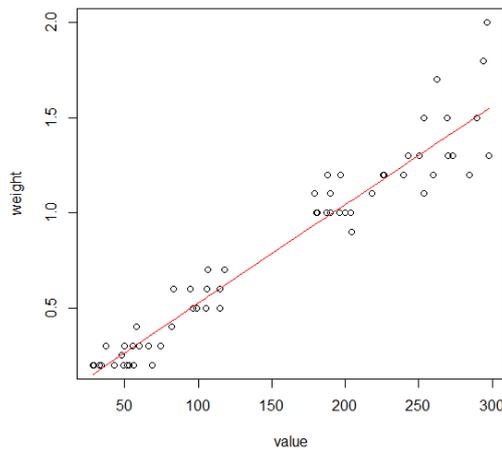
長さ結びつけづらいグラフ (長さの表現)



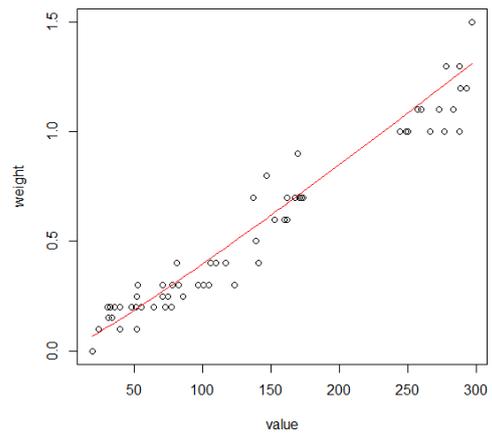
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



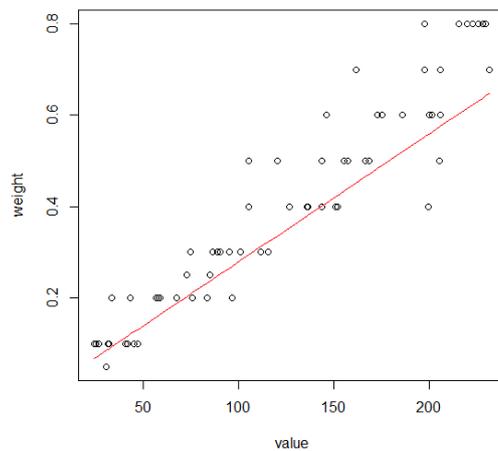
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

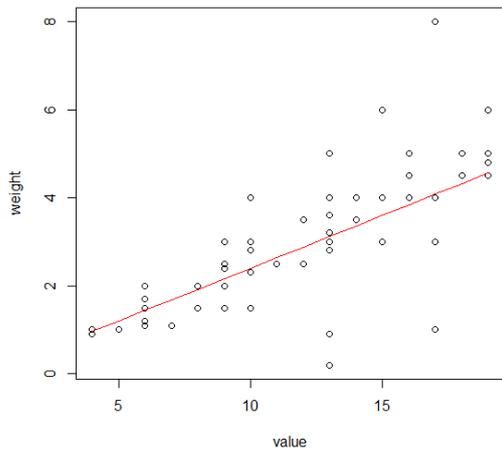


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

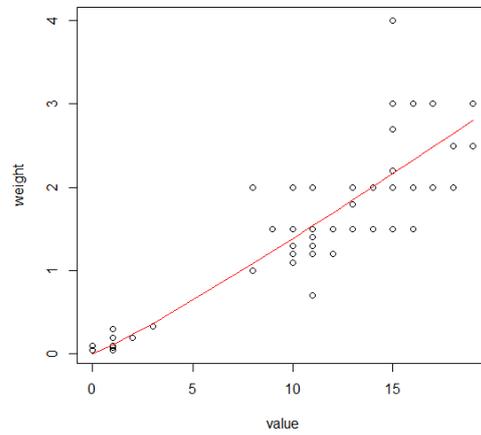


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

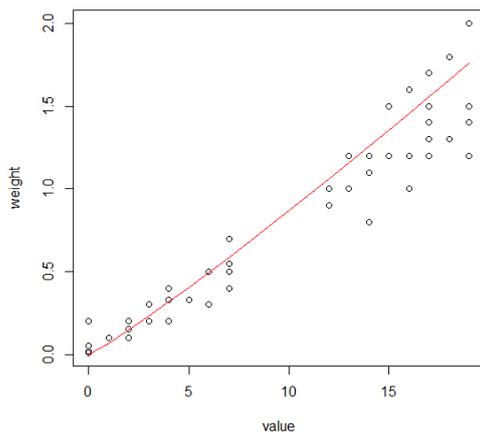
長さ結びつけづらいグラフ (太さの表現)



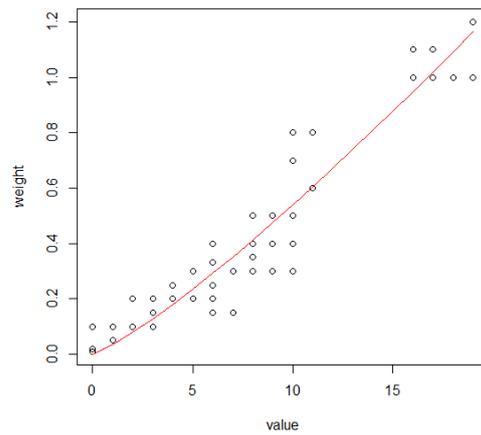
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



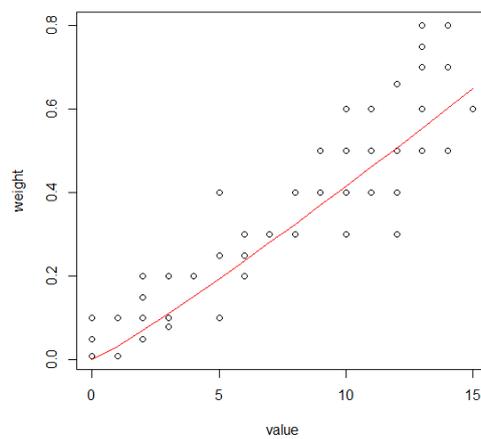
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合

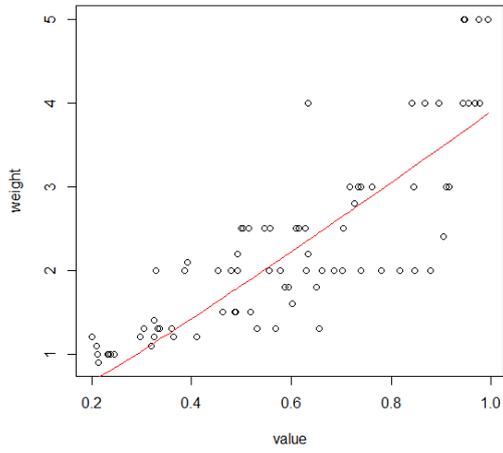


(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

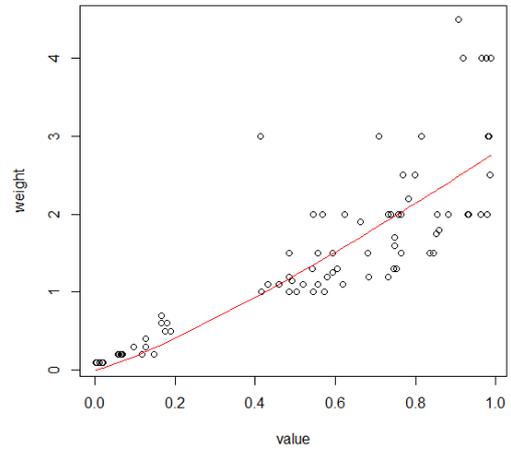


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

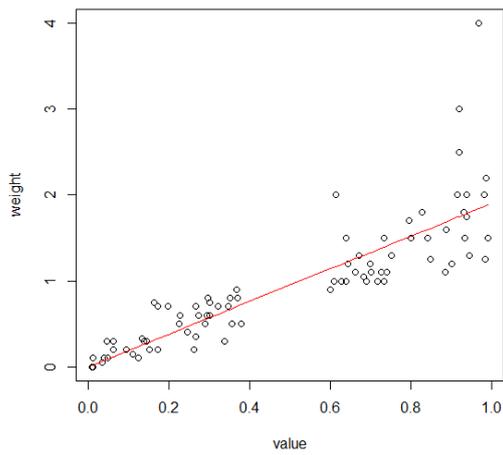
長さ と 結びつけづら い グラフ (明度の表現)



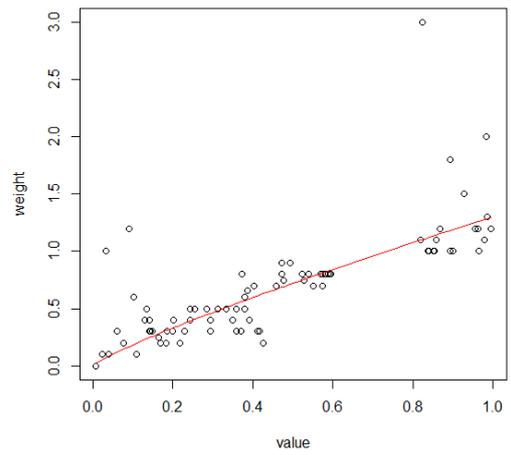
(a) 基準エッジが範囲 1 の場合



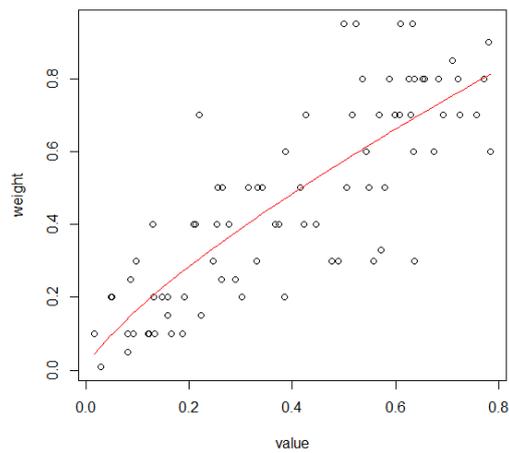
(b) 基準エッジが範囲 2 の場合



(c) 基準エッジが範囲 3 の場合



(d) 基準エッジが範囲 4 の場合

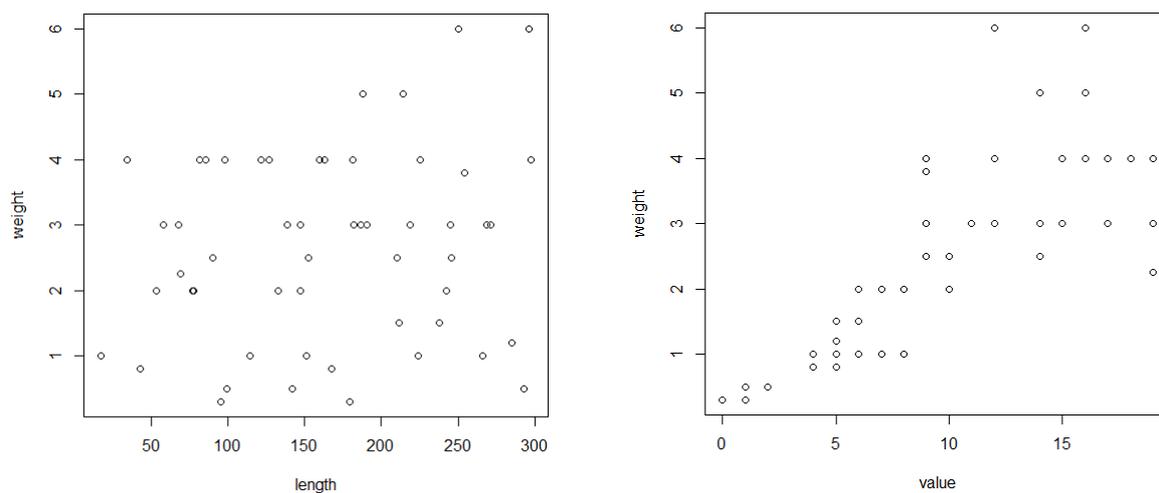


(e) 基準エッジが範囲 5 の場合

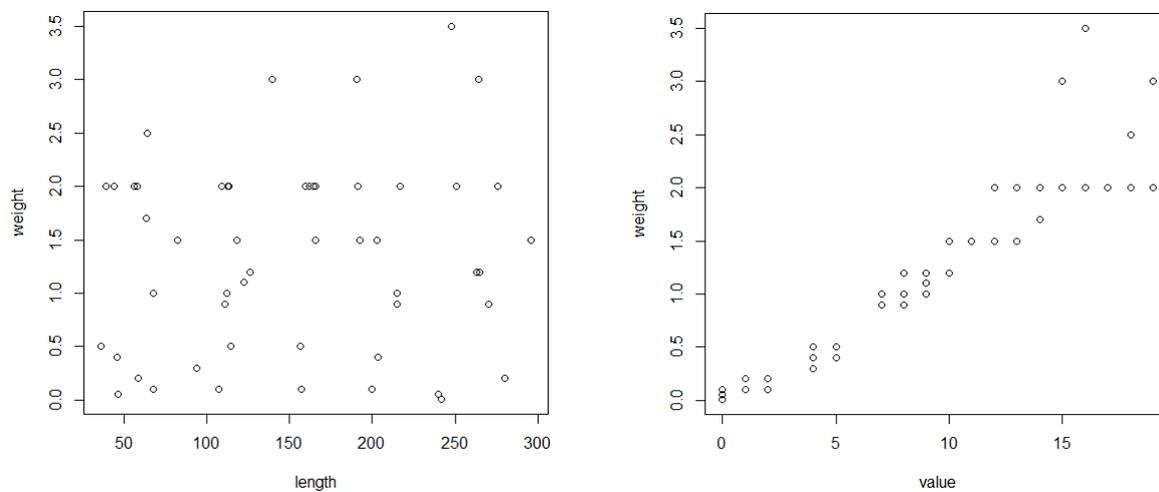
付録 C 実験 2 の結果を表す散布図

表現に関する情報を与える場合

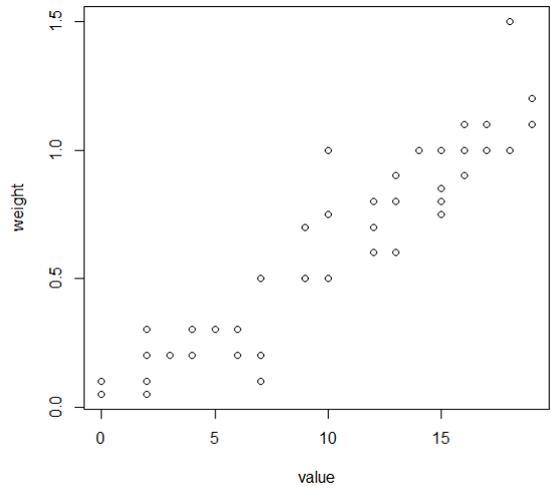
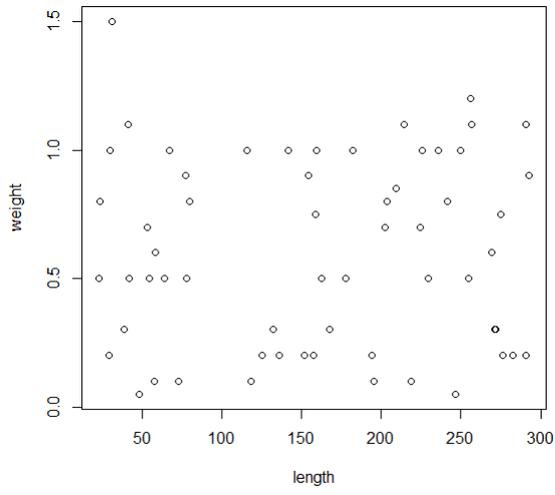
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（太さの表現）



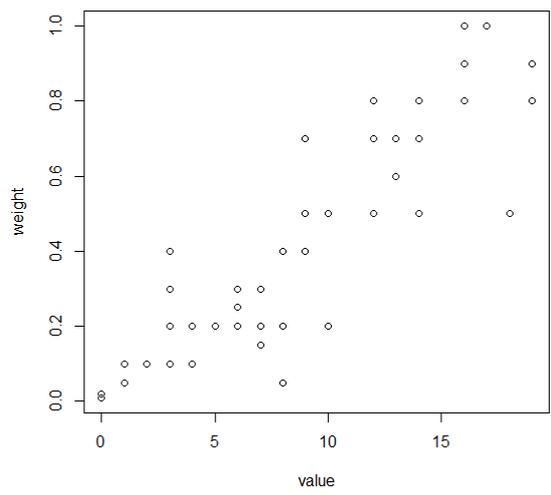
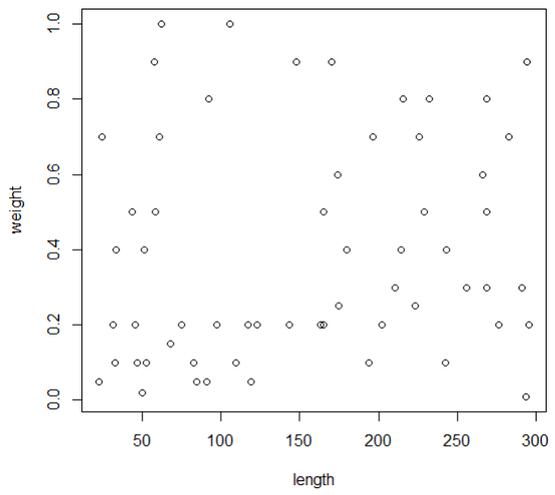
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



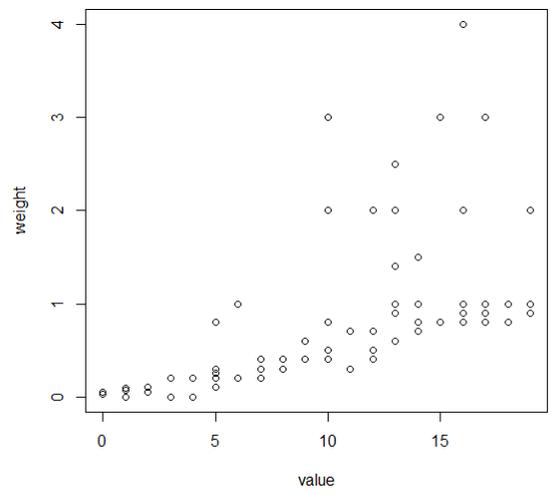
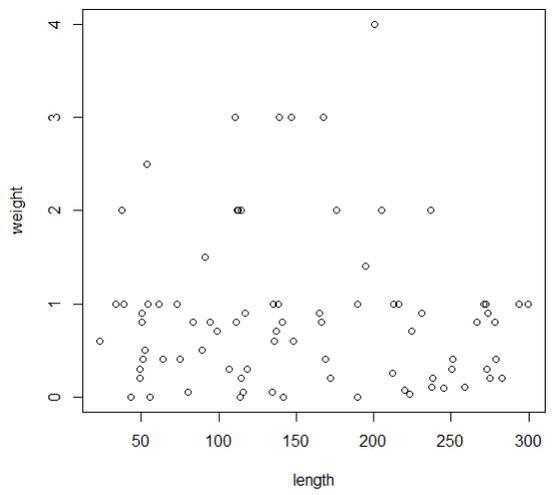
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



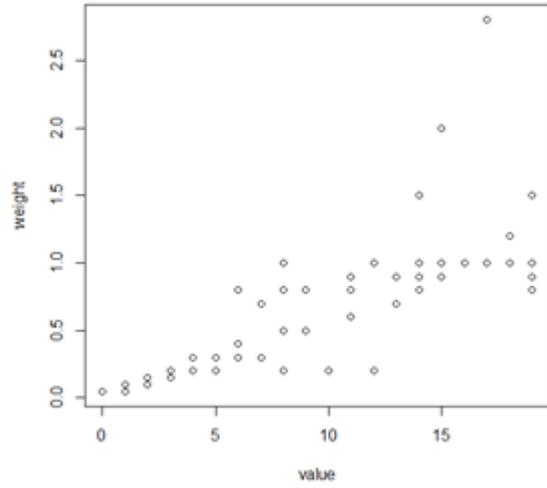
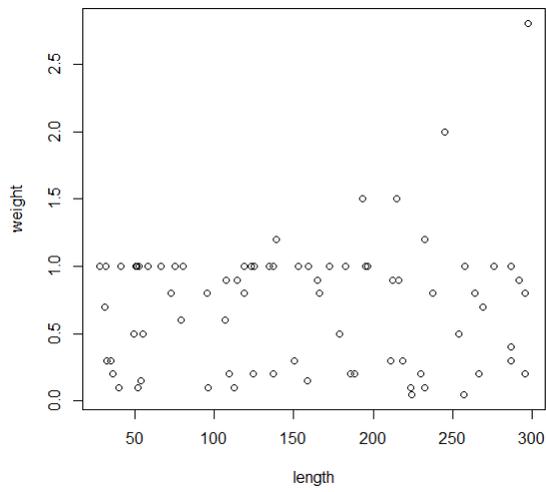
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



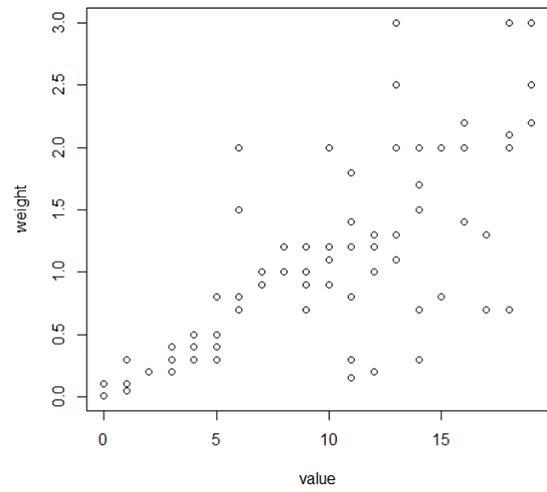
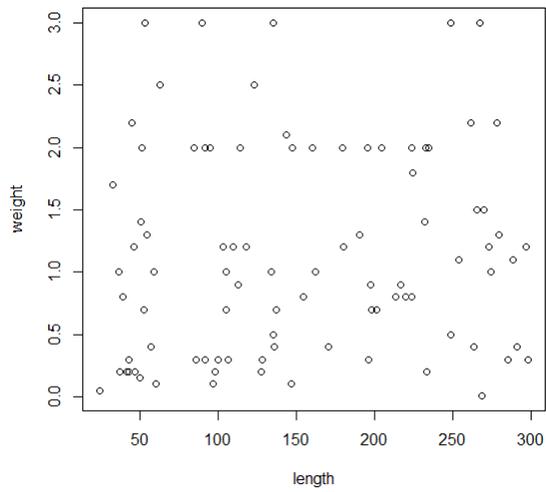
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



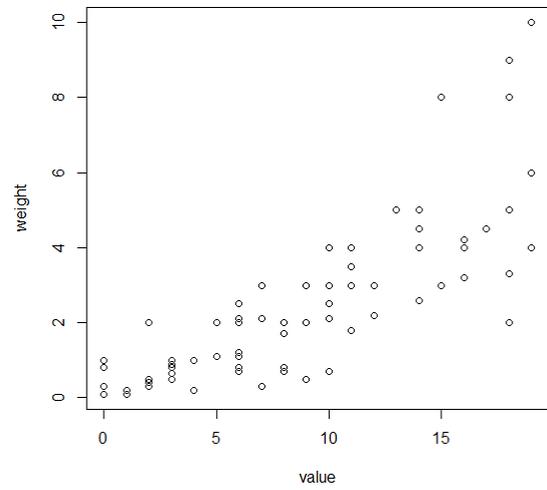
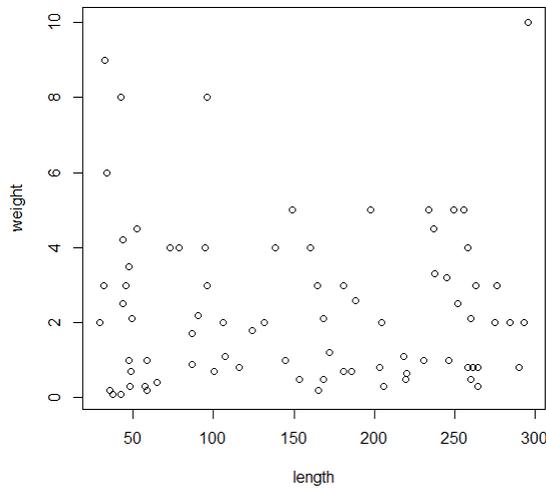
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

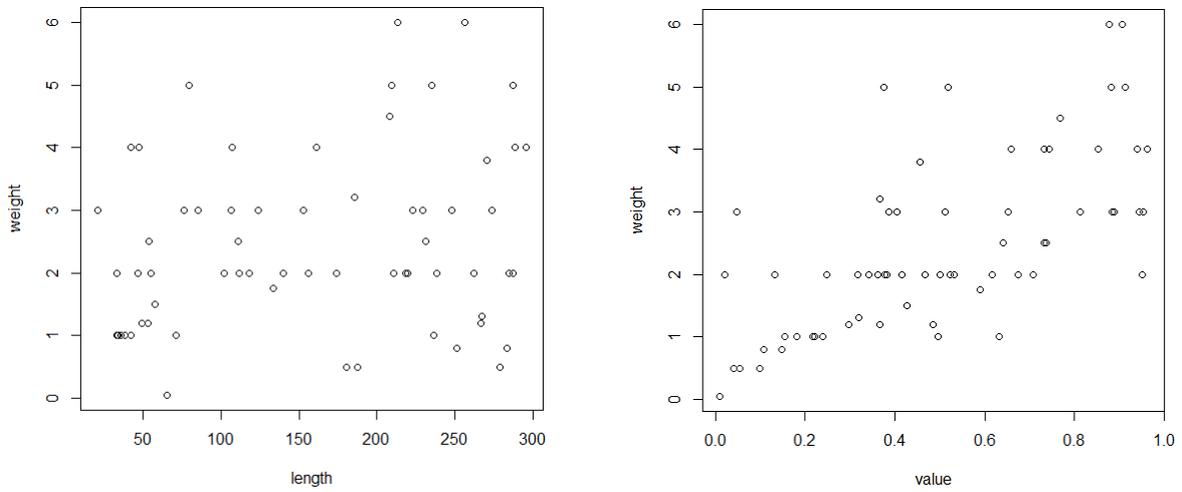


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

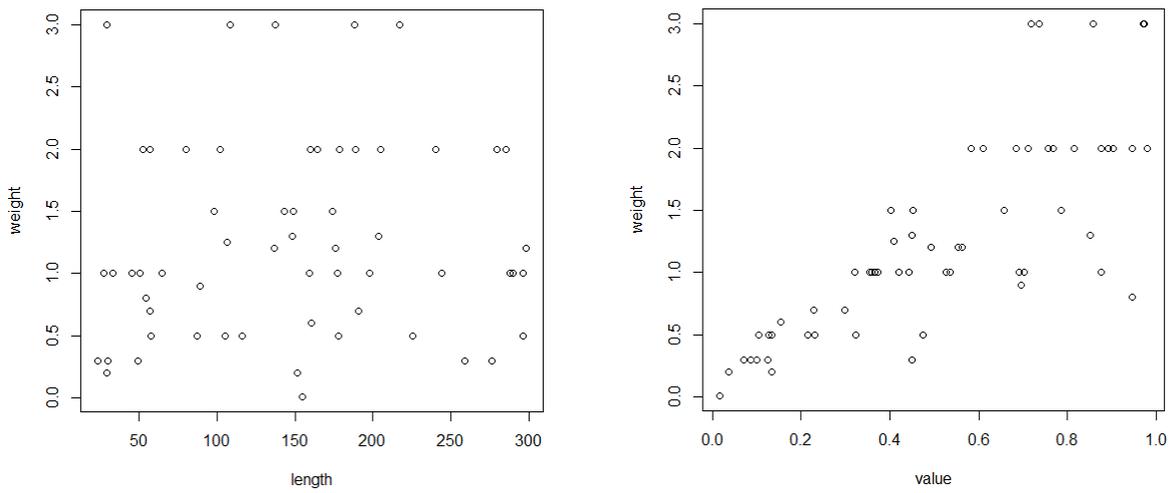


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

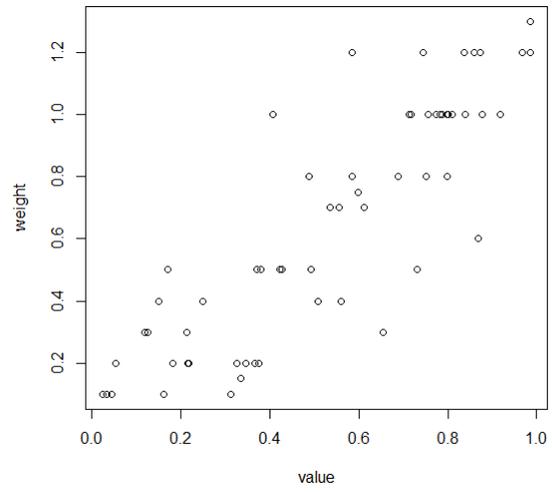
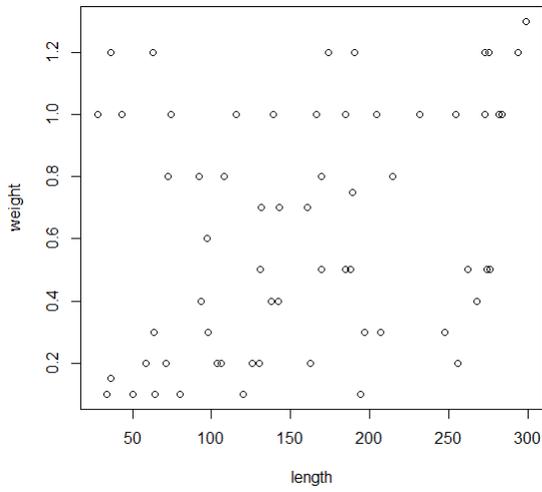
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（明度の表現）



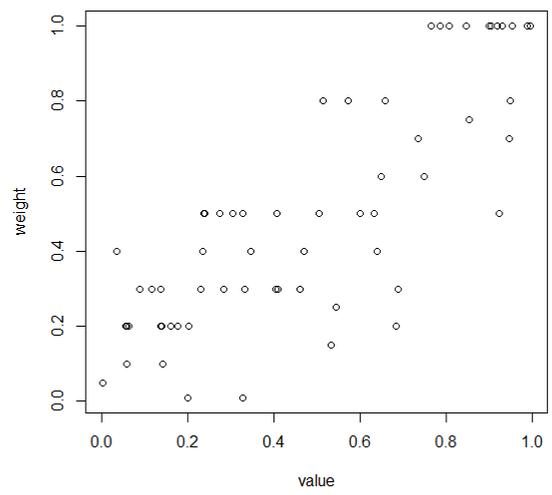
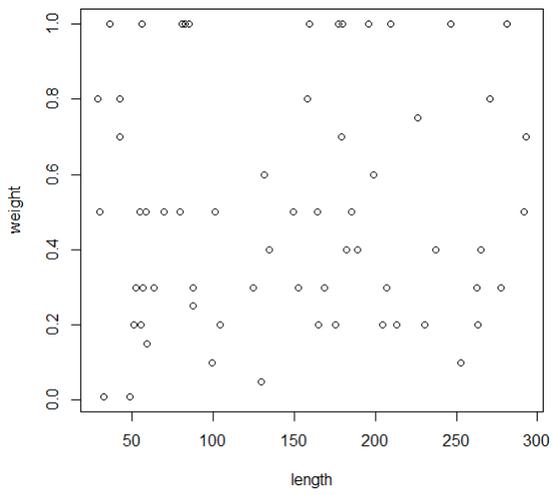
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



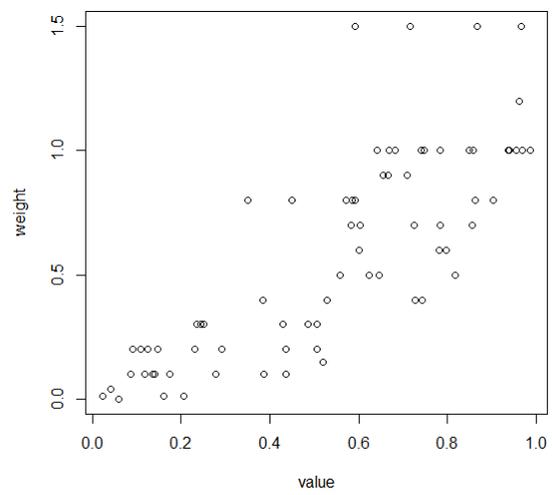
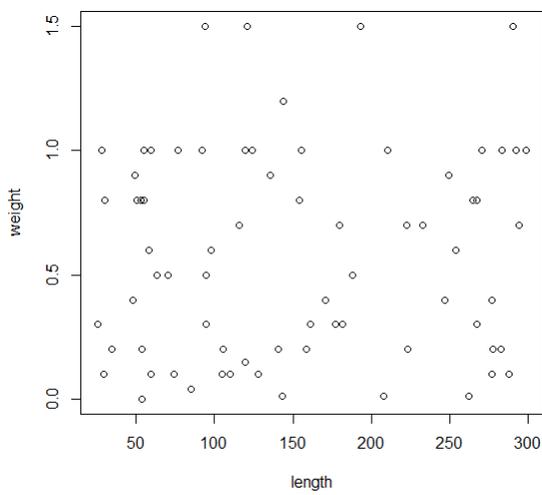
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



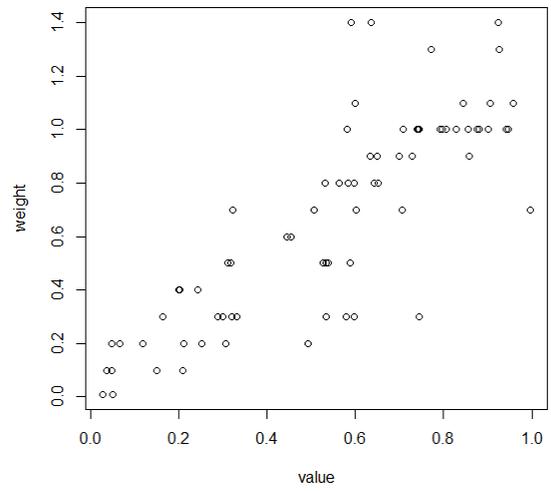
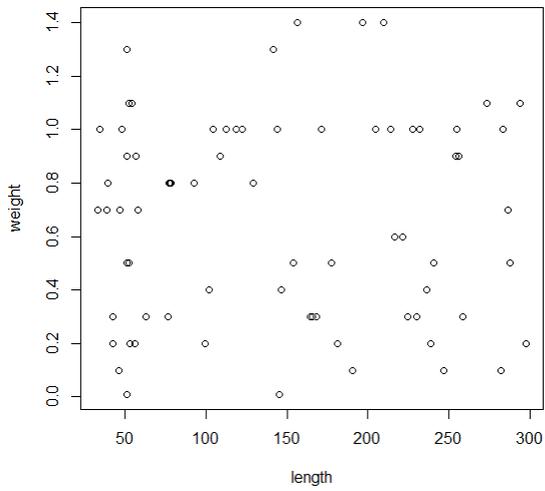
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



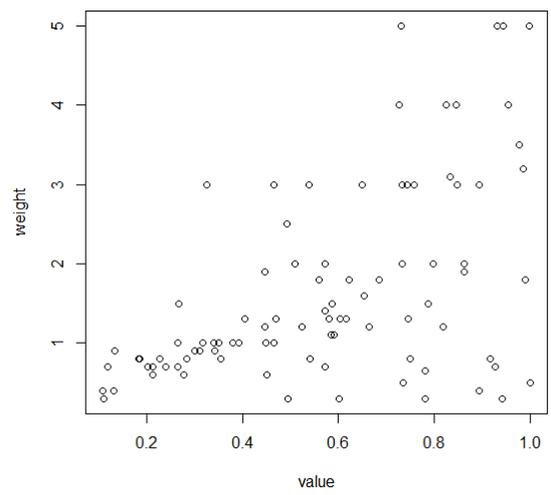
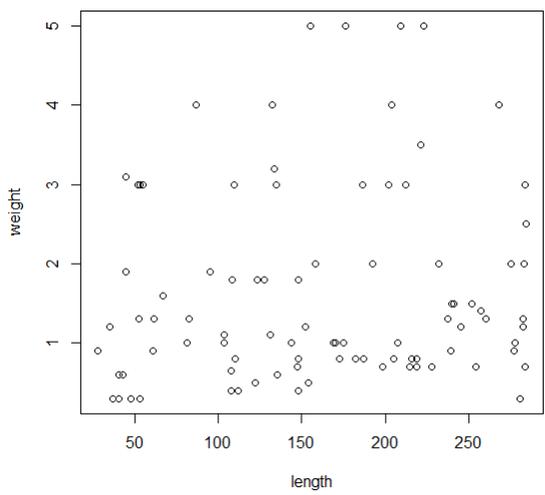
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



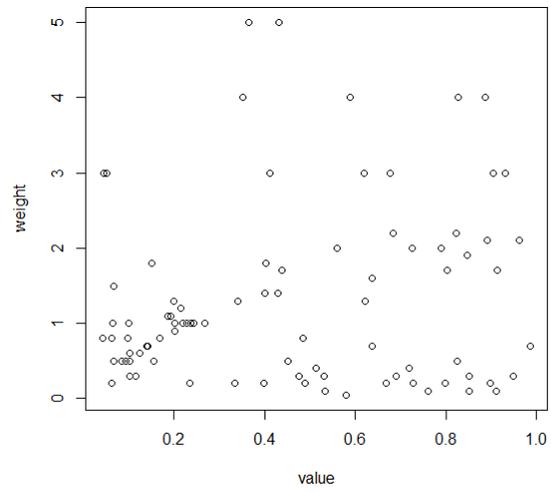
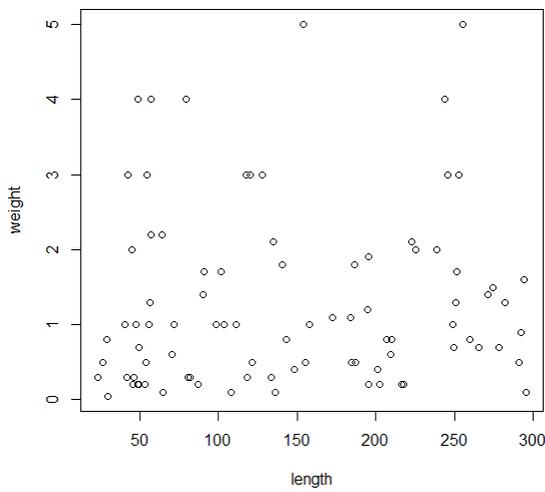
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

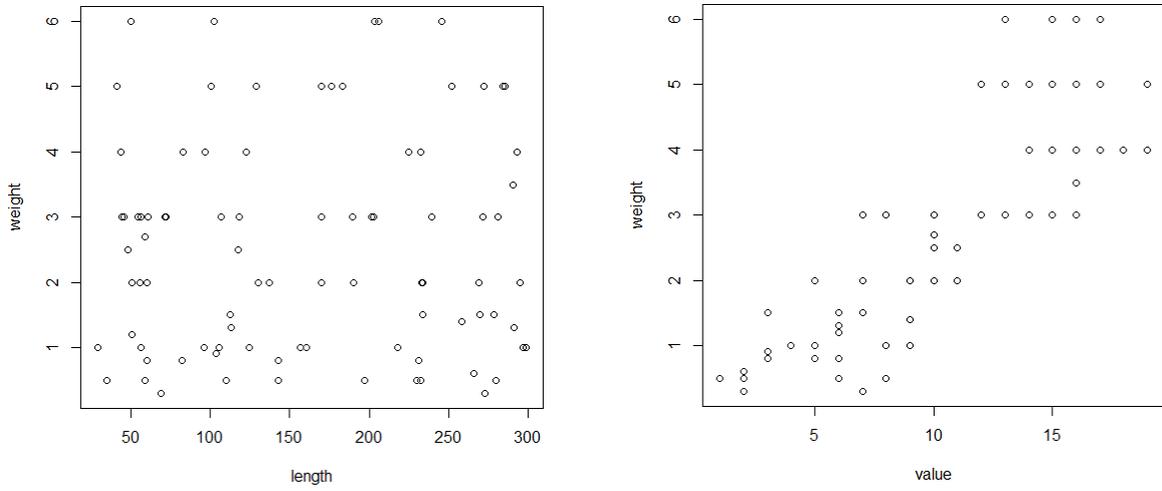


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

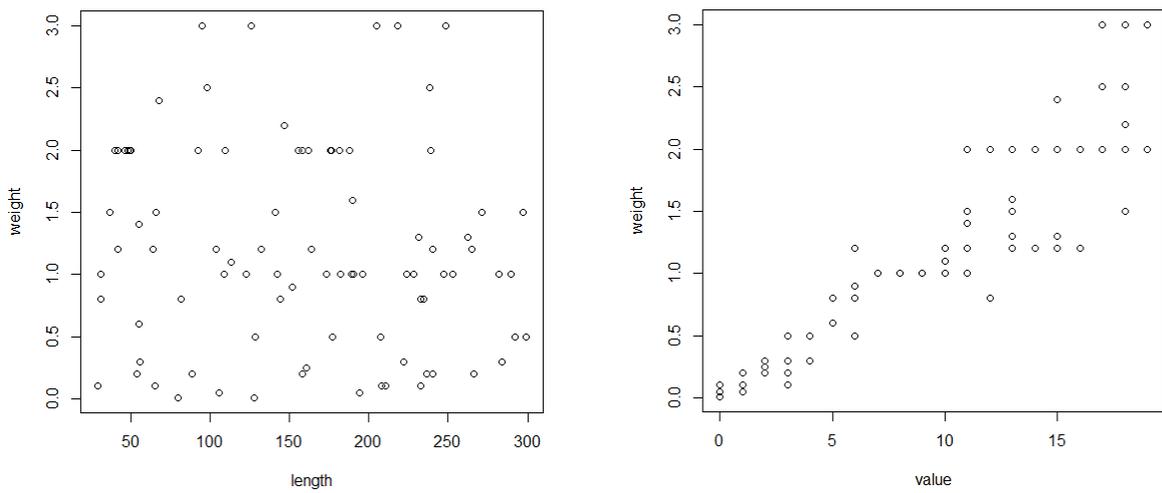


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

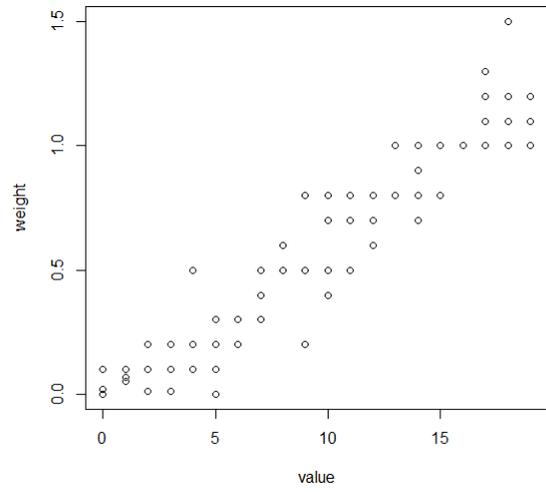
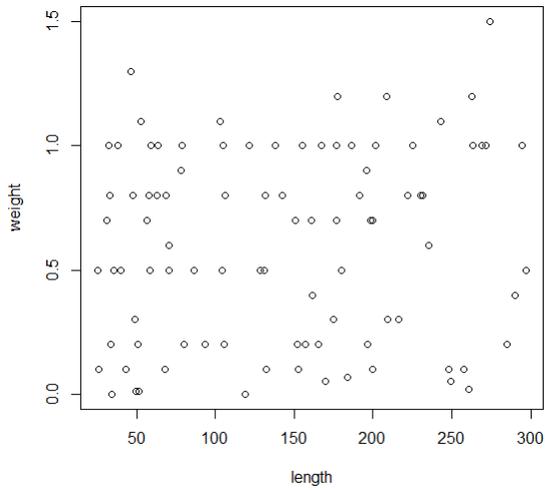
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（太さの表現）



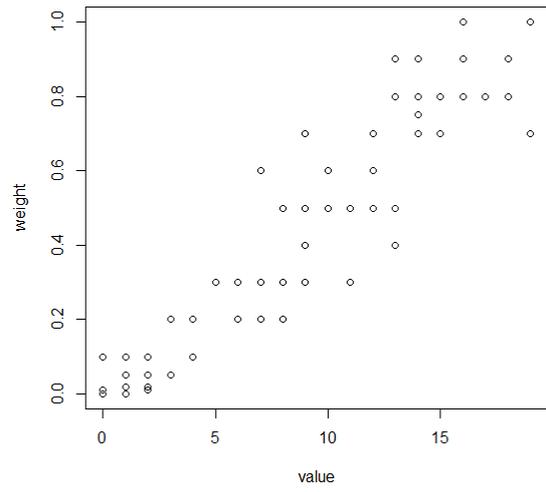
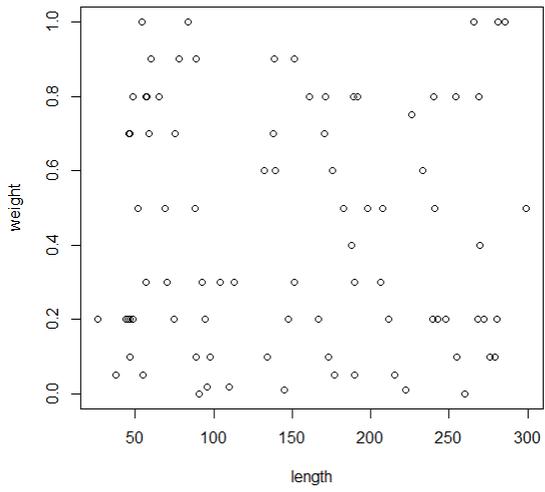
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



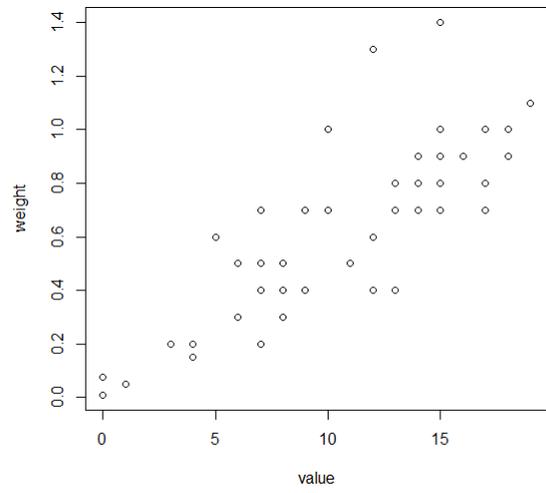
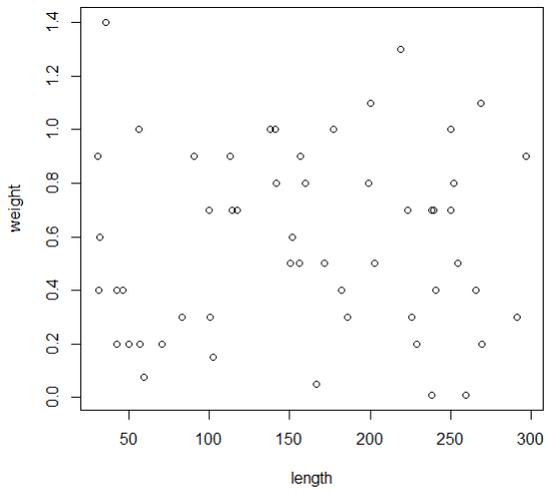
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



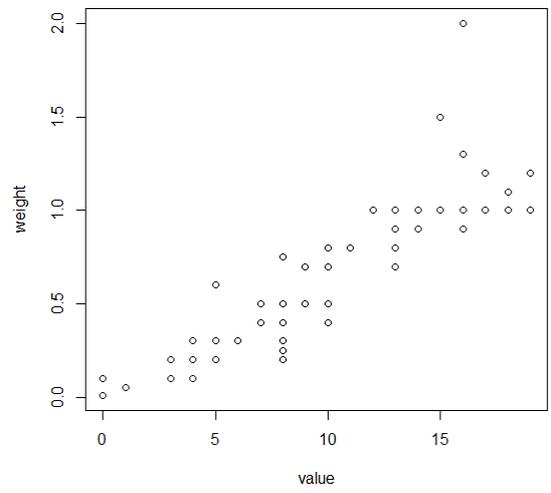
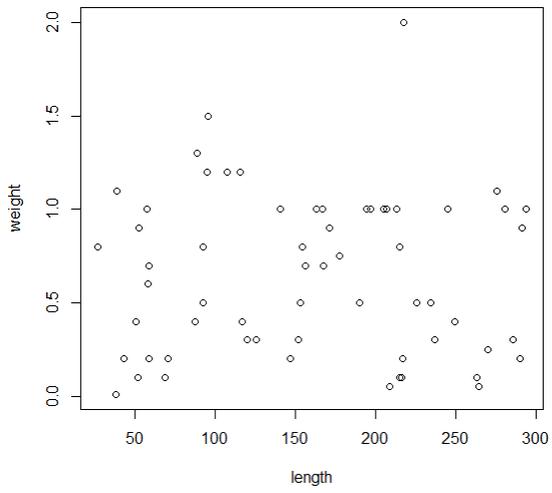
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



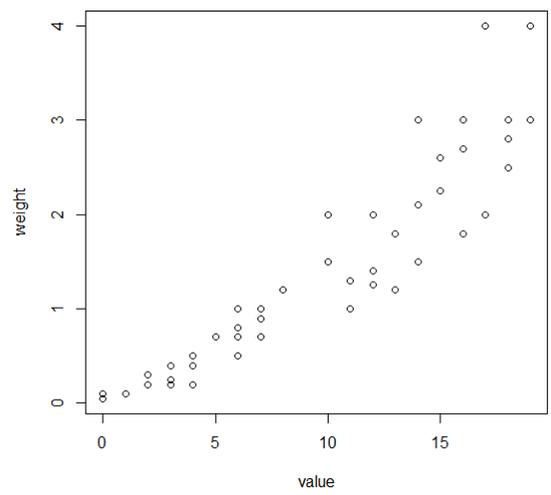
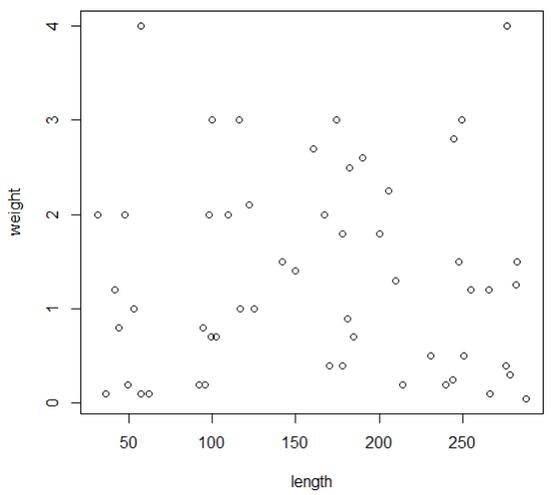
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



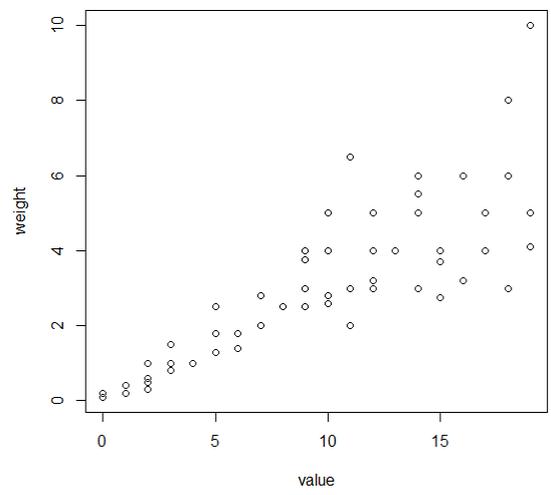
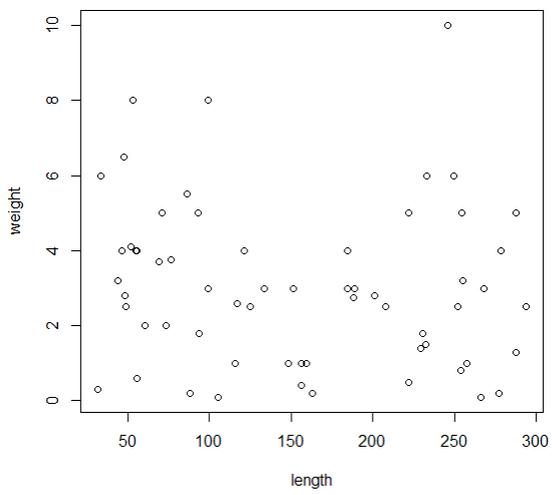
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

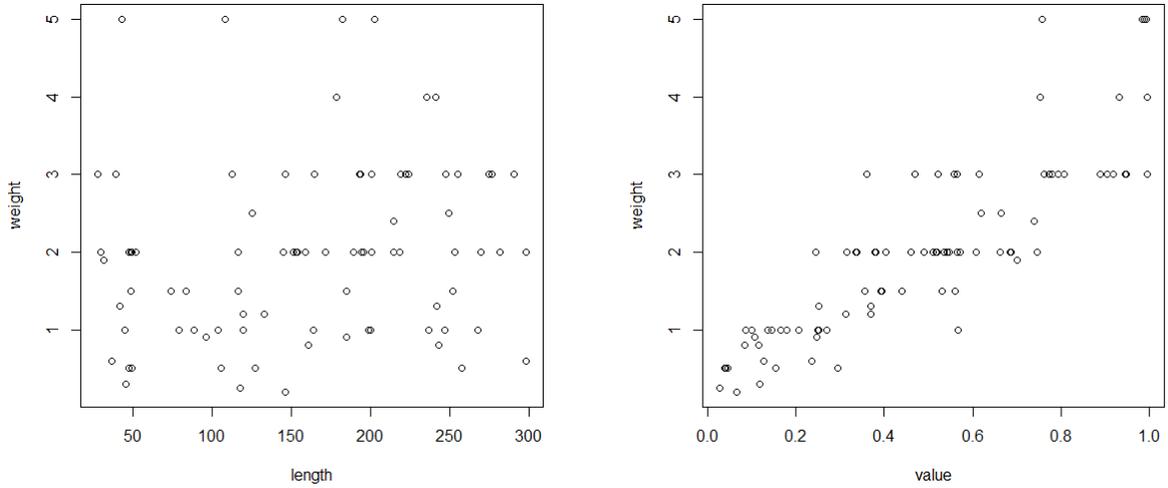


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

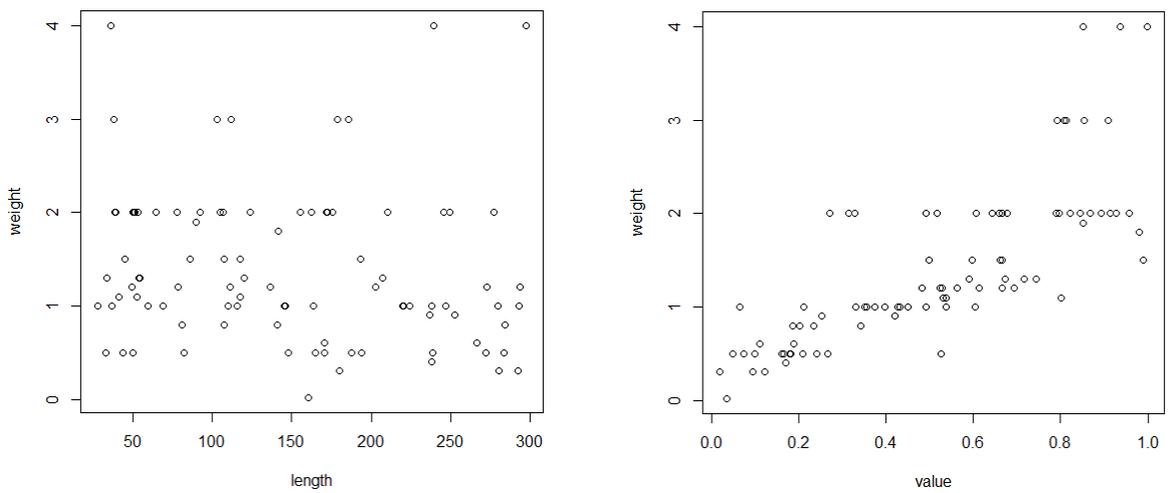


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

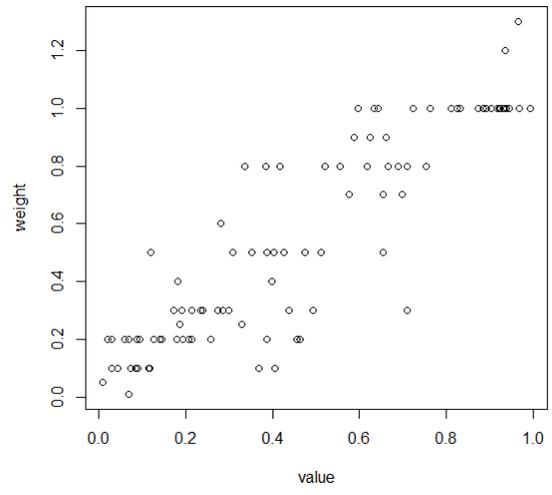
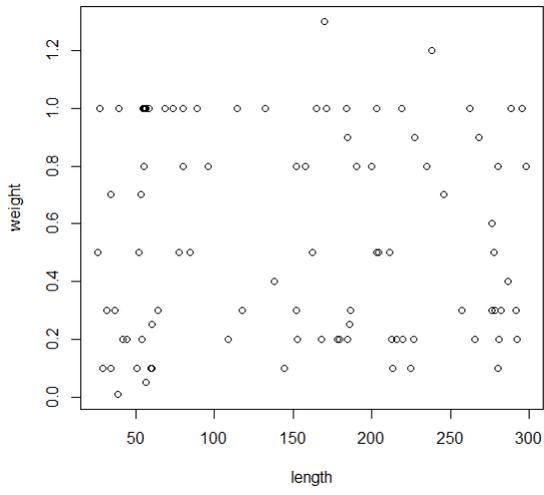
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（明度の表現）



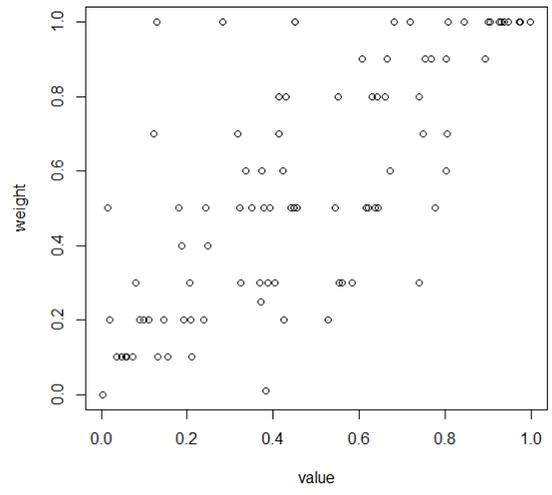
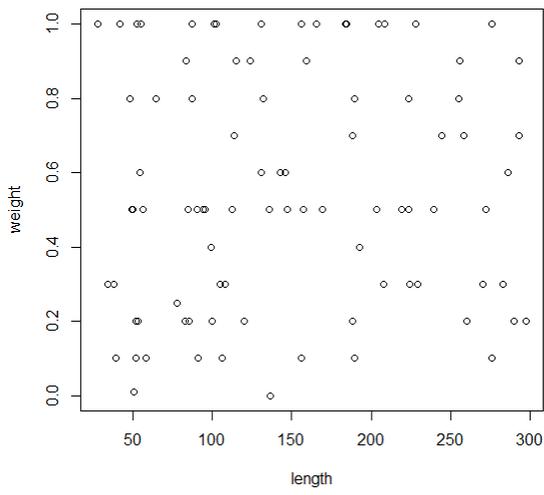
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



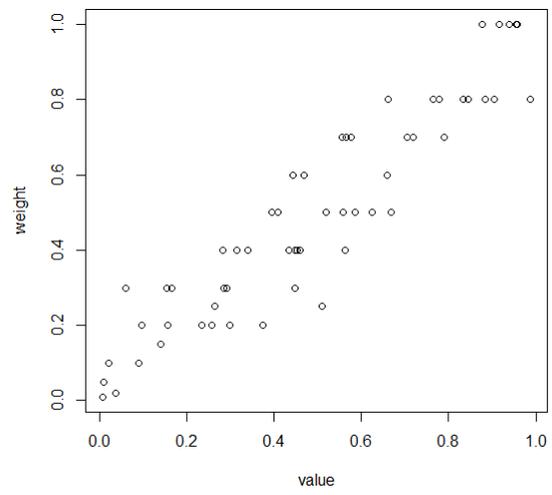
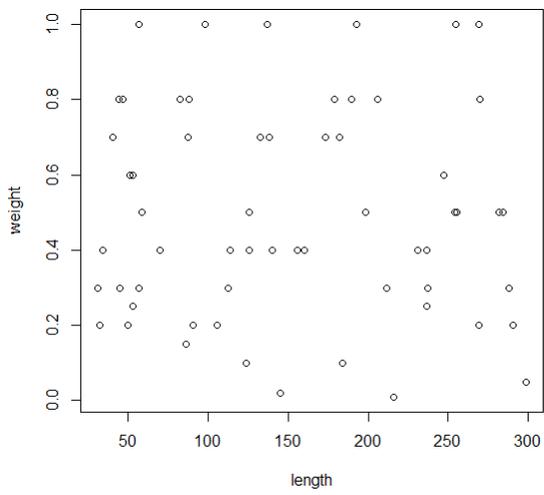
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



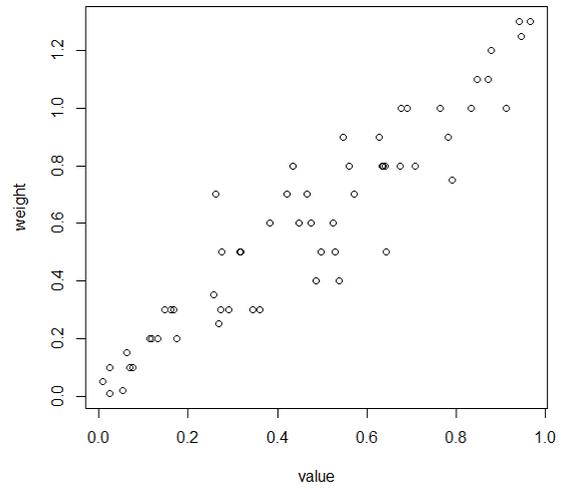
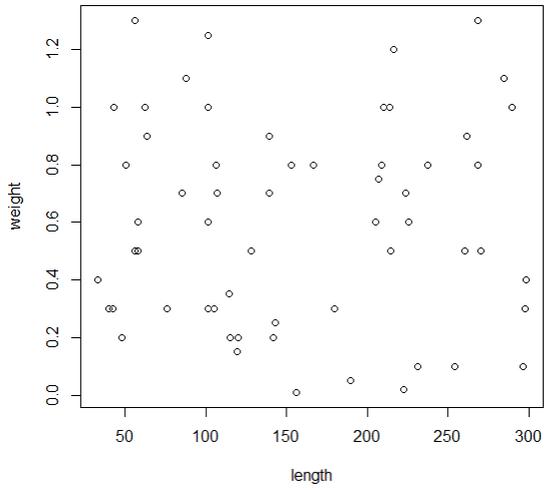
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



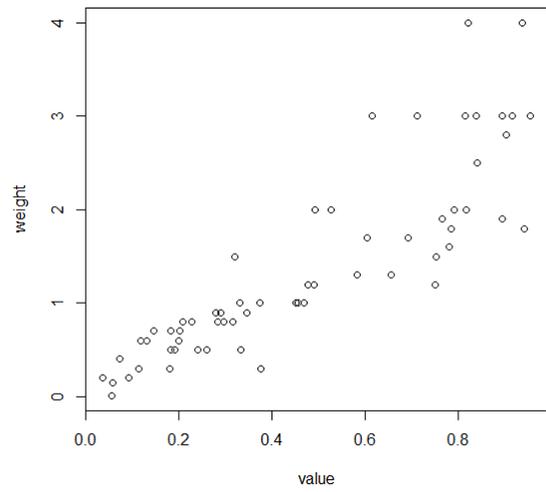
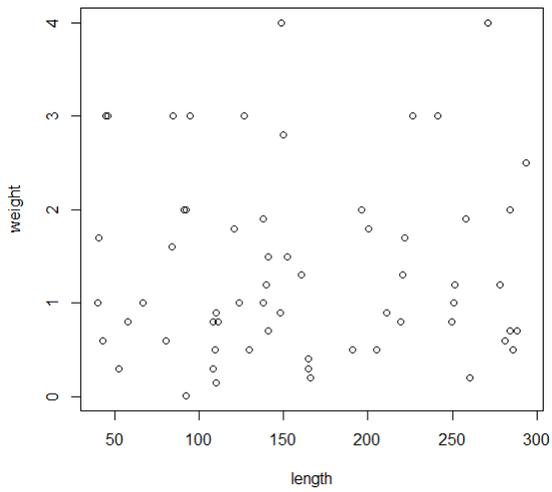
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



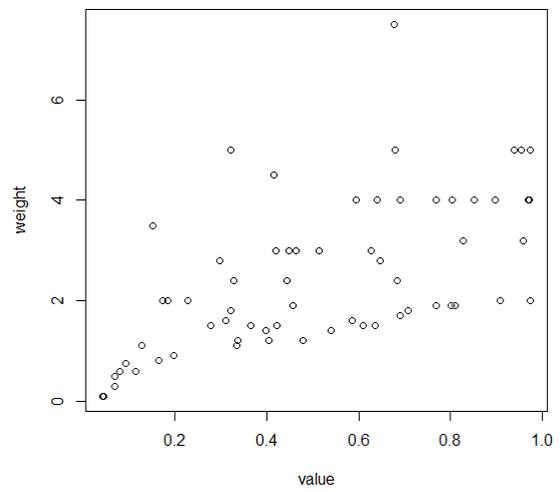
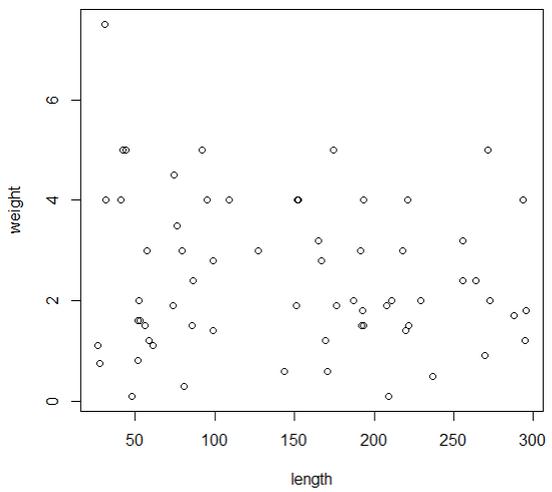
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

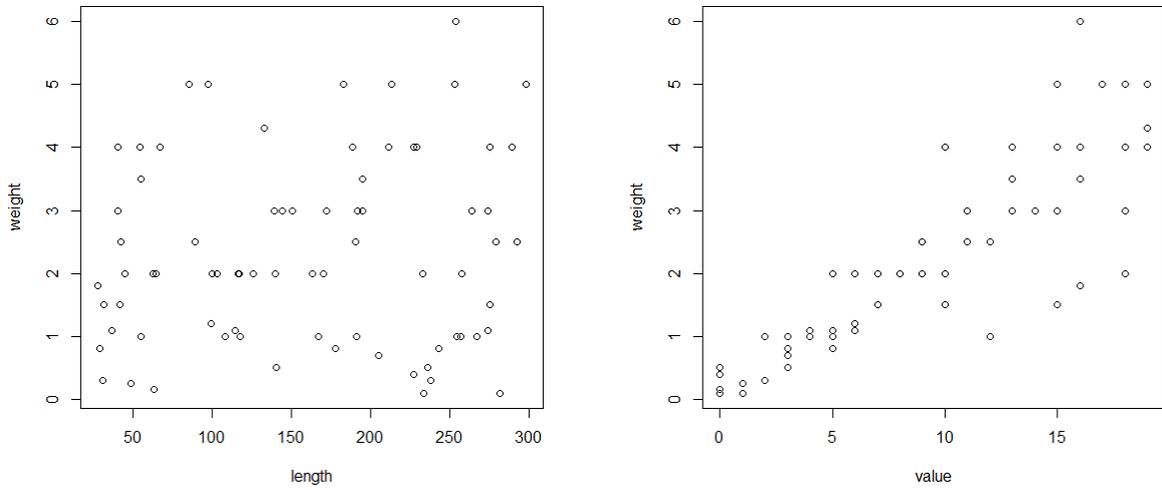


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

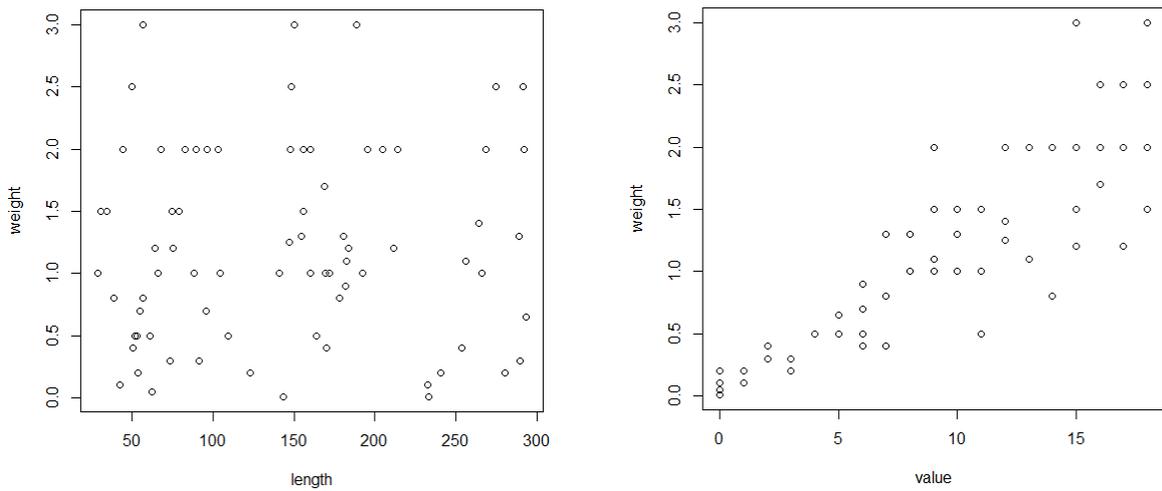


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

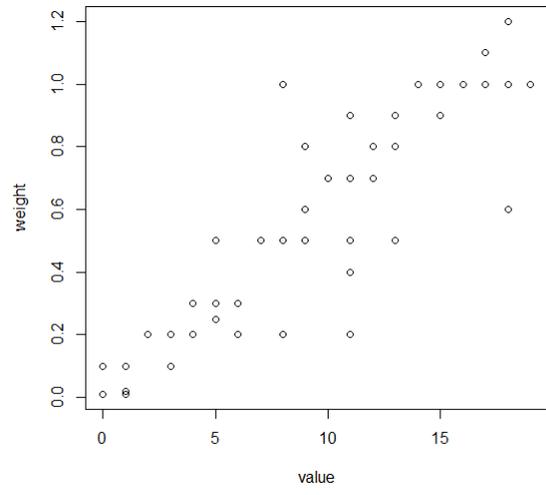
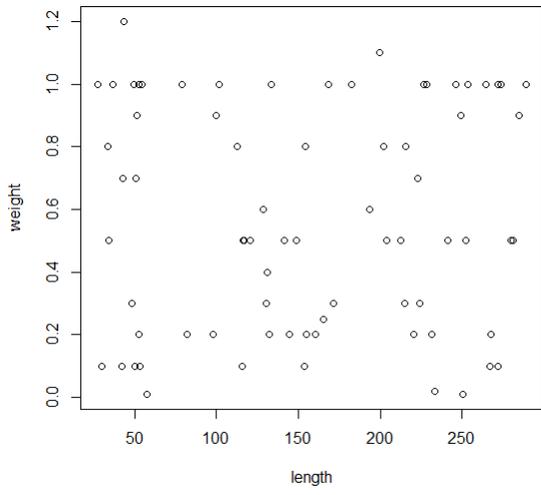
長さ結びつけづらいグラフ (太さの表現)



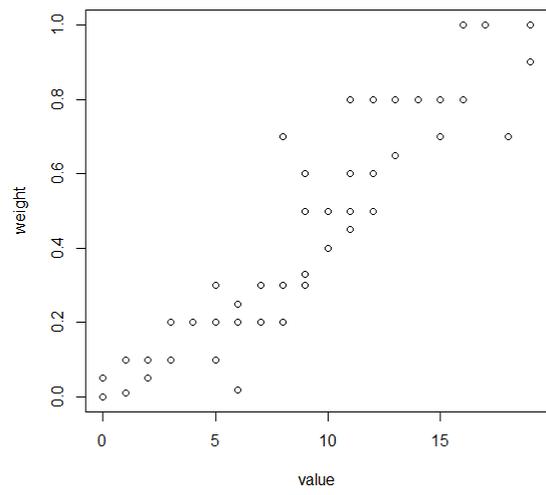
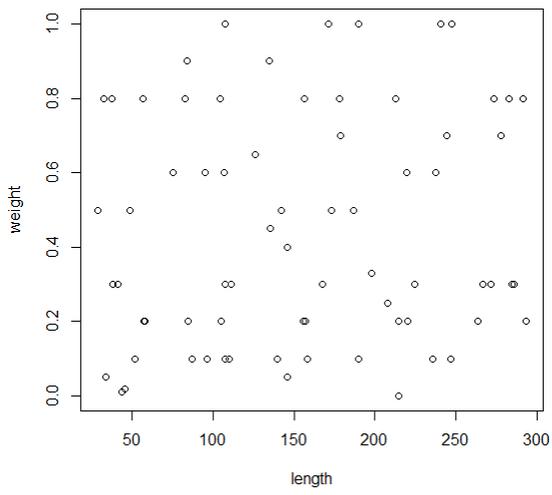
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



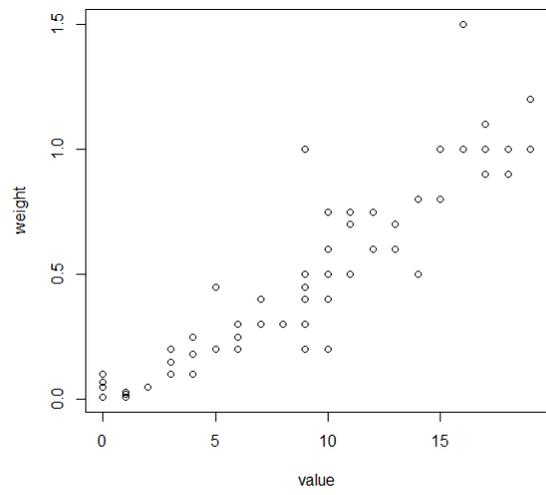
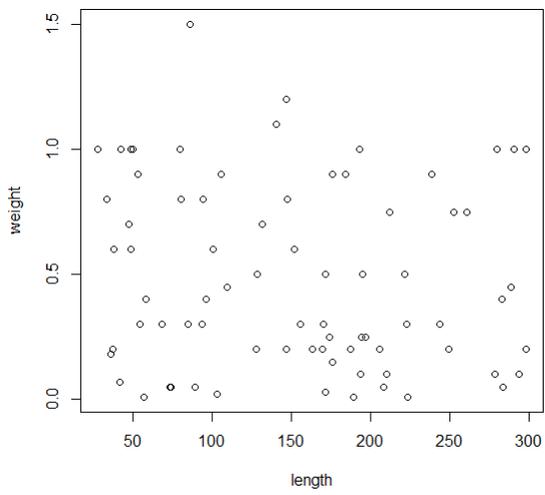
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



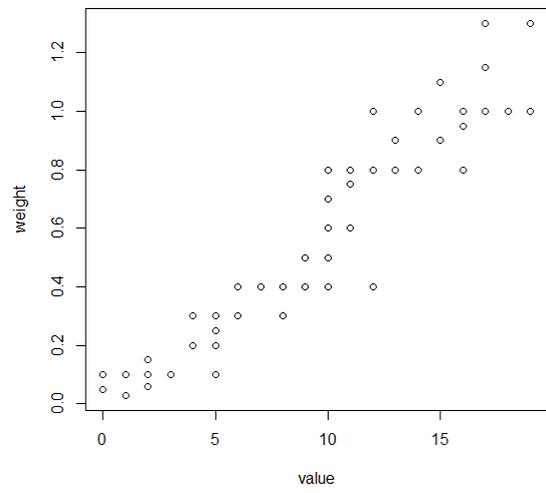
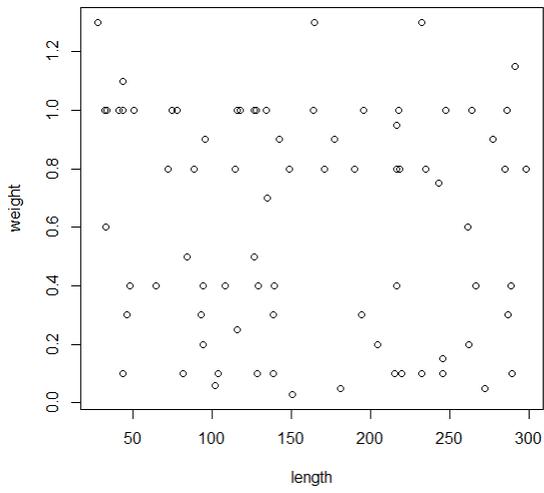
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



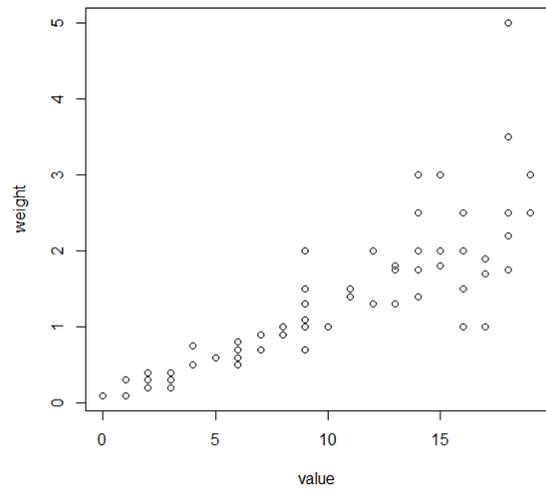
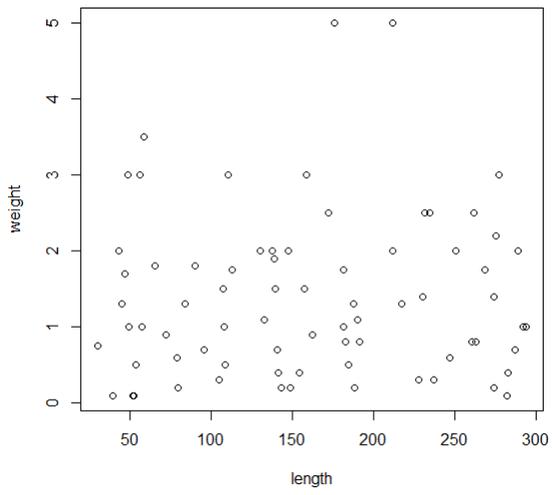
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



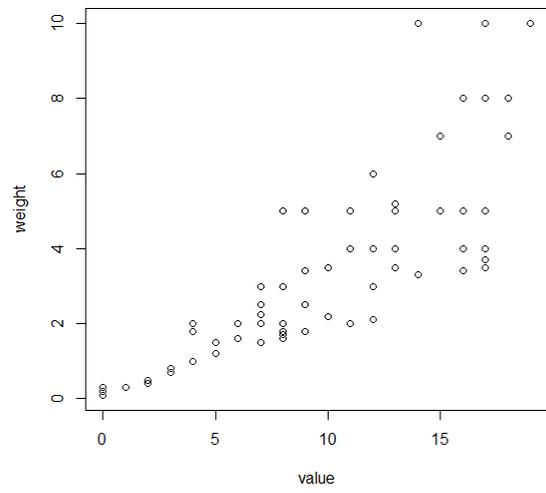
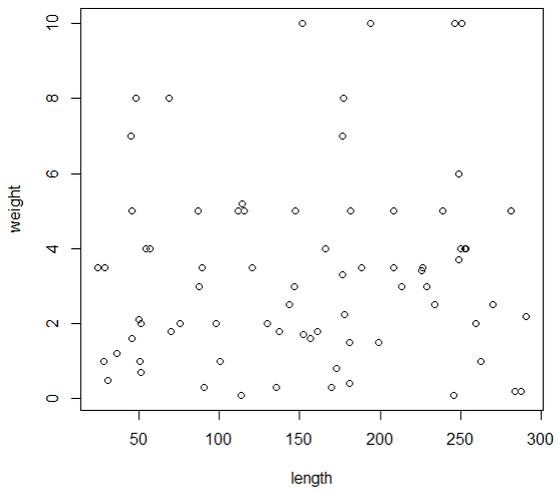
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

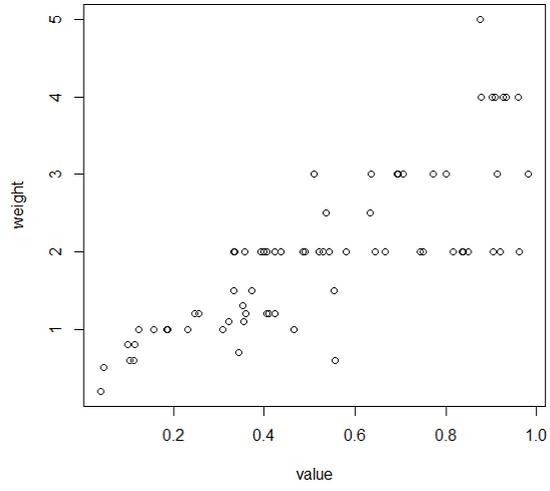
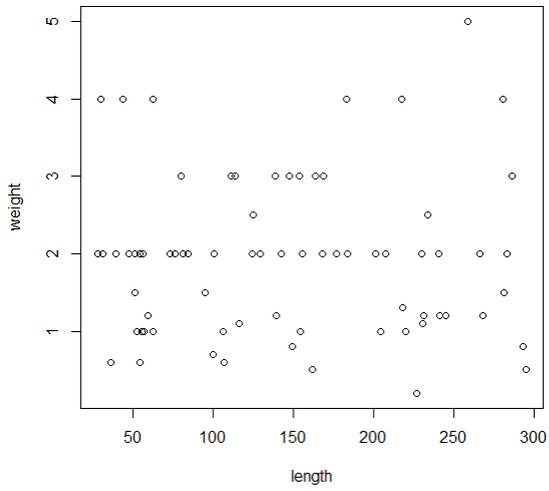


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

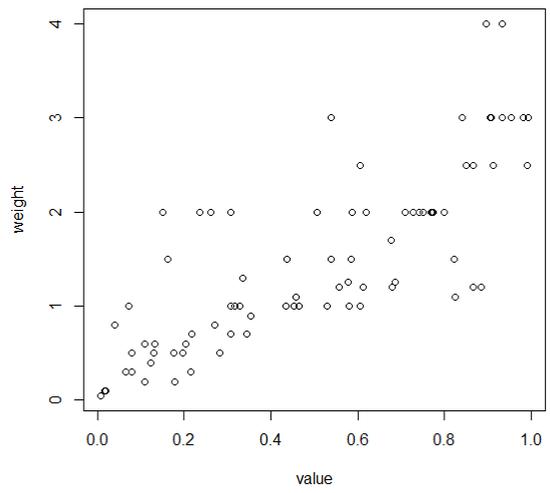
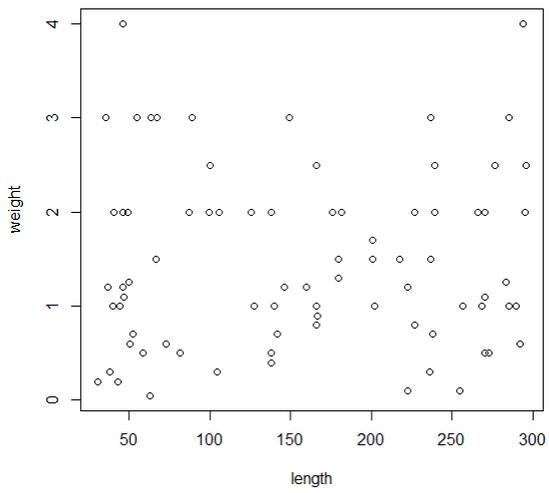


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

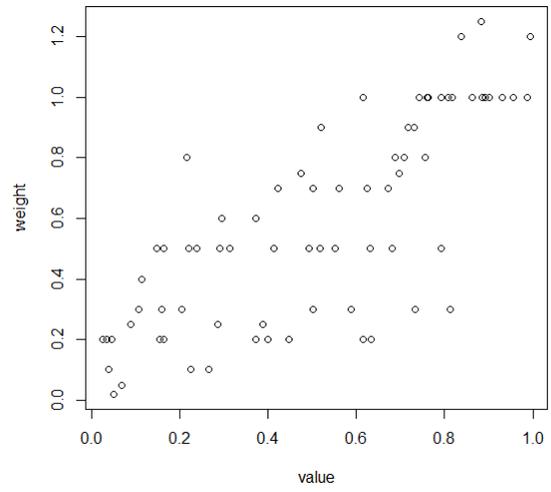
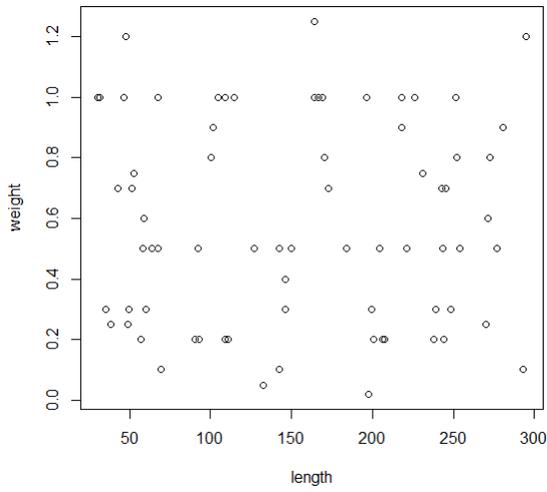
長さ結びつけづらいグラフ（明度の表現）



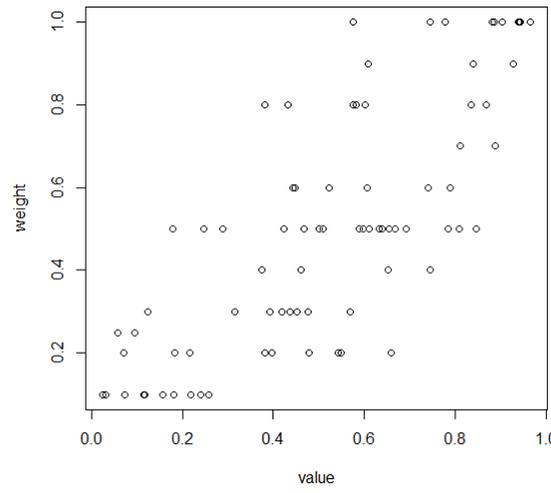
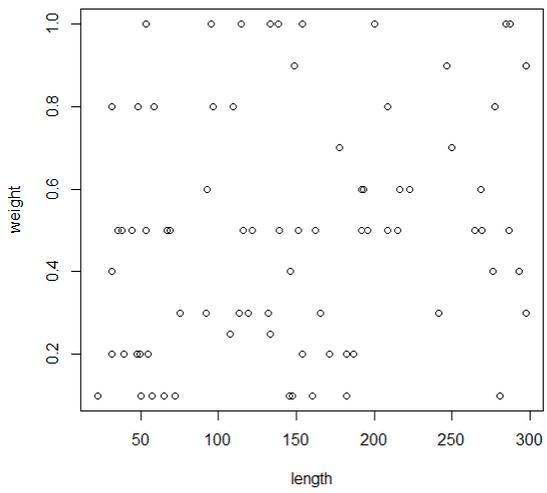
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



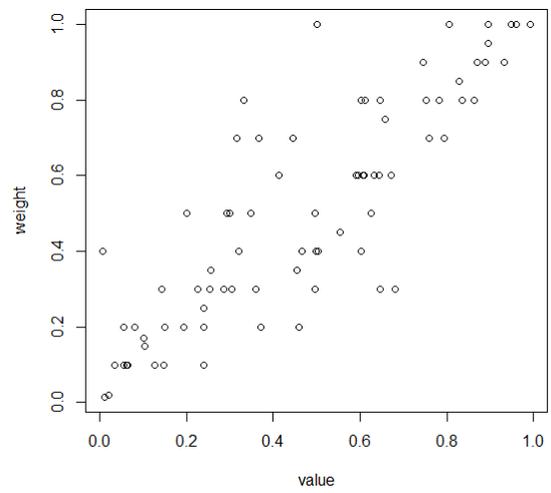
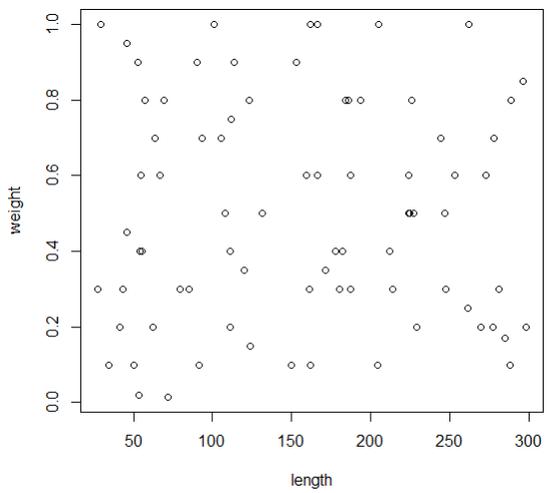
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



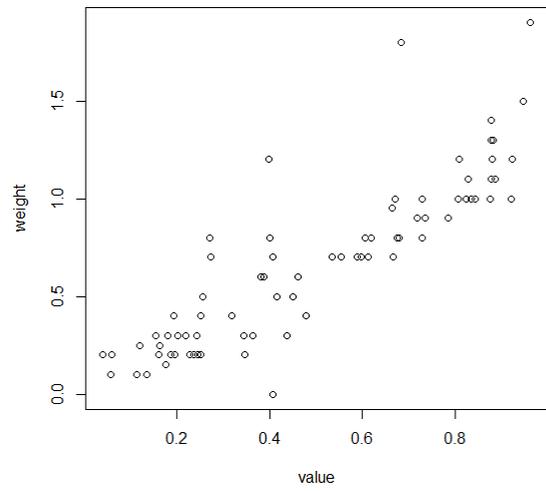
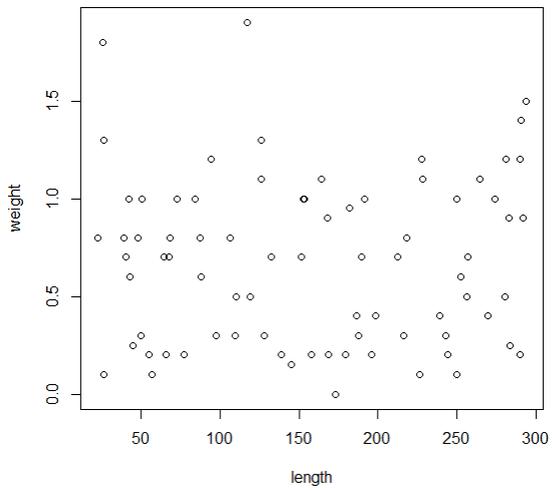
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



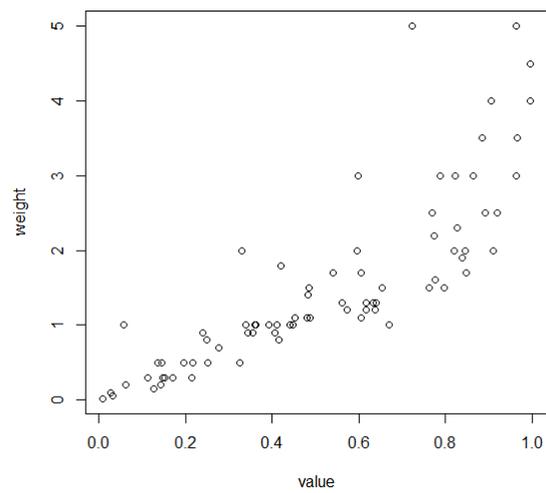
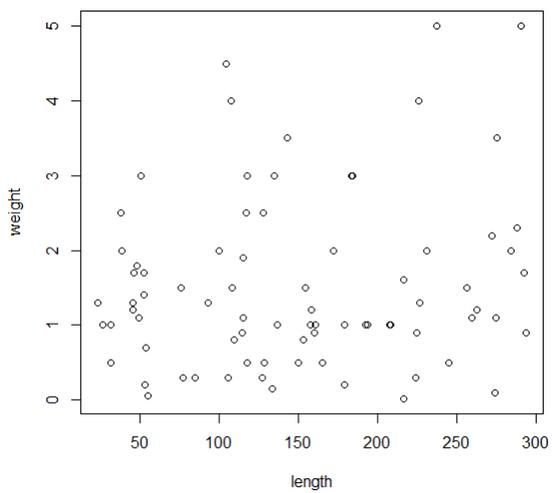
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



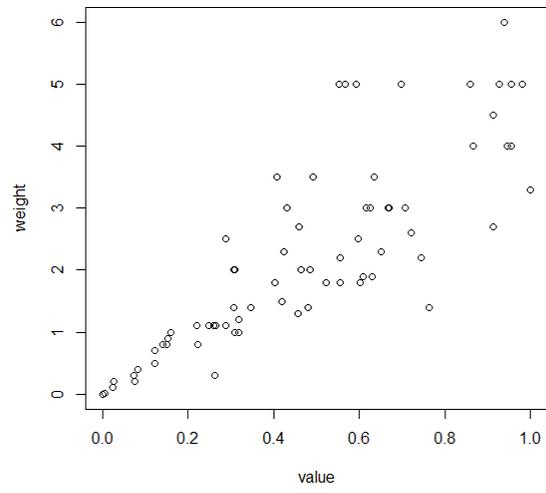
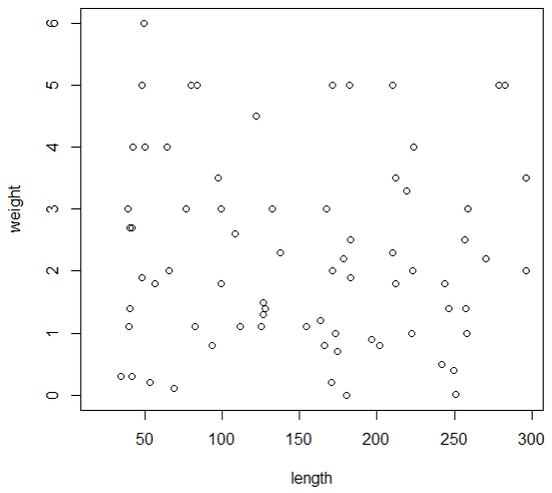
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合



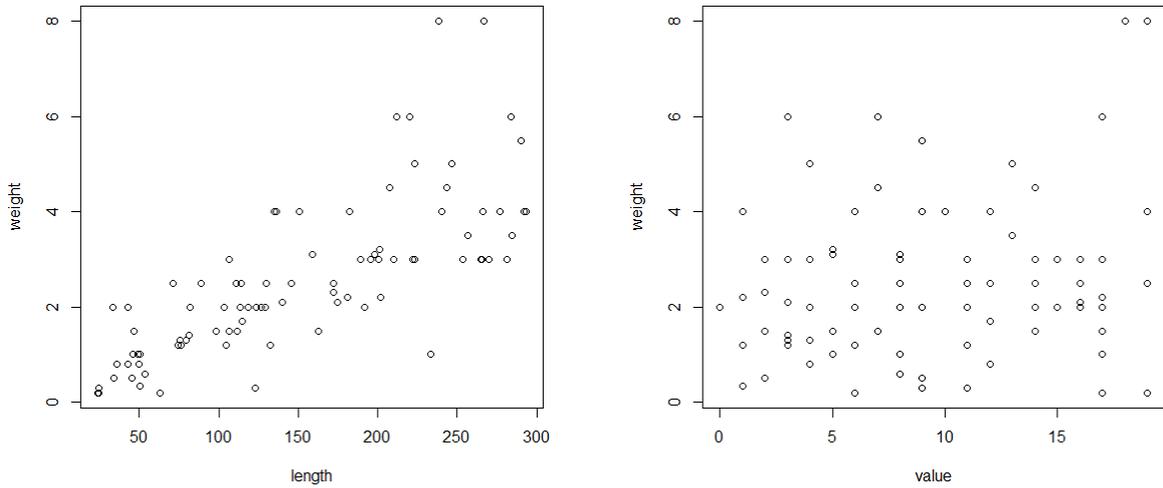
(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合



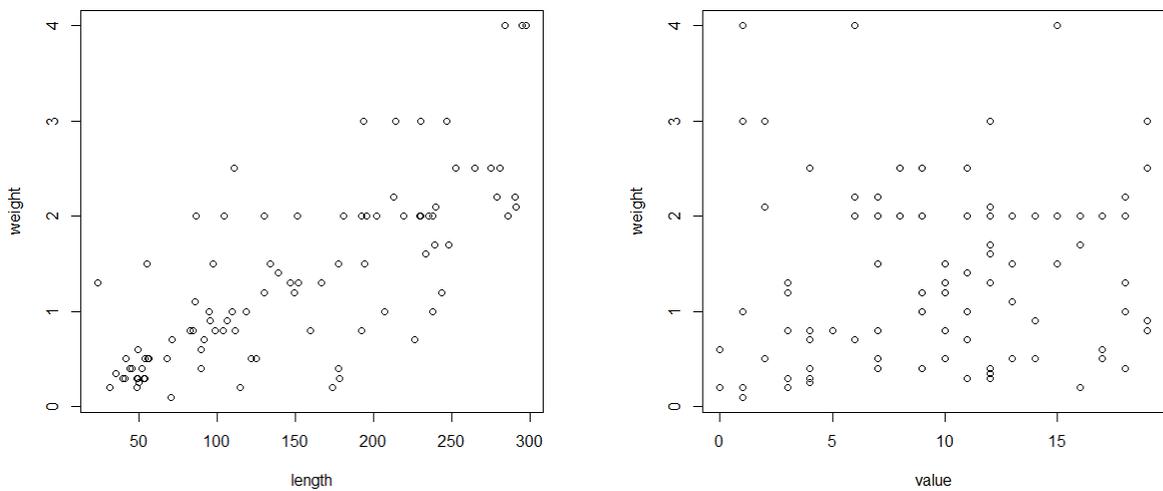
(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

表現に関する情報を与えない場合

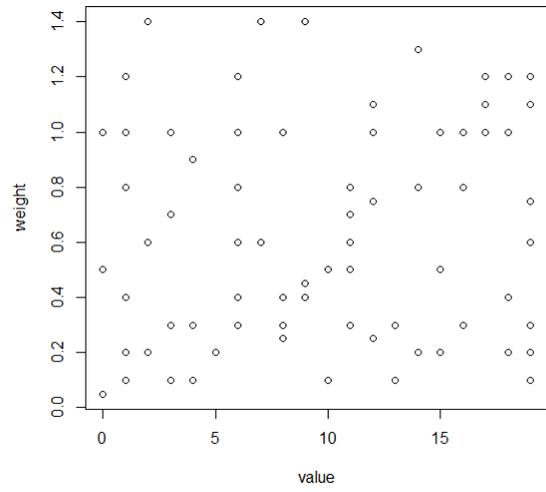
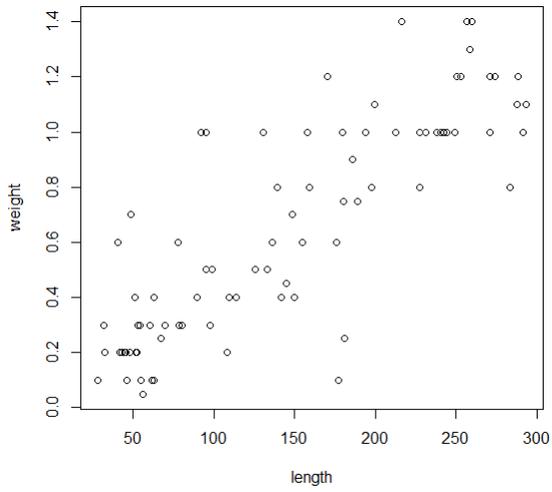
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（太さの表現）



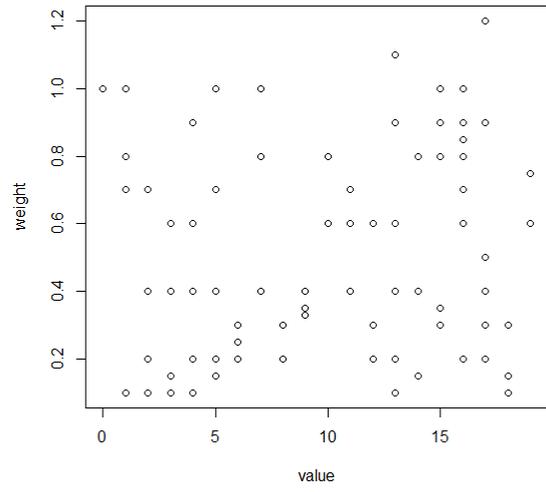
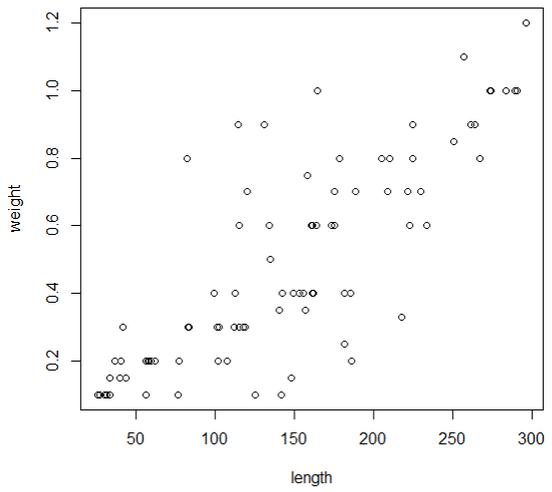
(a) 基準エッジが長さの範囲1, 太さの範囲1の場合



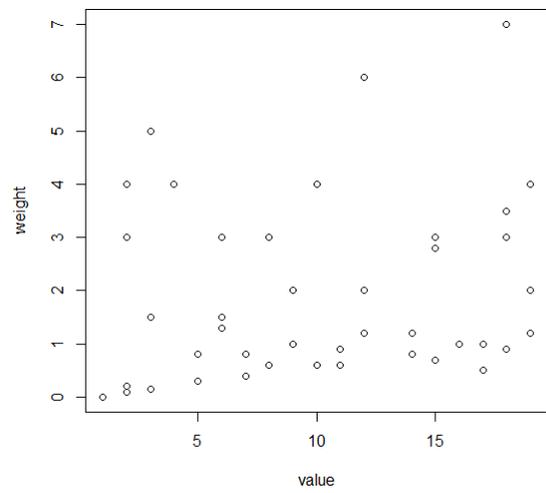
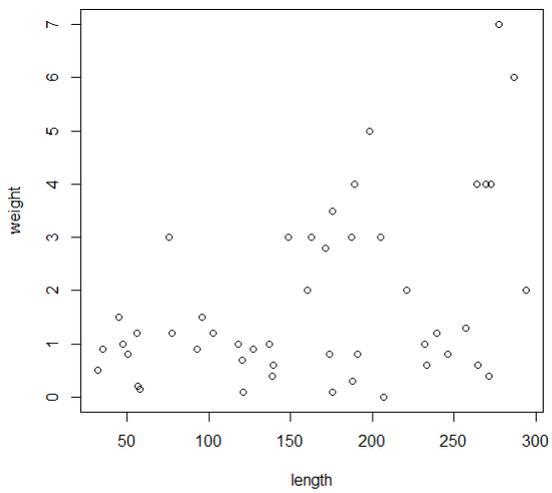
(b) 基準エッジが長さの範囲2, 太さの範囲2の場合



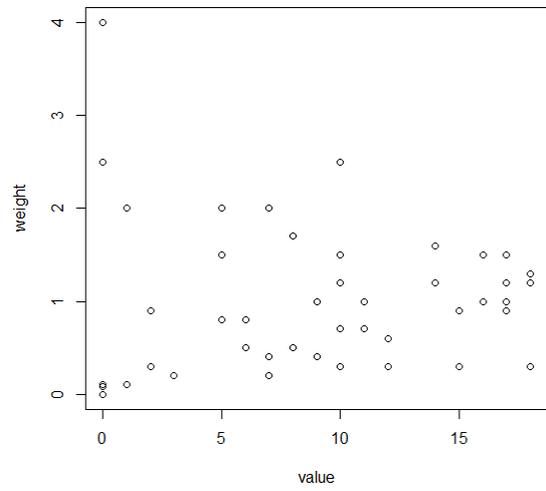
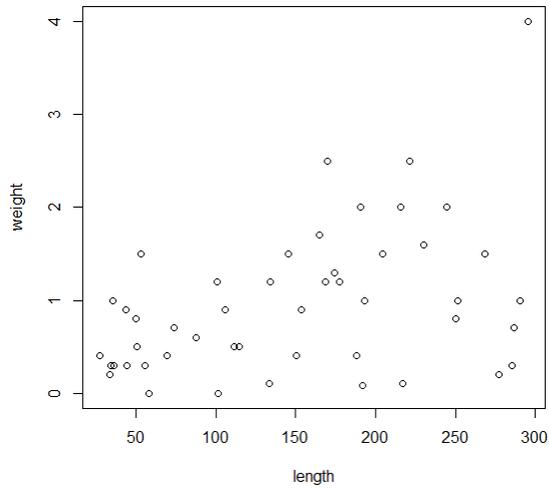
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



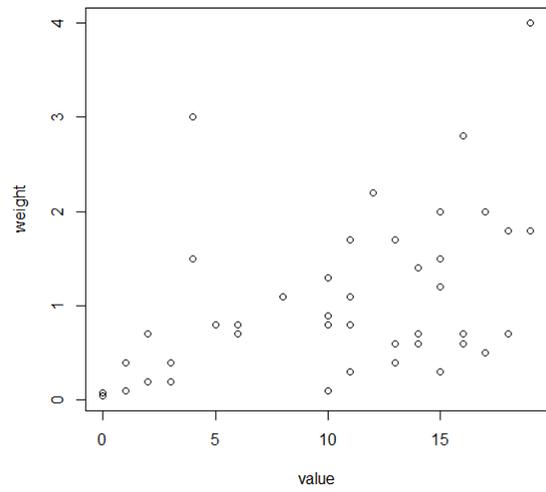
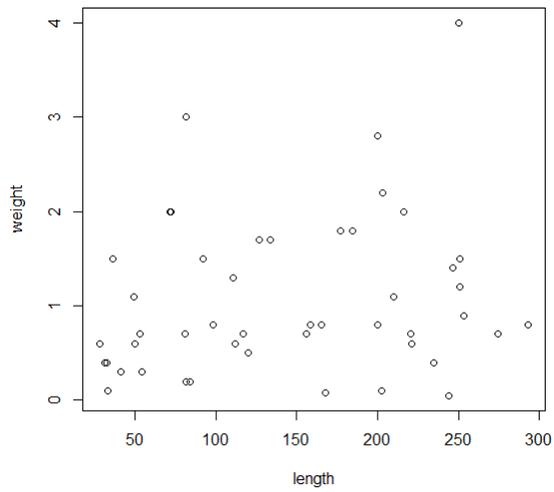
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



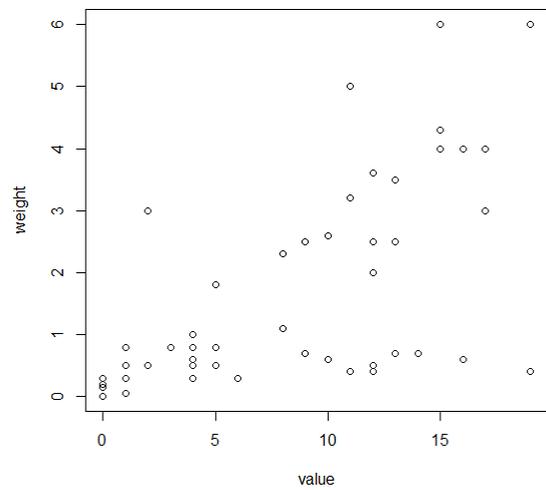
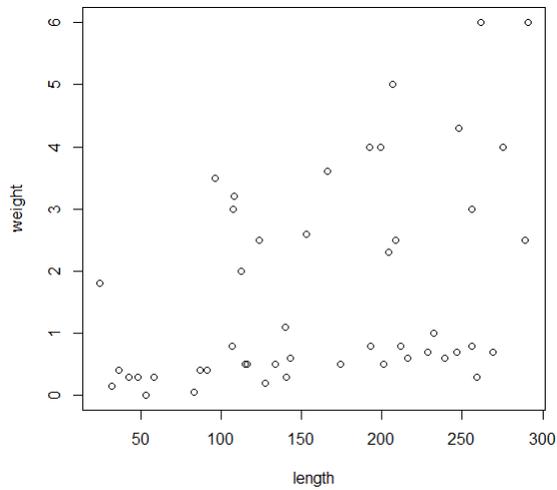
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

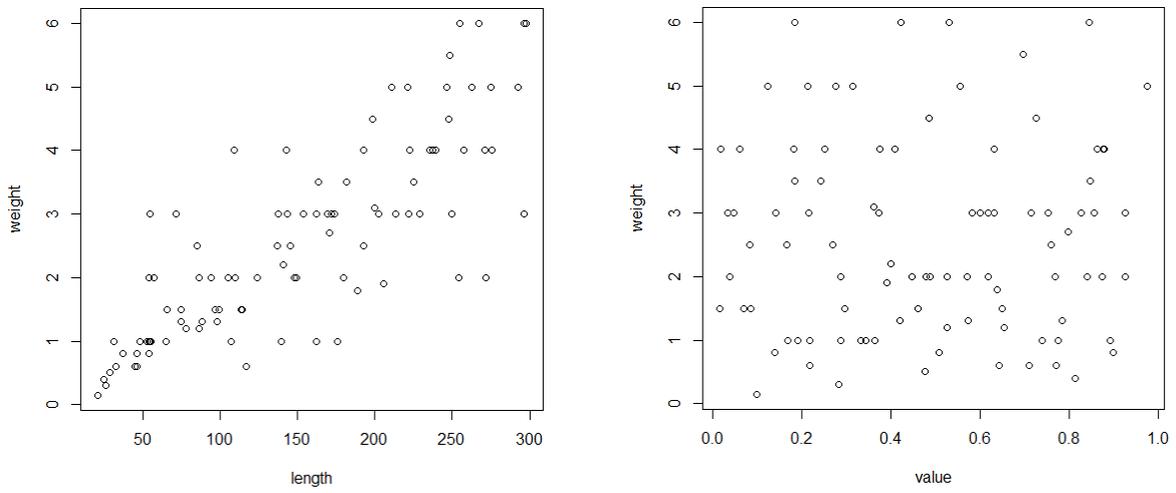


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

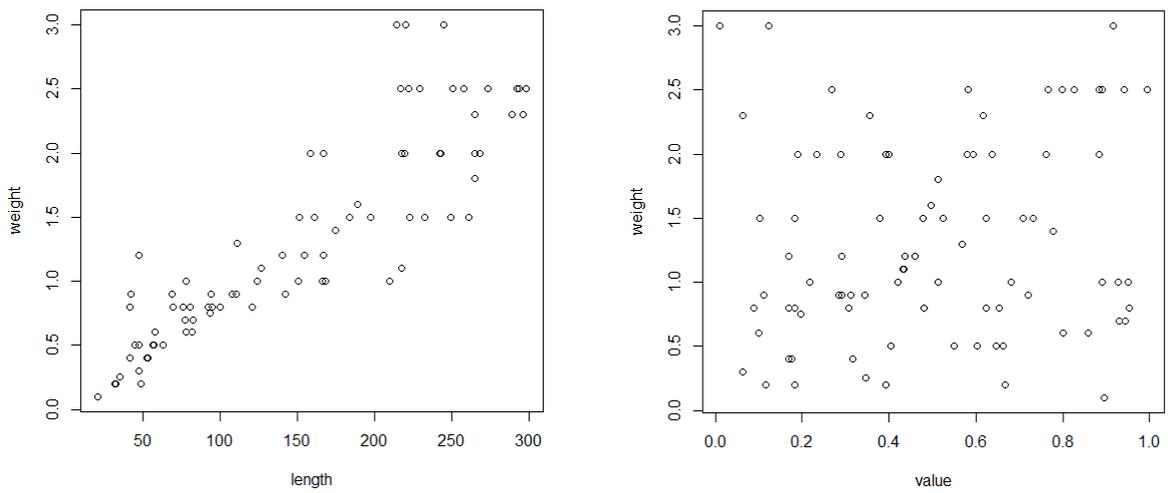


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

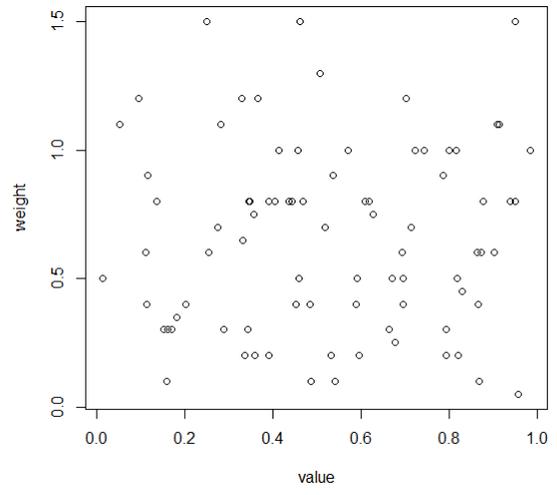
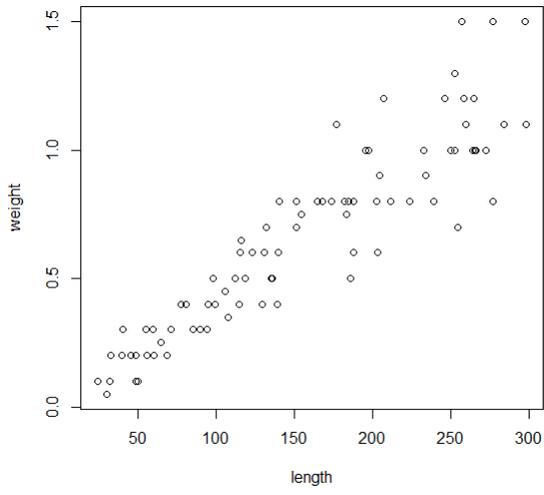
エッジが長いほど重みも大きいグラフ（明度の表現）



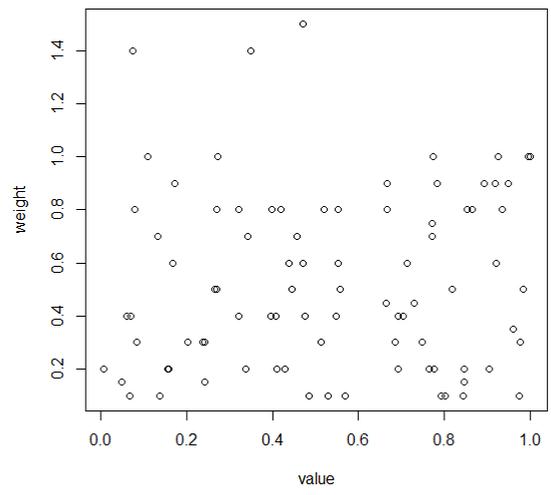
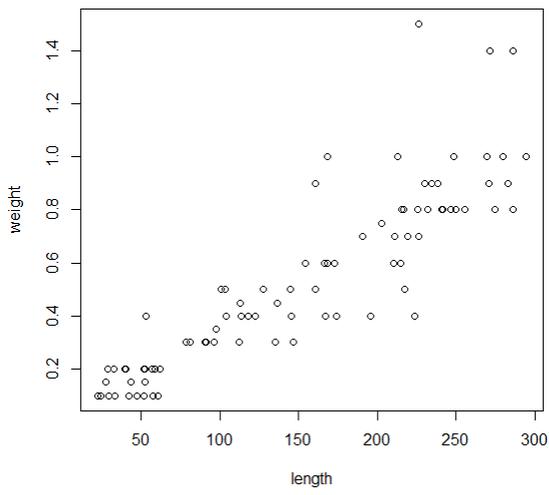
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



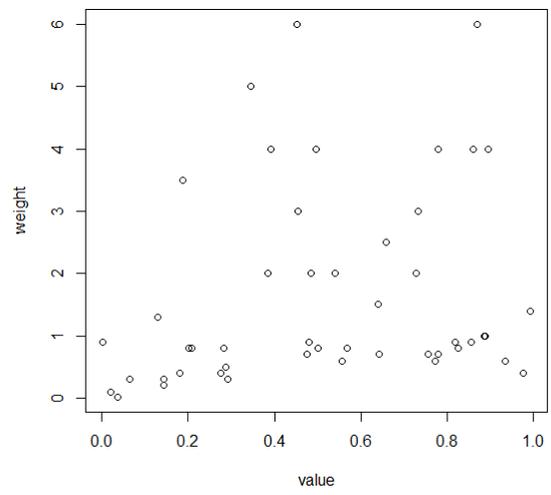
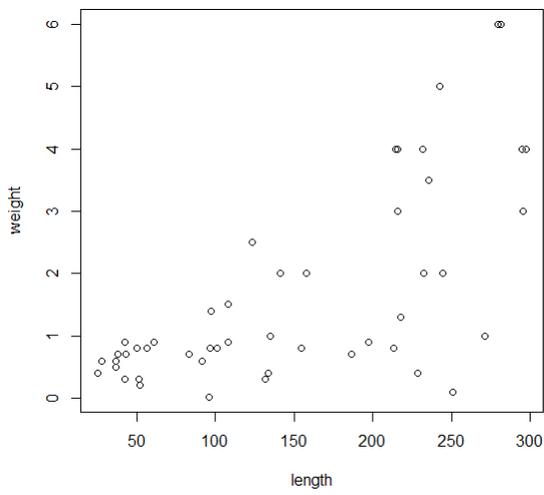
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



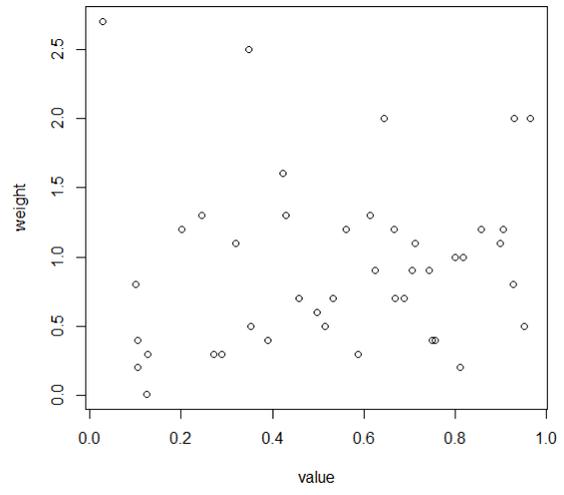
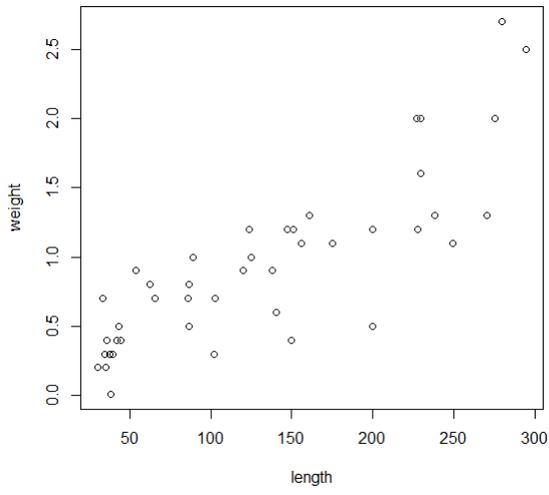
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



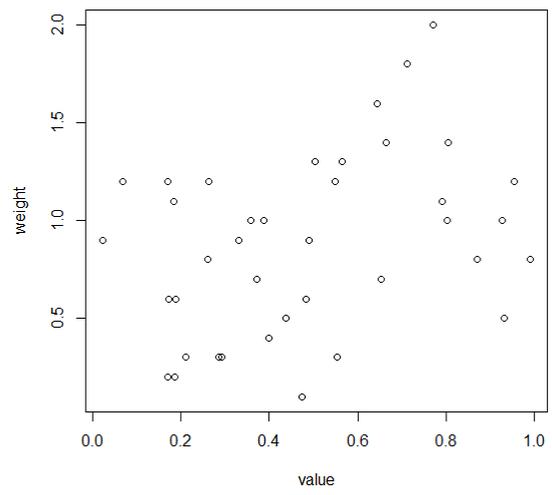
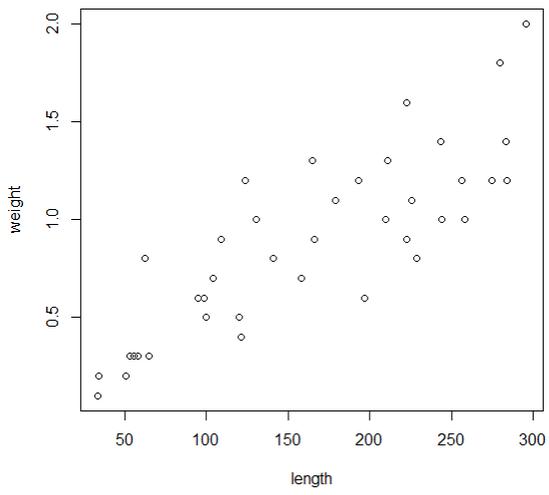
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



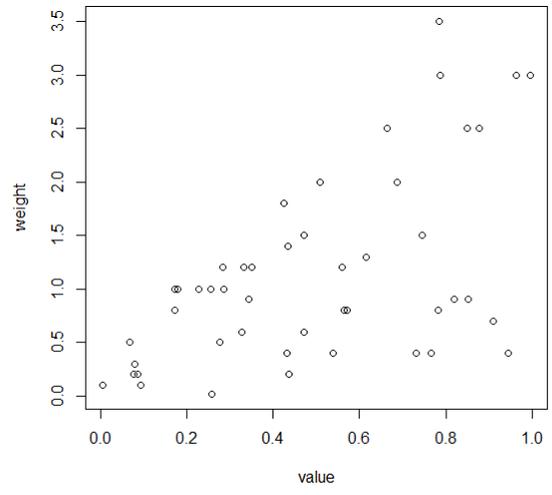
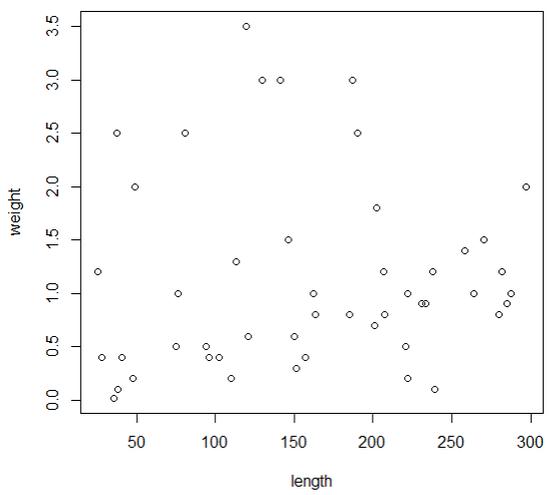
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

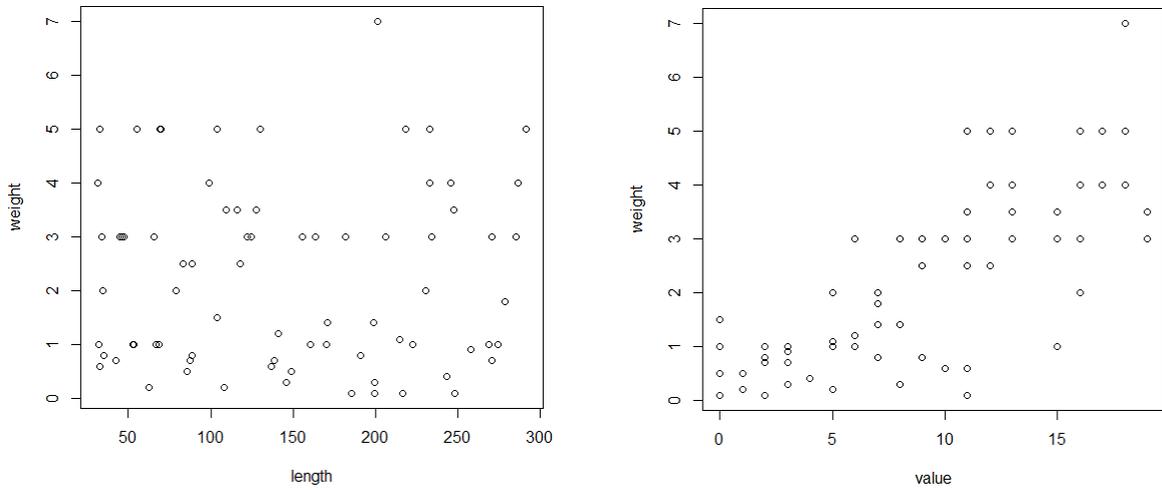


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

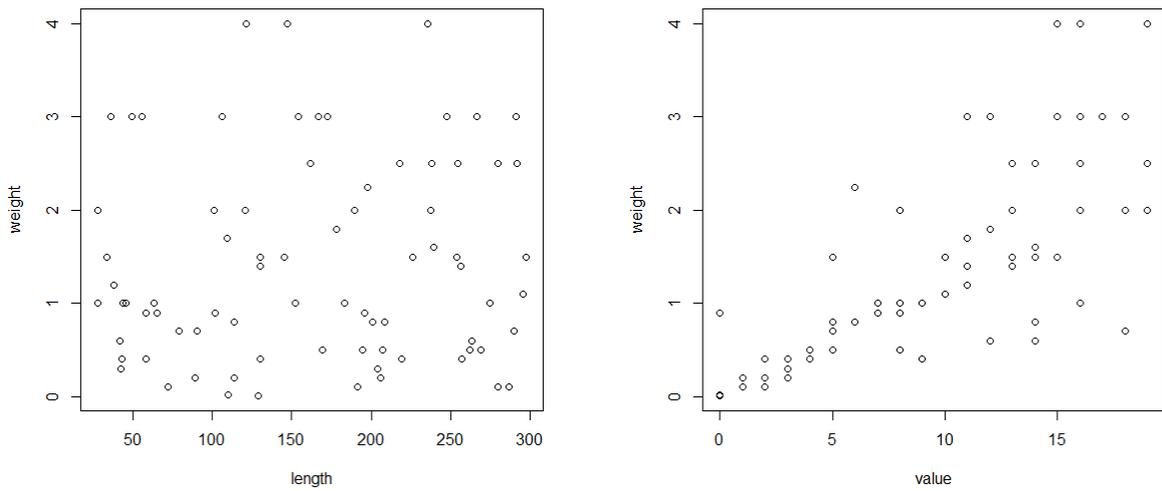


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

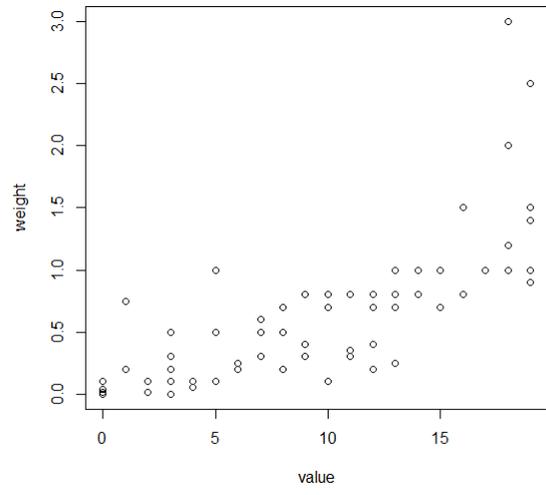
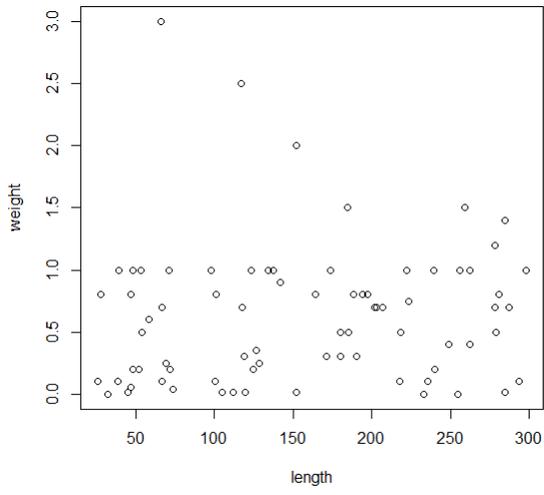
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（太さの表現）



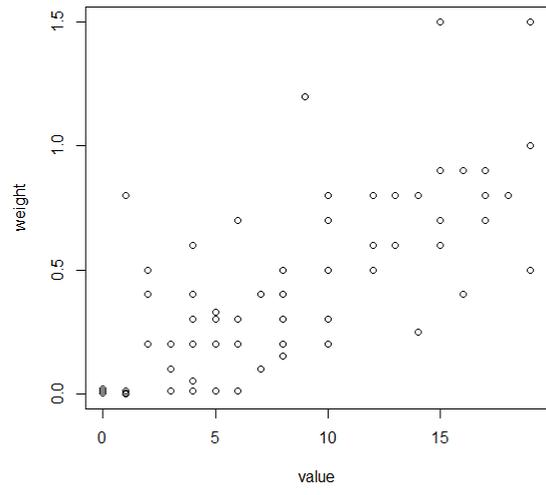
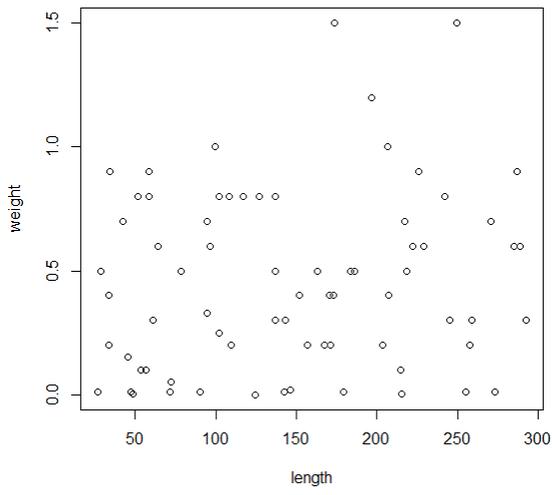
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



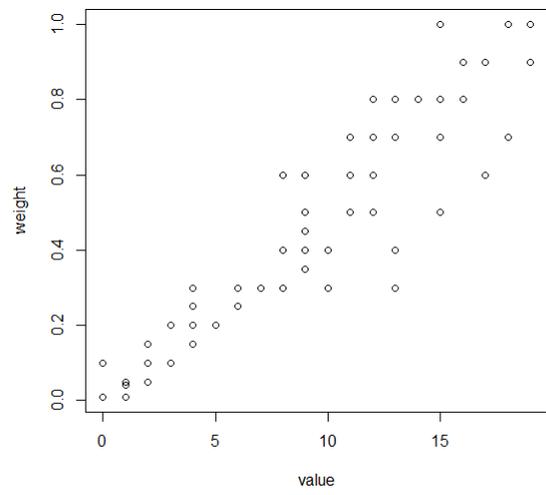
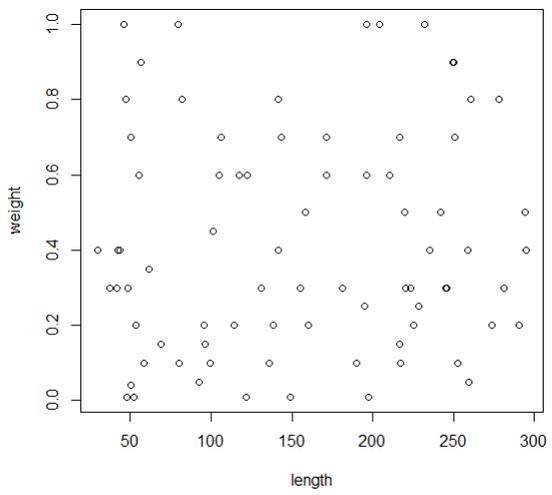
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



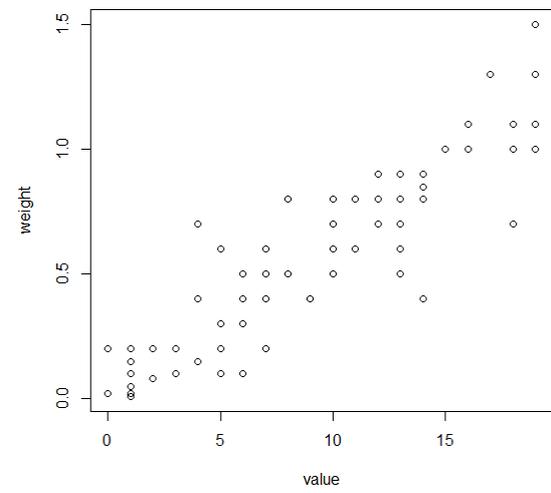
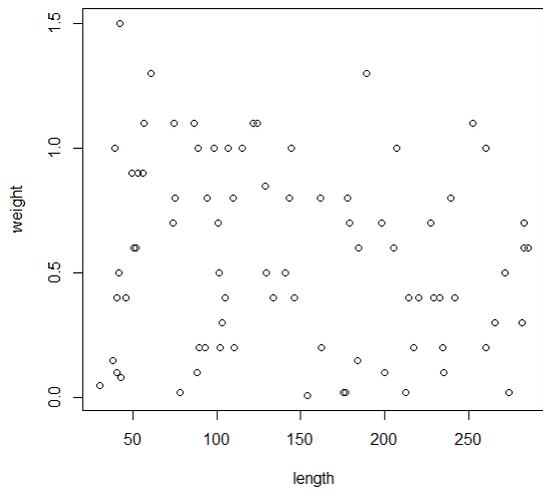
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



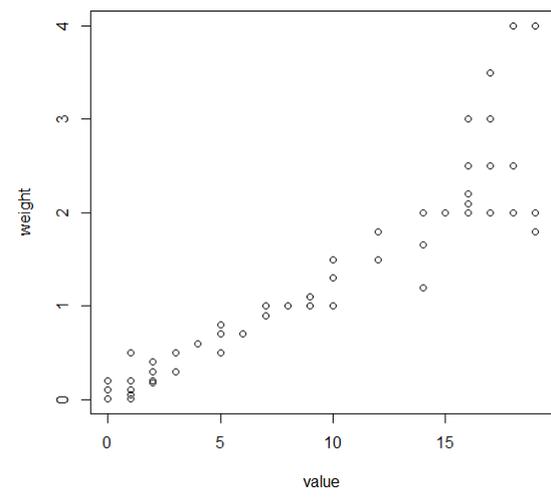
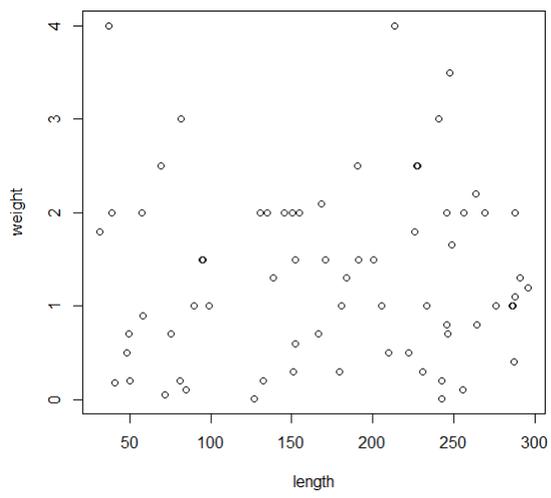
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



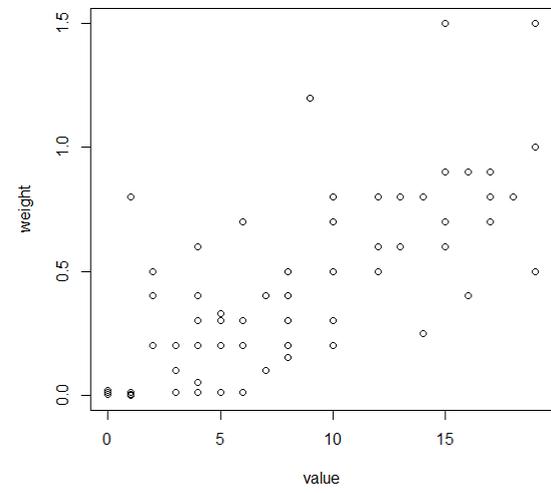
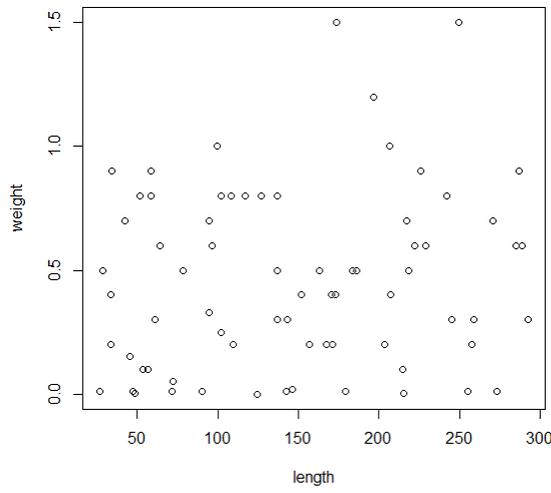
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

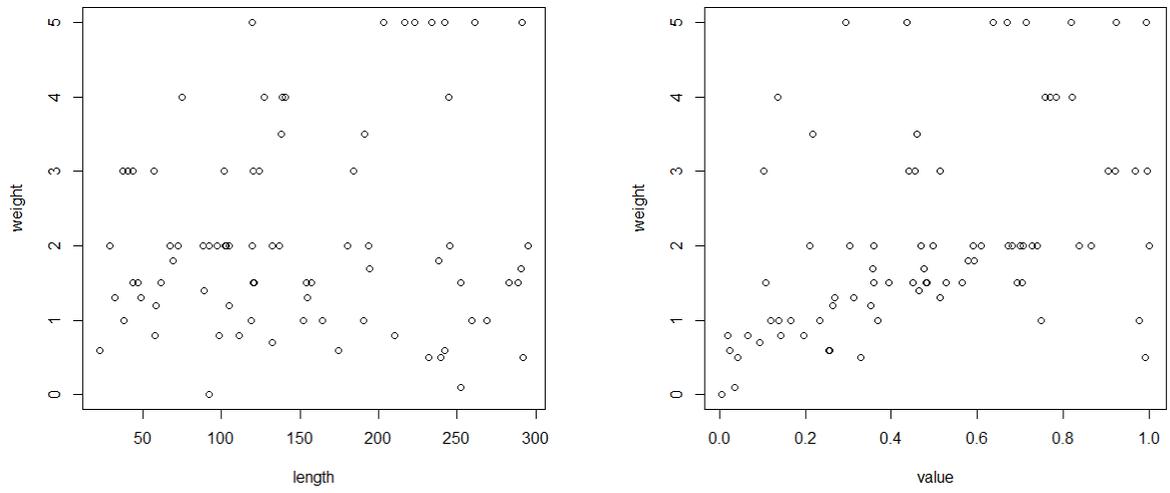


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

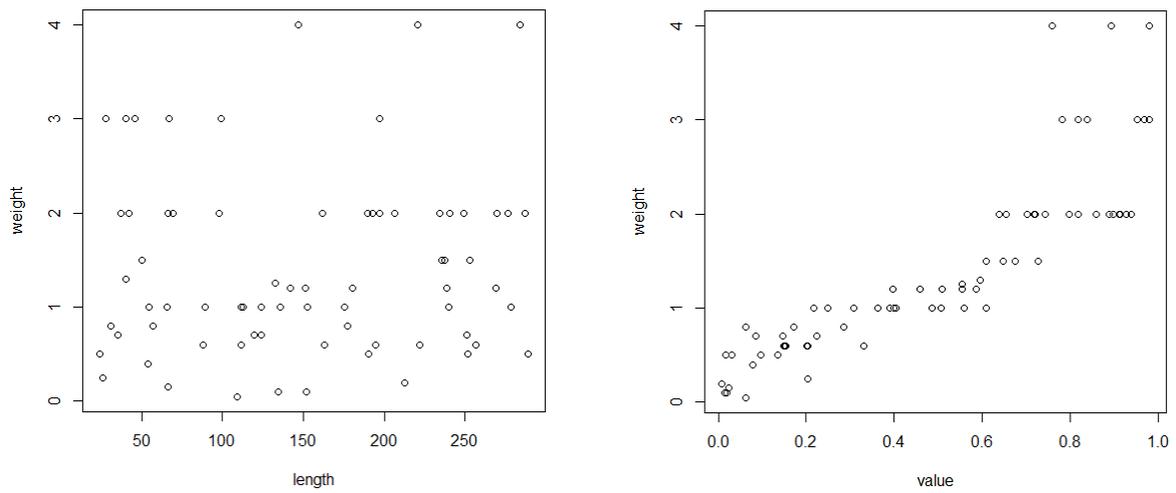


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

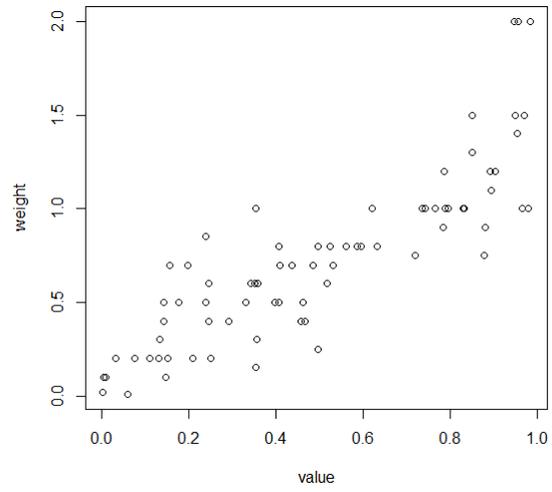
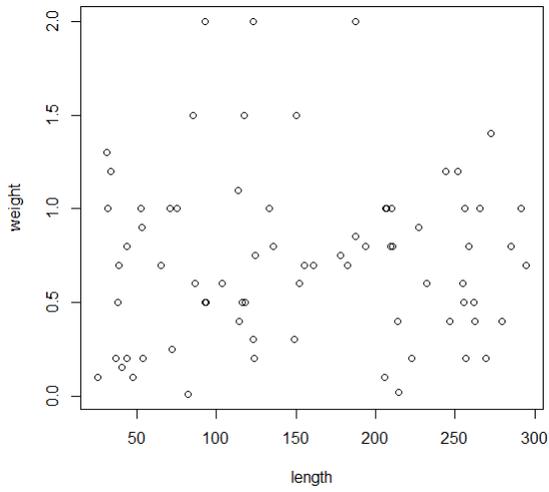
エッジが短いほど重みは大きいグラフ（明度の表現）



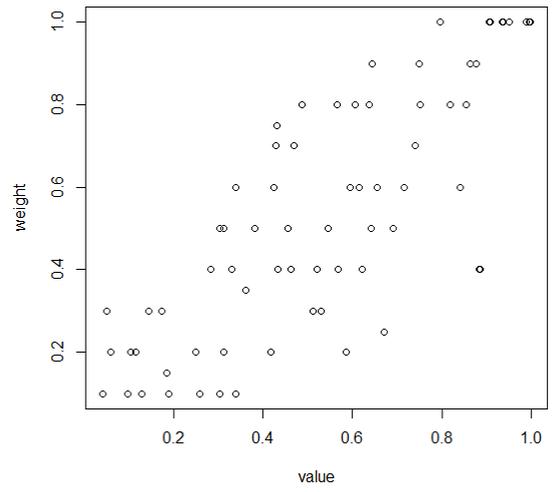
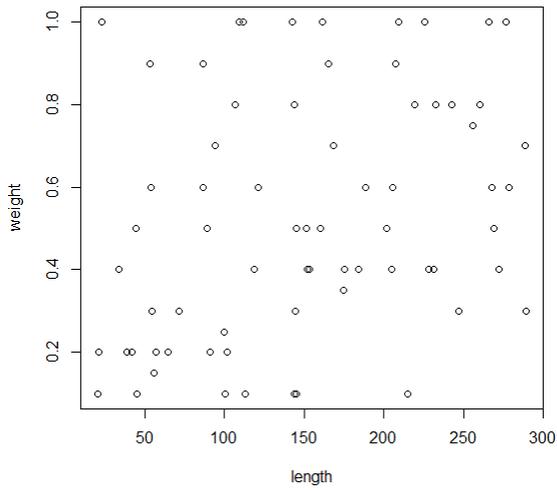
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



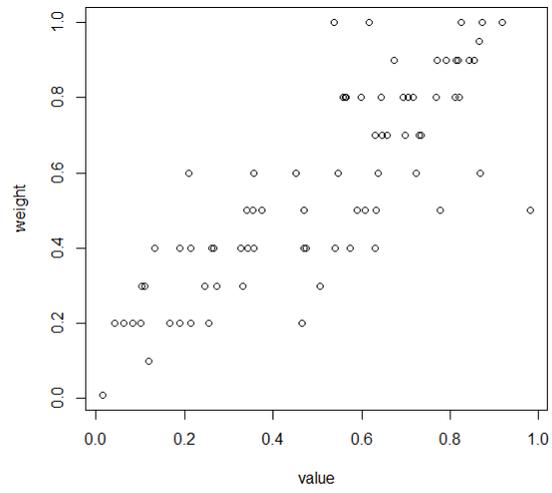
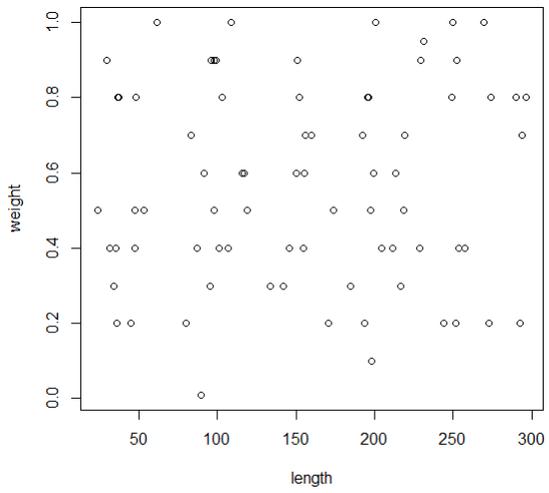
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



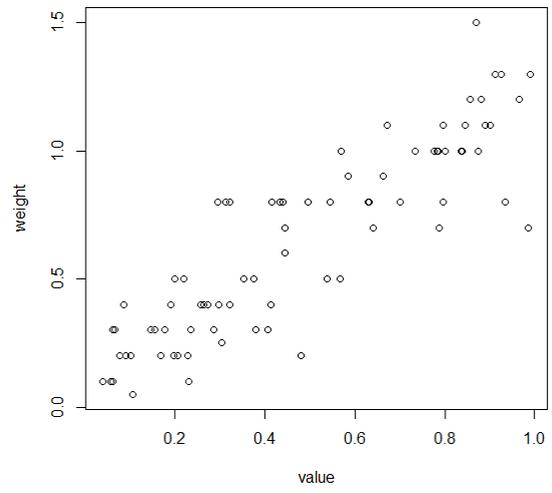
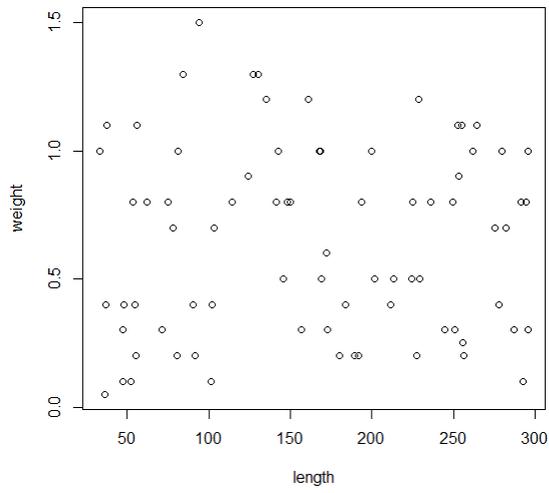
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



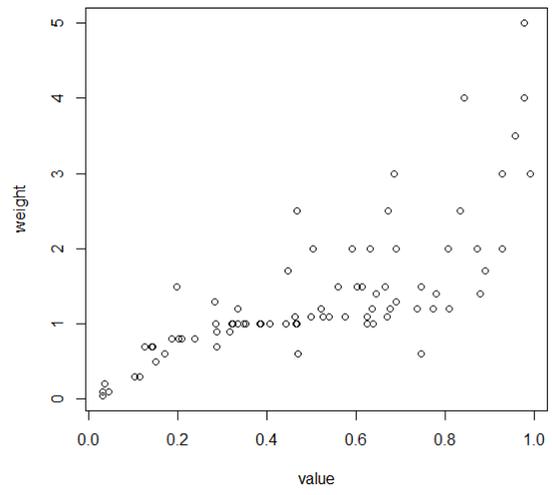
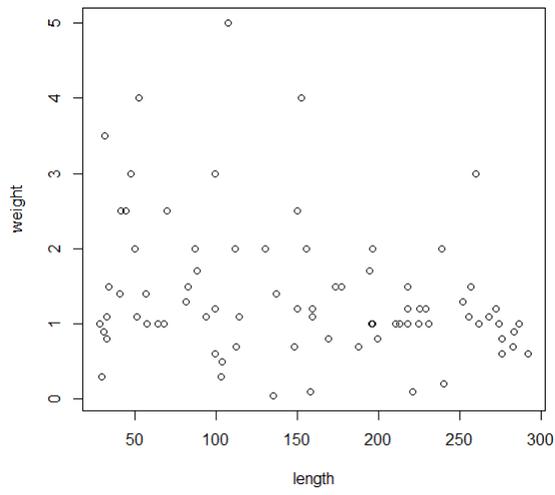
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



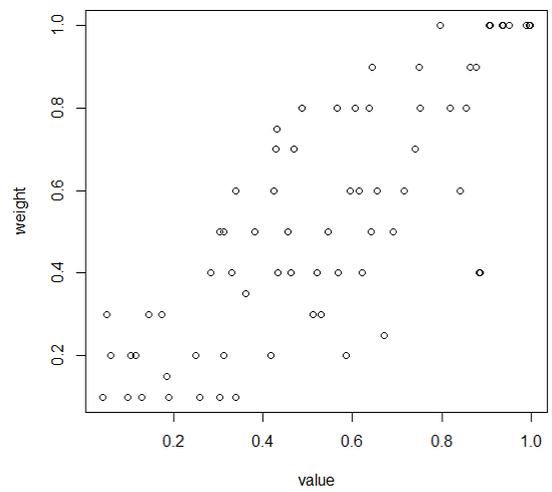
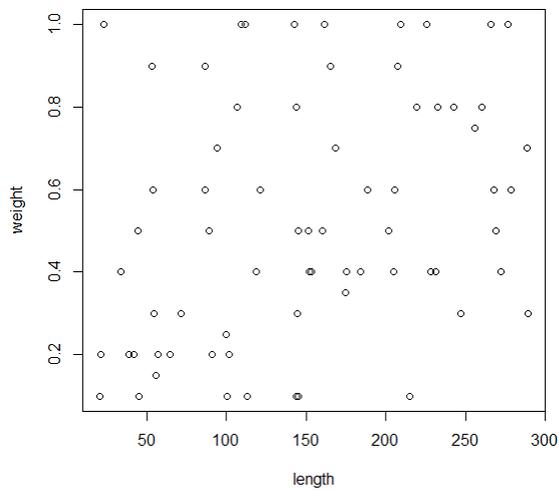
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

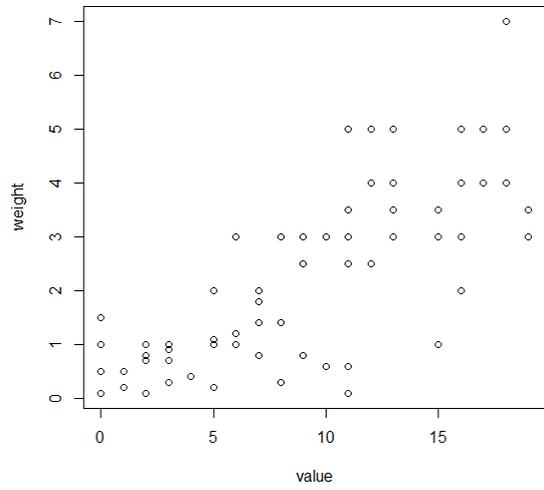
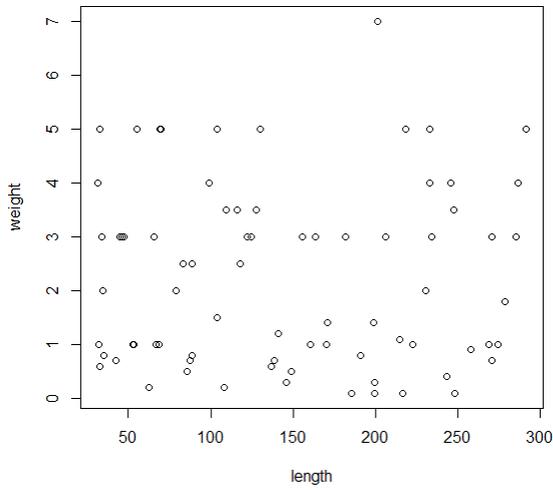


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

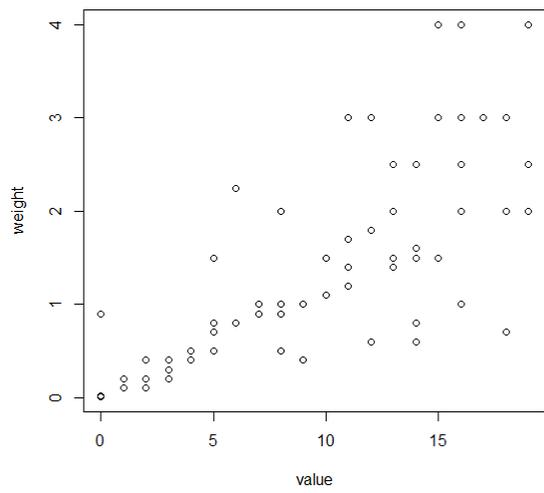
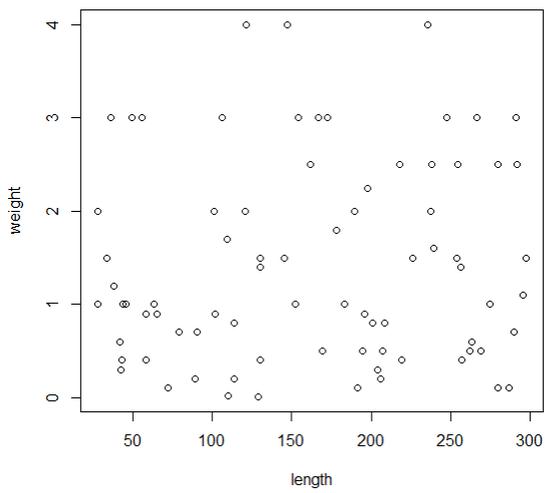


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

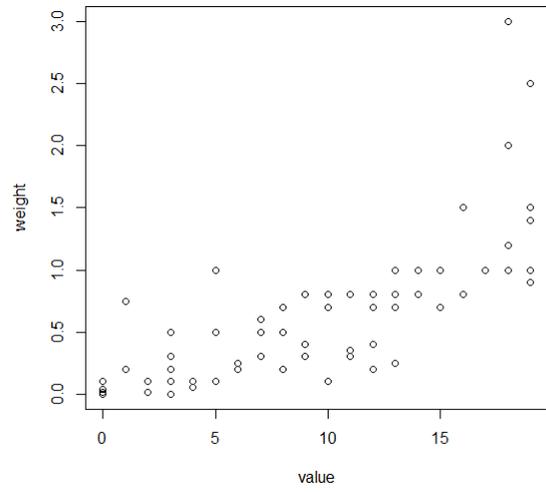
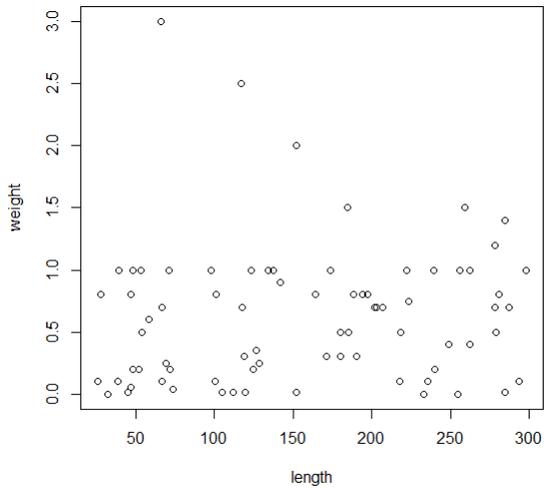
長さ結びつけづらいグラフ (太さの表現)



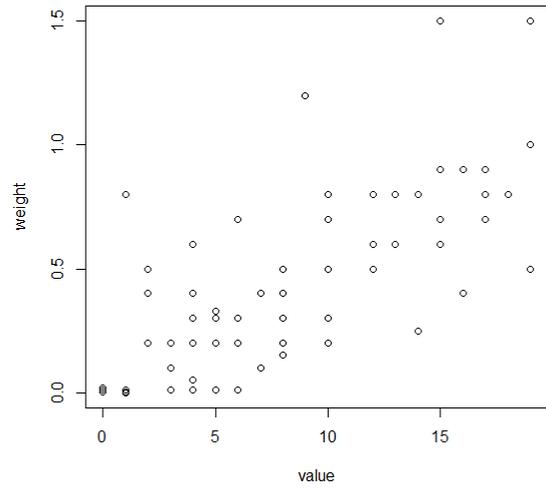
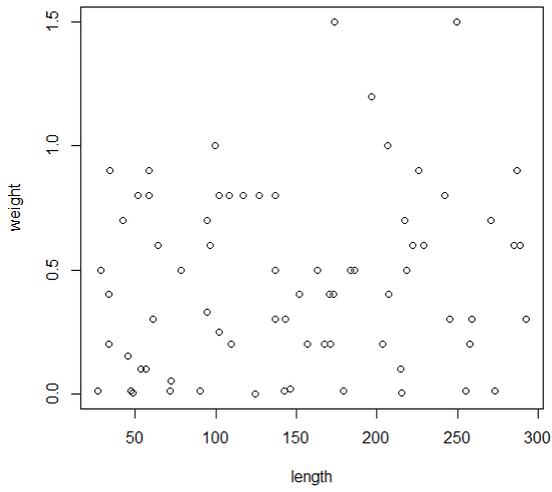
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



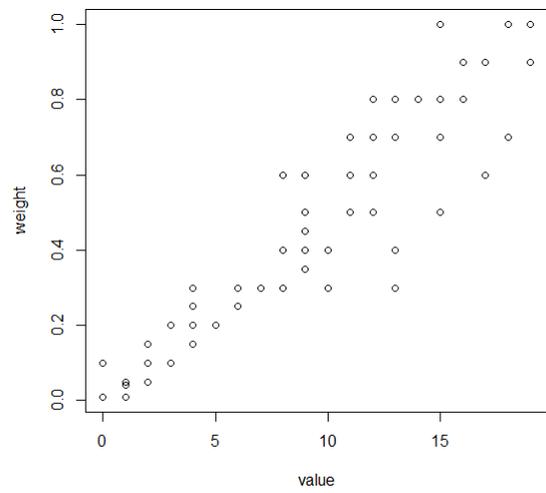
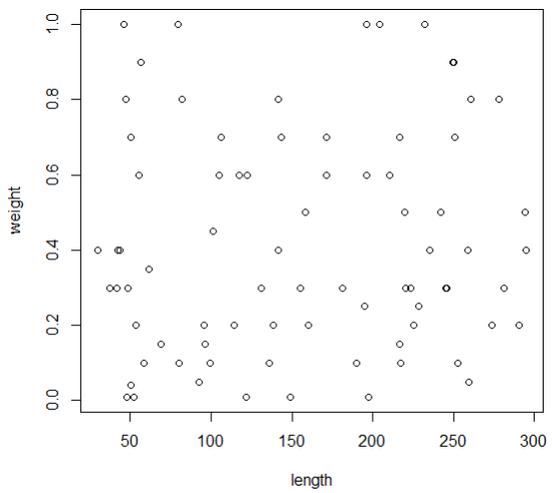
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



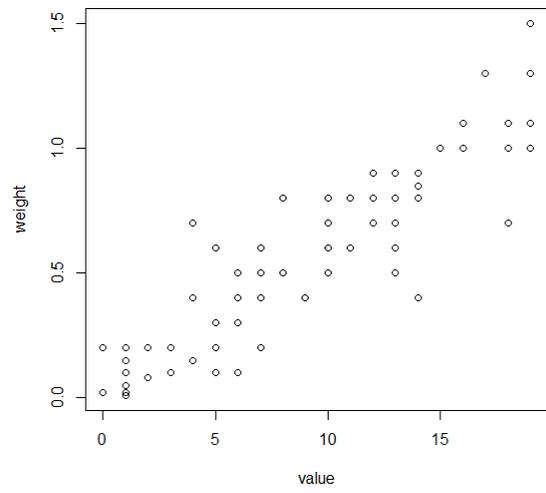
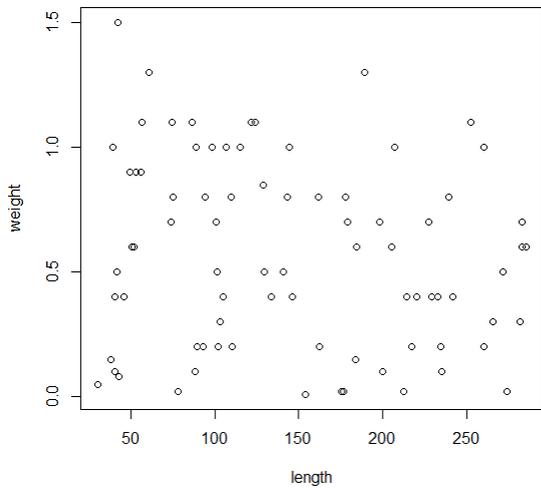
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



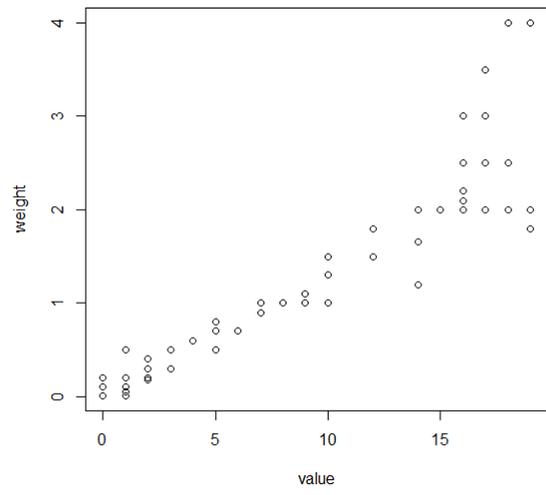
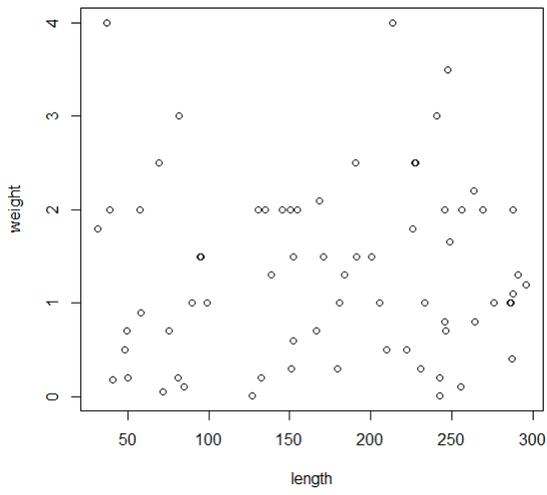
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



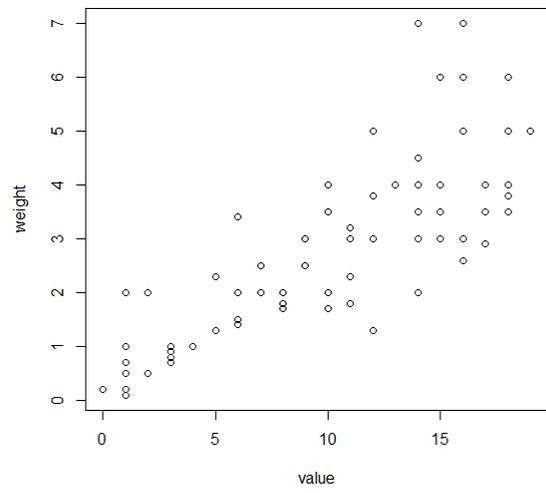
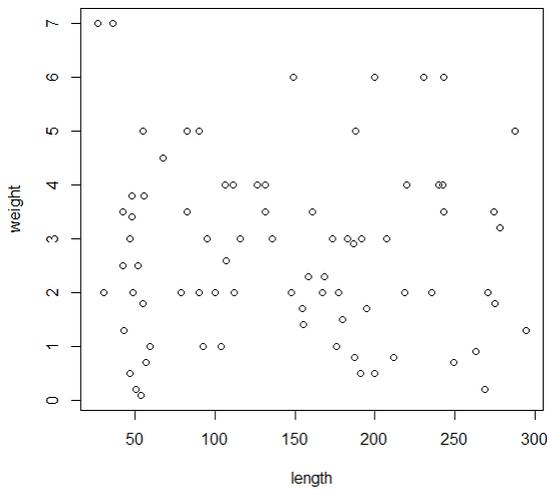
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合

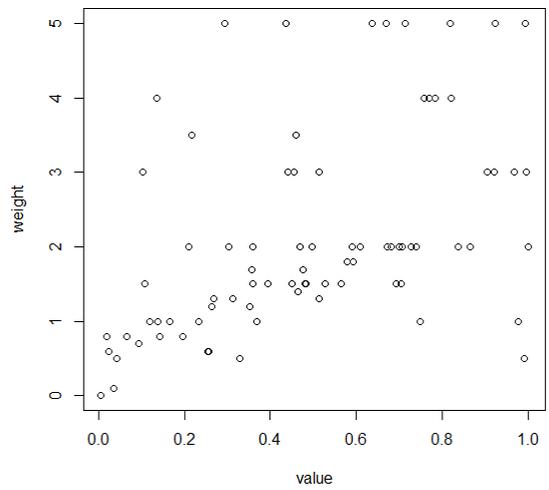
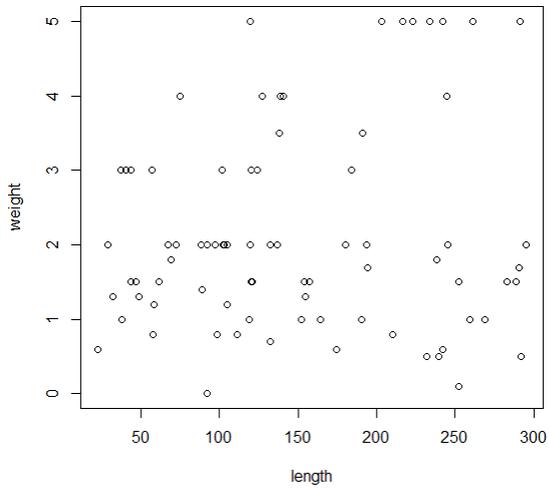


(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合

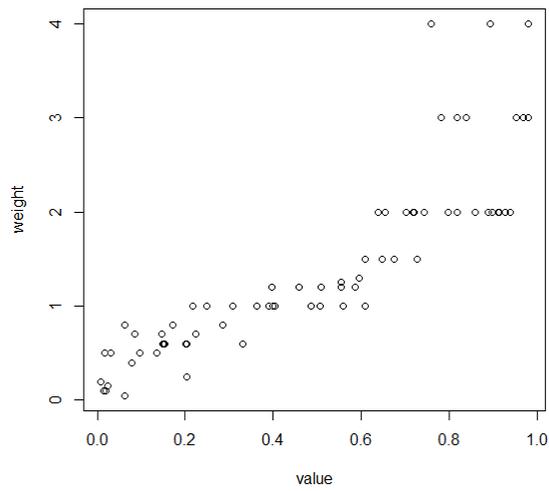
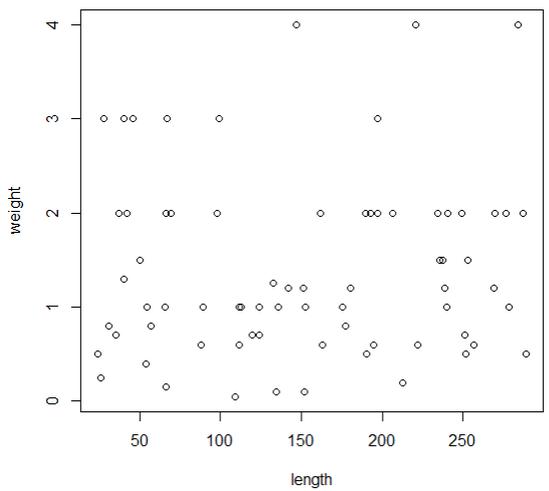


(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合

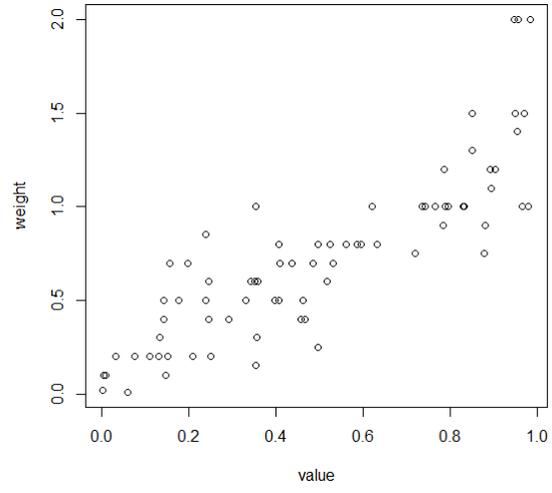
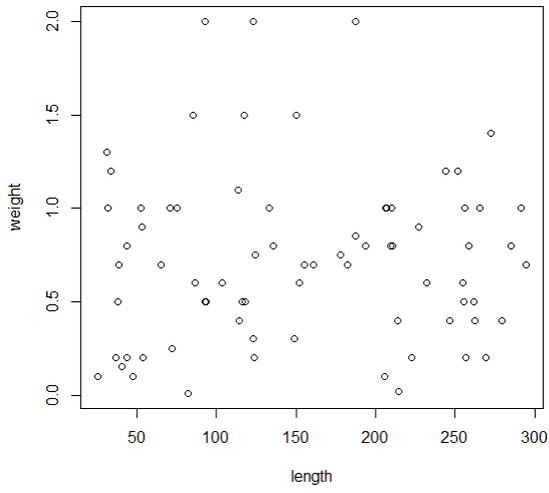
長さ結びつけづらいグラフ（明度の表現）



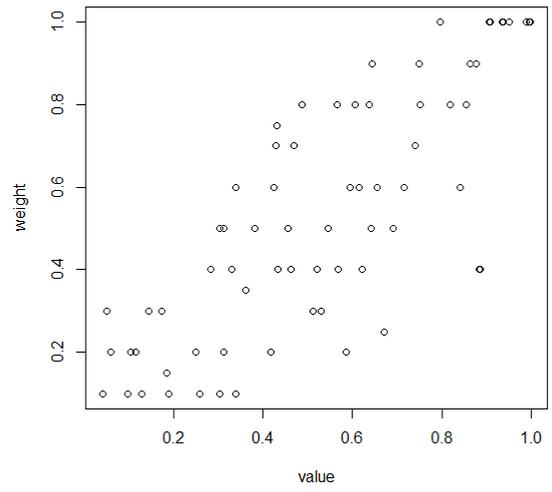
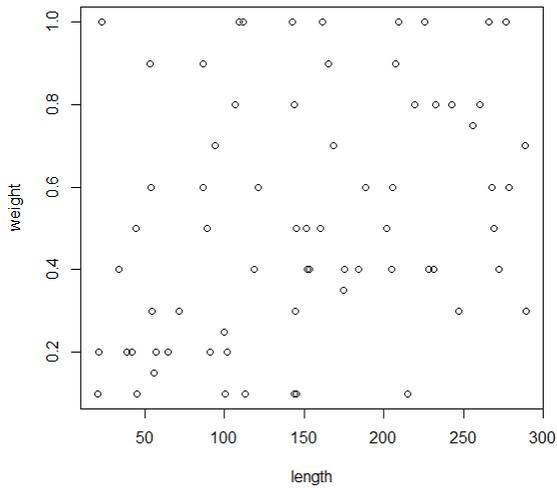
(a) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 1 の場合



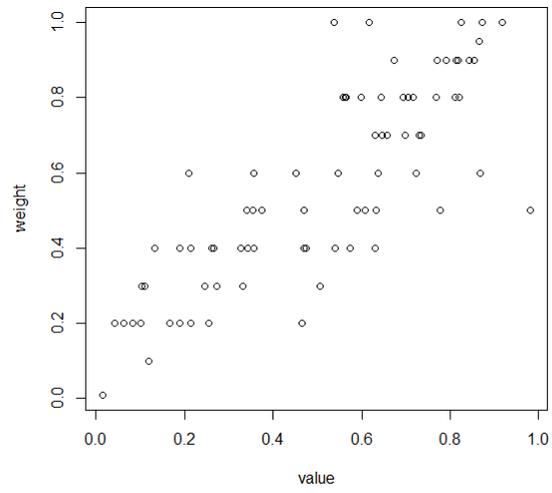
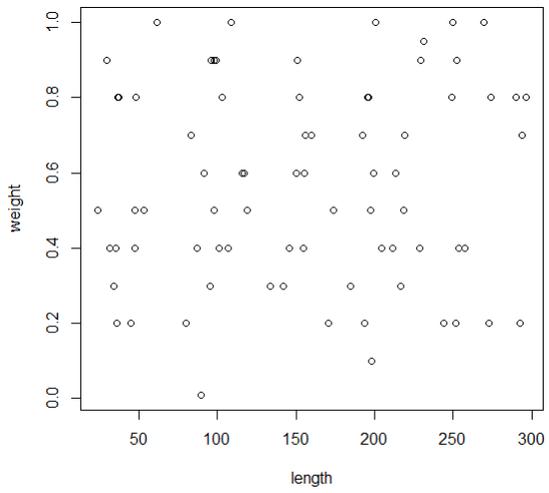
(b) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 2 の場合



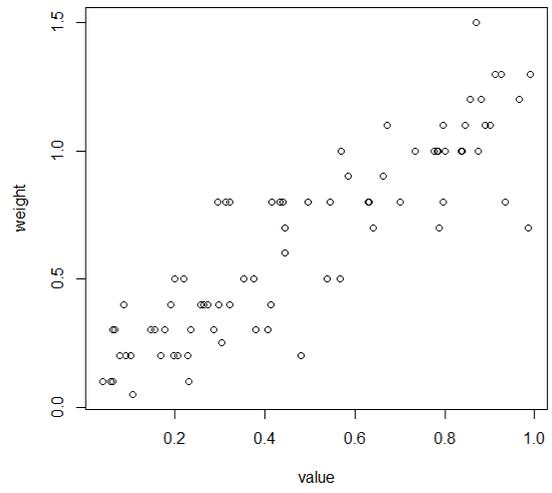
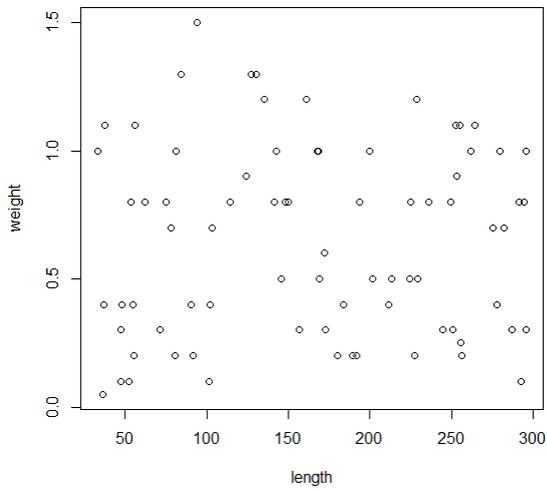
(c) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 4 の場合



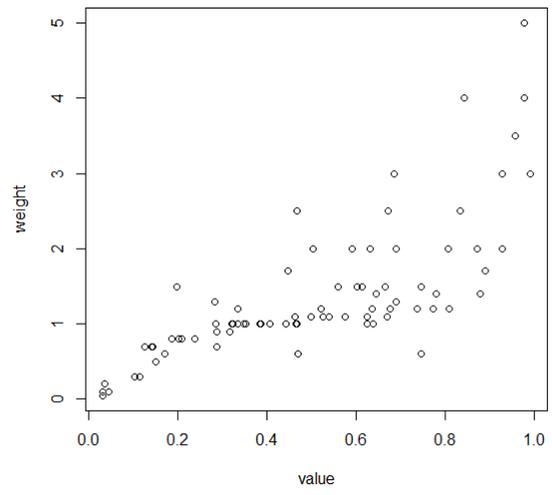
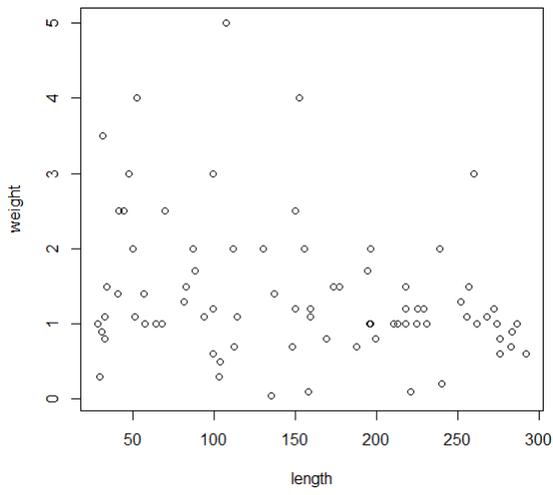
(d) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 5 の場合



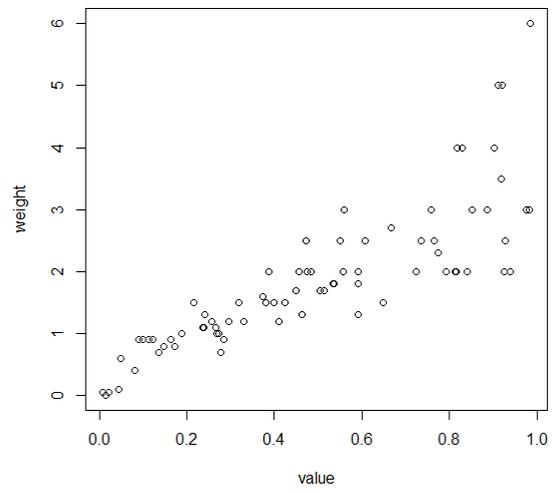
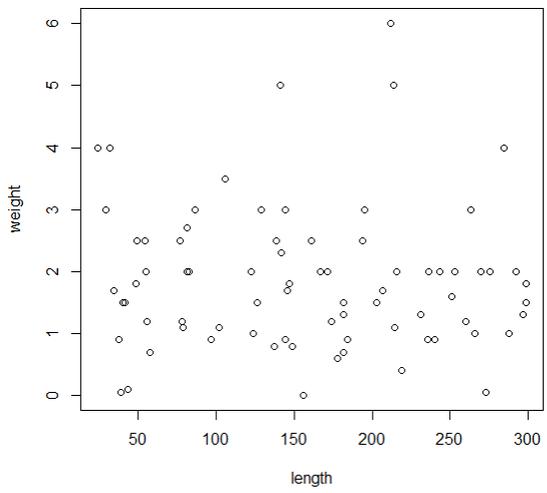
(e) 基準エッジが長さの範囲 1, 太さの範囲 5 の場合



(f) 基準エッジが長さの範囲 2, 太さの範囲 4 の場合



(g) 基準エッジが長さの範囲 4, 太さの範囲 2 の場合



(h) 基準エッジが長さの範囲 5, 太さの範囲 1 の場合