Heuristiken für effiziente Operatorplatzierung in verteilten Stream-Verarbeitungssystemen

Cedric Sillaber

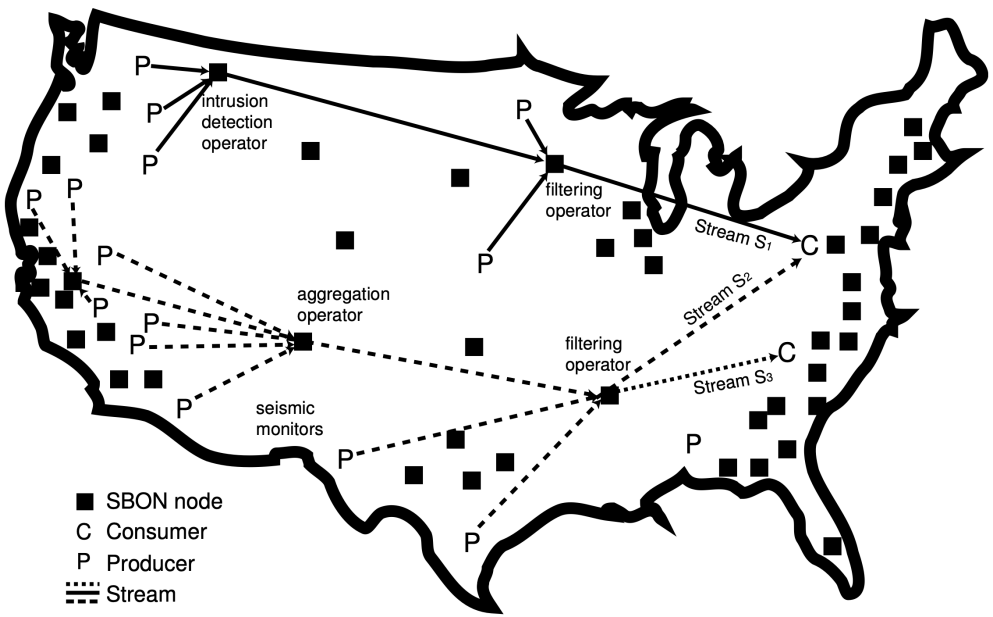
June 2024

Motivation

- Verteilte Stream-Verarbeitungssysteme bestehen aus etlichen physischen Rechnern.
- Welcher Rechner führt welche Operationen aus?
  - Berechnung optimaler Operatorplatzierung ist NP-schwer!
    $\rightarrow$ Approximierung durch bekannte Heuristiken
- Ziel: Latenz, Netzwerkauslastung, Verfügbarkeit, etc. optimieren

Was ist ein Operator?

- Verarbeitungseinheit in einem Stream-Verarbeitungssystem
- Beispiele: Filter, Aggregatoren, Joins



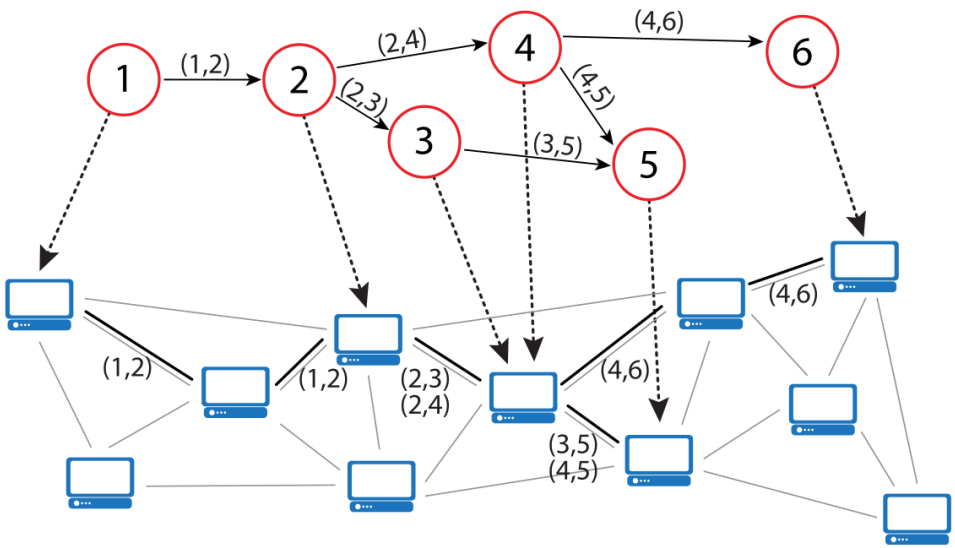
Quelle: P. Pietzuch et al., Network-aware operator placement for stream-processing systems.

Formale Definition von Streamverarbeitungssystemen

- Zwei Modelle, definiert durch gerichtete gewichtete Graphen $G = (V, E)$
- *Datenstrom-Modell* beschreibt den Fluss von Datenströmen
  - Was sind Quellen, was sind Senken? Wohin fließen Daten?
  - Wo sollte sortiert, gefiltert, gejoint werden?
  - Dargestellt mit $G_{svs} = (V_{svs}, E_{svs})$
- *Ressourcen-Modell* beschreibt physische Rechner und deren Verknüpfungen
  - dargestellt mit $G_{res} = (V_{res}, E_{res})$

Problem der Operatorplatzierung

- Mapping zwischen *Datenstrom-* und *Ressourcen-Modell* (G_{svs} und G_{res})
- Möglichst effizient - Minimierung von Quality of Service Attributen



Quelle: Matteo Nardelli et al., Efficient Operator Placement for Distributed Data Stream Processing Applications

Formale Definition des OPPs

- Formal definiert mit:

$$\arg\min_{x} F(x)$$

$$\sum_{i \in V_{svs}} C_i x_{i,u} < C_u \quad \forall u \in V_{res}$$

$$\sum_{u \in V_{res}^i} x_{i,u} = 1 \quad \forall i \in V_{dsp}$$

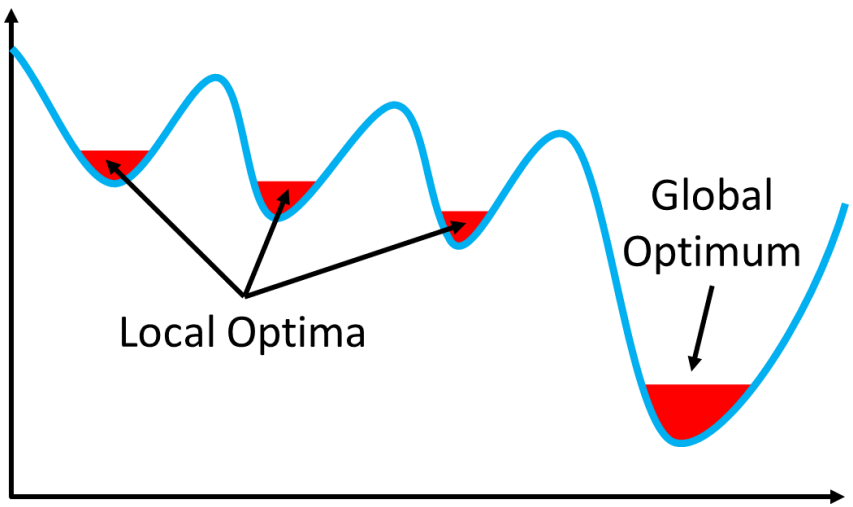
$$x_{i,u} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_{svs}, u \in V_{res}^i$$

Zu minimierende Funktion F:

$$F(x) = w_r \frac{R(x) - R_{min}}{R_{max} - R_{min}} + w_a \frac{\log A_{max} - \log A(x)}{\log A_{max} - \log A_{min}} + w_z \frac{Z(x) - Z_{min}}{Z_{max} - Z_{min}}$$

Heuristiken - Greedy First-Fit

- Näherungsverfahren zur Lösung von Optimierungsproblemen
- **Greedy First-Fit**:
  - Physische Ressourcen basierend auf Straffunktion sortiert (*greedy*)
  - Erster passender Rechner nimmt Operator auf (*first-fit*)
  - Vorteile: Einfachheit, schnelle Berechnungen
  - Nachteile: Kann in lokalen Optima steckenbleiben



Quelle: https://www.allaboutlean.com/polca-pros-and-cons/local-global-optimum/

Heuristiken - Lokale Suche

- Erweiterung von Greedy First-Fit
- Ziel: Verbesserung der initialen Lösung
  - Verschiebung von Operatoren zwischen Rechnern zur Optimierung
  - Vermeidung von lokalen Optima
- Vorteil: Bessere Lösung als Greedy First-Fit allein
- Nachteil: Höherer Berechnungsaufwand

Algorithm 4. Local Search

```
1:  function LocalSearch(G_dsp, G_res)
2:    Input: G_dsp, DSP application graph
3:    Input: G_res, computing resource graph
4:    P ← resources hosting the pinned operators of G_dsp
5:    L ← resources of G_res, sorted by the cumulative
6:        link penalty with respect to nodes in P
7:    S ← solve GreedyFirst-fit(G_dsp, L)
8:    do                                          ▷ local search
9:      F ← value of the objective function for S
10:     S ← improve S by co-locating operators
11:     S ← improve S by swapping resources
12:     S ← improve S by relocating a single operator
13:     F' ← value of the objective function for S
14:   while F' < F          ▷ placement solution is improved
15:   return S
16: end function
```

Heuristiken - Tabu Suche

- Aufbauend auf Greedy und Lokaler Suche: *Tabu Suche*
  - Vorteile: Noch bessere Lösung
  - Nachteil: Noch höherer Berechnungsaufwand

Experimentelle Ergebnisse

- Vergleich der Heuristiken Greedy First-Fit, Lokaler Suche und Tabu Suche
- Metriken: Antwortzeit, Netzwerklatenz und Verfügbarkeit
- Vergleich von Laufzeit und Beschleunigungsfaktor für zwei Topologien

Vergleich der Heuristiken

Methode		DA	RA
ODP	LZ	0.1	915.2
	LZ	0.8	32193.9
Greedy First-Fit	BF	454.40	$12 \cdot 10^6$
	QE	0%	5%
Greedy First-Fit (keine δ)	BF	454.40	$12 \cdot 10^6$
	QE	34%	24%
Lokale Suche	BF	0.68	353.07
	QE	0%	4%
Tabu Suche	BF	0.31	64.93
	QE	0%	4%

BF = Beschleunigungsfaktor, QE = Leistungseinbuße, LZ = Laufzeit

- Optimale Lösung benötigt 8h, Greedy First-Fit Bruchteil einer Sekunde.
- Kompromiss zwischen Qualität und Laufzeit

Fazit

- Greedy First-Fit, Lokale- und Tabu Suche bieten effiziente Lösungen für das Operatorplatzierungsproblem.
  - Greedy First-Fit: schnelle, aber minderwertige Lösungen.
  - Lokale Suche und Tabu Suche: qualitativ besser, aber zeitintensiver.
- Alle Heuristiken zeigen deutliche Verkürzung der Laufzeit

Zukunftsaussichten

- Entwicklung komplexerer Heuristiken zur besseren Approximation des OPP-Problems.
- Fokussierung auf zur Laufzeit anpassbare Heuristiken für dynamische Bedingungen.
- Analyse der Heuristiken für Real-Life Topologien.