

2.1 最小全域木

驚くべきことに、シンプルなアルゴリズムによって最小全域木を発見できる。ここでは貪欲法 (greedy algorithm) に基づいた、各ステップで最もコストの低い選択をするアルゴリズムを 2 つ紹介する。

Kruskal 法の概要

G の全域森 $H = (V, F)$ を、最初は $F = \emptyset$ として保存する。
各ステップにおいて、森であることを保つようなコスト最小の枝 $e \notin F$ を加える。
 H が全域木となったら止める。

この方法は 1956 年に Kruskal によって述べられた。次のアルゴリズムは Prim 法として知られている。

Prim 法の概要

木 $H = (V(H), T)$ を、最初は V の元として何らかの頂点 r を取って $V(H) = \{r\}, T = \emptyset$ として保存する。
各ステップにおいて、 H が木であることを保つようなコスト最小の枝 $e \notin T$ を T へ加える。
 H が全域木となったら止める。

まずはこれらのアルゴリズムが最小全域木を見つけることを示す。その後、これらを効率化できることについて書く。

MST アルゴリズムの正当性

正当性を示す前に、いくつかの準備をする。

定義 2.1 連結性に関する基本的な記号

$G = (V, E)$ とし、 A を V の部分集合とする。 $\delta(A), \gamma(A)$ を

$$\delta(A) := \{vw \in E | v \in A, w \notin A\}$$

$$\gamma(A) := \{vw \in E | v, w \in A\}$$

と定義する。 $\delta(A)$ を G の切断 (cut) という

定理 2.3

グラフ $G = (V, E)$ について、次が成立する。

G が連結である $\Leftrightarrow \emptyset \neq A \neq V$ かつ $\delta(A) \neq \emptyset$ となるような V の部分集合 A が存在しない

証明

(\Rightarrow) について

対偶を示す。仮に $\emptyset \subsetneq A \subsetneq V$ かつ $\delta(A) = \emptyset$ となるような A が存在したとすると、 $v \in A$ から $w \notin A$ への路が存在せず、 G が連結でないとわかる。

(\Leftarrow) について

対偶を示す。 G は非連結なので $u, v \in V$ を u から v への路が存在しないように取れる。 $A := \{w \in V | u \text{ から } w \text{ への路が存在する}\}$ とすると、 $u \in A, v \notin A$ より $\emptyset \subsetneq A \subsetneq V$ である。さらに $\delta(A) \neq \emptyset$ と仮定すると、 $pq \in E$ を $p \in A, q \notin A$ となるように取れるが、 p への路に pq を追加することで u から q への路が作れてしまい $q \in A$ となり矛盾する。よって $\delta(A) = \emptyset$ とわかる。以上より条件をみたま A が存在する。□

定義 2.2

$G = (V, E)$, $A \subseteq E$ とする. A が G のある最小全域木の枝集合の部分集合であるとき, A を最小全域木へ拡張できる (*extendible*) という.

定義 2.3 連結成分 (component)

グラフ $G = (V, E)$ と $v \in V$ について, $C_v := \{w \in V | w \text{ から } v \text{ への路が存在する} \}$ と定義する. また, G の部分グラフ H がある $v \in V$ を使って $H = G[C_v]$ と表せるとき, H を G の連結成分という.

補題 2.7

$H = (V, T)$ を G の全域木とし, $e = vw \in G \setminus H$ とする. また, $f \in T$ を T 上の v から w への初等的な路 P に現れる枝とする. このとき, $H' = (V, (T \cup \{e\}) \setminus \{f\})$ は G の全域木.

証明

$P = v, \dots, v_f, f, w_f, \dots, w$ とする. 任意に $a, b \in V$ を取ると, T 上の a から b への路 W が存在する. ここで, W に現れた v_f, f, w_f の部分を $v_f, \dots, v, e, w, \dots, w_f$ に置き換えることで H' 上の路へと変形できる. よって, H' は連結であり, 補題 2.2 より G の全域木とわかる. \square

定理 2.4

$B \subseteq E$ は $G = (V, E)$ の最小全域木へ拡張できるとする. また, D を G のある切断で $B \cap D = \emptyset$ をみたすものとし, e を D のコスト最小の枝とする. このとき, $B \cup \{e\}$ は最小全域木へ拡張できる.

証明 \square **定理 2.5**

任意の連結グラフ G と枝のコスト c に対して, *Prim* 法は最小全域木を見

つける.

証明

まず, 各ステップで $\delta(V(H)) = \{f \in E \mid f \text{ を } H \text{ に追加したときに木であることを保つ} \}$ が成立する. これは, 補題 2.1 より H へ追加して閉路ができる枝は両方の端点が H に含まれる枝であり, さらに定理 2.3 から, H へ追加して非連結となる枝は両方の端点が H に含まれない枝であることから従う. よって, 各ステップでは $\delta(V(H))$ の中でコスト最小の枝が選ばれる. そして G が連結であることと定理 2.3 より $\delta(V(H))$ は H が G の全域木となるまで空集合にならないので, H は全域木となってこのアルゴリズムが停止するとわかる. さらに, 空集合は最小全域木へと拡張できると, 各ステップにおいて $B = T, D = \delta(V(H))$ として定理 2.4 を適用した結果から, 数学的帰納法により $E(H)$ が常に最小全域木へ拡張できるとわかる. よって, *Prim* 法は最小全域木を見つける. \square

定理 2.6

任意の連結グラフ G と枝のコスト c に対して, *Kruskal* 法は最小全域木を見つける.

証明

まず, S_1, \dots, S_k をあるステップでの H の各連結成分の頂点集合とする.

補題 2.1 より, 追加される枝としては $\bigcup_{i=1}^k \delta(S_i)$ の中でコストが最小の枝

が選ばれると分かる. H が全域木でなくて, なおかつ $\bigcup_{i=1}^k \delta(S_i) = \emptyset$ とな

ると仮定すると, $\delta(S_i) = \emptyset, \emptyset \subsetneq S_i \subsetneq V$ となり, 定理 2.3 より G が連結であることに矛盾する. よって, H は全域木となってこのアルゴリズムは停止する. また, 空集合は最小全域木へ拡張できる. そして, あるステップで $E(H)$ に追加される枝 e の端点が $\delta(S_i)$ に含まれているとすると,

$B = E(H), D = \delta(S_i)$ として定理 2.5 を適用できて, $E(H) \cup e$ も最小全域木へ拡張できるとわかる. 以上から, 数学的帰納法より *Kruskal* 法は最小全域木を見つける. \square