

Microfluidics를 이용한 최단 경로 문제 해결

이상준 장병탁
서울대학교 공과대학 컴퓨터공학부 바이오지능연구실
{sjauh, btzhang}@bi.snu.ac.kr

Solving Shortest Path Problems Using Microfluidics

Sahng-Joon Auh and Byoung-Tak Zhang
Biointelligence Lab, School of Computer Science and Engineering
Seoul National University

요 약

최단 경로 문제는 통신망이나 로봇 경로 계획등과 같은 다양한 응용분야에 적용이 가능한 벤치 마크 문제로서 많은 효율적인 알고리즘들이 개발되어 왔다. 그러나 기존의 방법들이 고전적인 컴퓨팅 모델에 기반하여 설계된 반면에 본 논문에서는 최단 경로 문제를 풀기 위하여 microfluidics 기반의 MEMS 기술을 사용한 새로운 형태의 계산 모델(fluidic computing)을 제시하고 실험, 분석하였다.

1. 서론

기존의 디지털 컴퓨터 구조에서는 직렬적인 알고리즘이 적합하며 병렬 알고리즘을 사용할 경우는 필요한 프로세서의 양이 늘어나게 된다. 최근 들어, 이러한 전통적인 계산 방식과는 다른 새로운 계산 모델 및 알고리즘들이 연구되고 있다. 예를 들어, DNA 생체분자를 사용한 분자 컴퓨팅 [1], 전기 회로를 사용한 field computing [2], 화학 물질 [3]이나 헬륨 가스 [4]를 이용한 계산 방식등이 연구되고 있다.

본 논문에서는 위에서 설명한 여러 계산 모델 및 알고리즘과는 달리 microfluidics 기술인 미세구조체와 수용액만을 사용하여 매우 빠른 계산시간(Constant Time)을 가지는 새로운 개념의 계산 칩을 설계, 실험하였다.

Microfluidics(미세유체역학)란 이슬방울의 수천분의 일에 해당하는 유체를 물리학의 법칙을 응용해 조작하는 방법을 연구하는 분야이다.

최근 들어 주목 받고 있는 MEMS 기술의 한 분야로 마이크로 단위의 미세 채널을 칩상으로 구현하여 생물학적인 실험에 많이 쓰이고 있다.

이러한 microfluidics의 특징은 실험, 분석하려고 하는 재료의 양을 매우 적게(nano-liter or pico-liter) 사용하여도 실험이 가능하다는 점과 채널의 넓이가 매우 작아서(μm) 미세유체역학의 여러가지 물리적인 특성들(표면장력, 모세관 현상, ...)을 실험에 이용할 수 있고 또한 chip 전체 크기가 작기 때문에 빠른 시간내에 병렬적으로 여러 결과를 동시에 얻을 수 있다는 점에 있다.

2절에서는 최단 경로 문제를 해결하기 위하여

microfluidics 기술에 기반한 새로운 계산 모델(fluidic computing)을 설명했고 3절과 4절에서는 실험 및 결과를 제시하고 결론을 내린다.

2. Microfluidics를 이용한 최단 경로 문제 해결

어떤 도시나 지방의 고속 도로망을 나타내기 위한 각 간선은 그 간선에 의해 연결된 거리를 의미하거나 그 거리를 통과하는데 걸리는 시간 등의 가중값을 의미한다[5]. 특정 두 지역간에 여러 경로가 있고 그 중 최소 가중값을 가지는 경로를 찾는 문제를 최단 경로 문제(shortest path problem)라 한다. 이 문제를 해결하기 위하여 가장 일반적인 방법은 각 경로를 하나하나 거치면서 각 간선에 주어진 값들을 합산하여 계산되어진 모든 경로의 가중값들 중 가장 작은 값을 고르면 된다.

만약 하나의 출발도시와 여러 도착 도시간에 최단 경로 문제를 고려한다면 Dijkstra의 알고리즘으로는 $O(n^2)$ 의 시간이 걸리게 된다[6]. 또한 모든 도시들간의 최단 경로 문제를 푼다면 Floyd의 알고리즘으로 $O(n^2 \log n)$ 의 시간이 걸리게 된다[7].

2.1 Fluidic Computing

우리가 풀려고 하는 도시의 개수와 경로의 개수가 늘어 나면 기존의 디지털 컴퓨터로 문제를 풀 경우 일반적으로 그 계산시간이 급속도로 증가한다. 그래서 Dijkstra 알고리즘 Bellman-Ford 알고리즘과 같은 여러 효율적인 알고리즘들이 존재한다[5].

그러나 여기서 제안한 microfluidics 기술을 이용하면 거의 상수 시간에 문제가 풀릴 수 있다. 즉, 도시의 개수와 경로의 개수에 상관없이 최단 경로를 찾는 데 일정한 시간이 소요되며, 그 시간은 상수의 복잡도, 즉 $O(1)$ 을 갖는다. 따라서 효율적인 알고리즘을 따로 생각할 필요도 없다.

2.2 기본 알고리즘

본 논문에서 제안하는 microfluidics 기술을 이용한 칩 설계의 기본적인 생각은 그림 1 과 같이 우리가 풀려고 하는 실제 도시들의 지리적 정보를 그대로 칩상에 옮겨 놓자는 것이다. 도시들은 칩상에서 chamber(well)로, 각 간선들은 channel로 표현하는 것이다. 그런 다음 출발도시에 수용액을 넣어주고 도착도시에서 suction(흡입)을 수행하면 가장 짧은 거리의 경로로 물이 가장 먼저 흘러 나올 것이다.

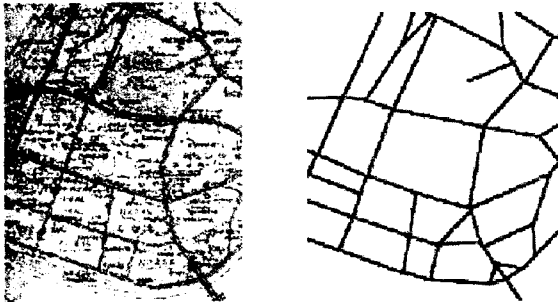


그림 1. 지도(왼쪽)를 칩상(오른쪽)에 표현

3. 실험 및 결과

3.1 칩 설계

칩 설계 및 분석, 확장성과 편의성을 위하여 그림 2 와 같이 우리가 풀려고 하는 문제를 4 x 4 격자 모양으로 고려하였다. 왼쪽 맨 위 모서리가 출발 도시이고 오른쪽 가장 아래 모서리가 도착 도시이다. 격자 모양의 각 간선에는 그림 2 와 같이 가중값(채널 길이 또는 채널 너비로 표현)이 부과되어 있다.

3.2 실험 및 결과

실험은 채널 너비를 고정한 상태에서 채널 길이만으로 가중치를 표현하는 방식과 채널 길이를 고정한 상태에서 채널 너비만으로 가중치를 표현하는 방식의 두 가지 방법을 사용하여 실험 하였다. 실험 결과는 표 1 과 같이 각 채널에서의 flow_rate로 나타났다.

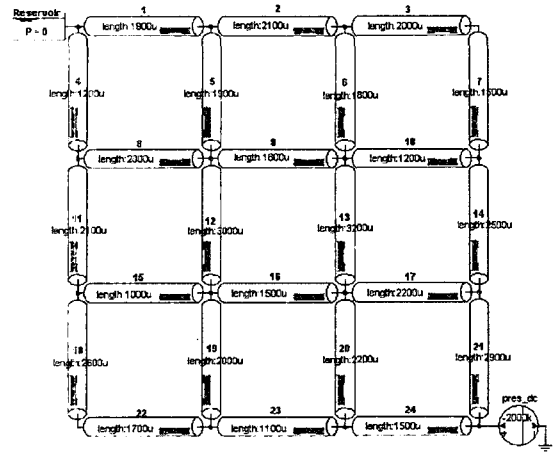


그림 2. 최단 경로 시뮬레이션 도면

표 1. 최단 경로 시뮬레이션 결과

채널	채널 너비 고정 (100 um)		채널 길이 고정 (1000 um)	
	채널 길이 (um)	Flow_rate (nl/s)	채널 너비 (um)	Flow_rate (nl/s)
1	1500	18.57	100	41.18
2	2100	10.41	100	24.39
3	2000	5.049	100	12.2
4	1200	26.42	250	80.28
5	1900	8.158	100	16.78
6	1800	5.359	100	12.2
7	1500	5.049	100	12.2
8	2000	9.538	100	22.83
9	1800	8.891	100	19.81
10	1200	6.688	100	12.2
11	2100	16.88	250	57.45
12	3000	8.805	100	19.81
13	3200	7.562	100	19.81
14	2500	11.74	100	24.39
15	1000	10.05	250	39.96
16	1500	9.19	100	19.81
17	2200	5.987	100	16.78
18	2600	6.831	100	17.49
19	2000	9.663	250	39.96
20	2200	10.76	100	22.83
21	2900	17.72	100	41.18
22	1700	6.831	100	17.49
23	1100	16.49	250	57.45
24	1500	27.26	250	80.28

3.3 결과 분석

채널에 가중치를 주는 방법은 크게 두 가지로 생각할 수 있다. 하나는 채널의 길이로 주는 것이고 하나는 채널의 너비로 주는 것이다. 가중값이 높은 채널은 길이를 길게 주고 가중값이 낮은 채널은 길이를 짧게 준다. 반대로 너비로 가중값을 줄 경우는 가중값이 높은 경우는 채널의 너비를 적게 하고 가중값이 낮은 경우는 채널의 너비를 크

계 한다.

최단 경로는 표 1 에서 알 수 있듯이 가장 빨리 유체가 통과하는 경로를 보면 된다. 이 실험에서는 그림 3 에 나타난 바와 같이 경로 4 → 경로 11 → 경로 15 → 경로 19 → 경로 23 → 경로 24 가 최단 경로가 됨을 알 수 있다.

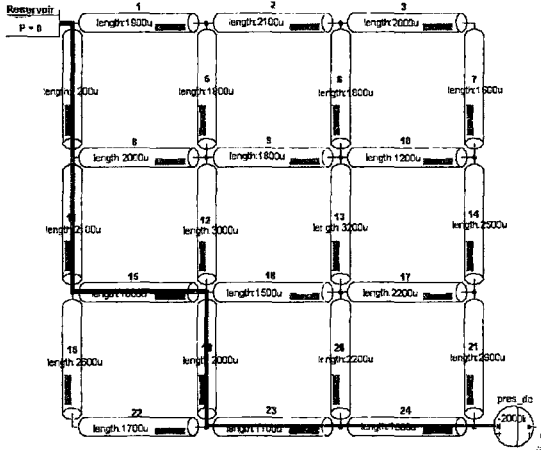


그림 3. 최단 경로

Flow_rate를 결정하는 공식은 전자회로에서의 Ohm의 법칙인 $V = IR$ 와 같이 $P = RQ$ 로 생각할 수 있다. 여기서 P는 pressure drop이고 R은 저항이고 Q는 flow_rate이다. 따라서 $Q = P/R$ 이다.

본 실험에서 알 수 있듯이 R값은 채널의 길이가 길거나 채널의 폭이 좁을수록 커지는 것을 알 수 있다. P값은 표 2의 결과값에서 보듯이 최단 경로에 높은 값이 나타나는 경향을 보이는 듯 하지만 항상 그렇지는 않고 랜덤하게 분포되어 나타난다.

표 2. 각 채널에 걸린 Pressure Drop 값들

채널	채널 너비 고정 (100 um)		채널 길이 고정 (1000 um)	
	채널 길이 (um)	Pressure Drop (P)	채널 너비 (um)	Pressure Drop (P)
1	1900	453600	100	529500
2	2100	281000	100	313700
3	2000	129800	100	156800
4	1200	407600	250	451800
5	1900	199300	100	215800
6	1800	124000	100	156800
7	1500	97380	100	156800
8	2000	245300	100	293500
9	1800	205800	100	254700
10	1200	103200	100	156800
11	2100	455700	250	323300
12	3000	339600	100	254700
13	3200	311100	100	254700
14	2500	377300	100	313700
15	1000	129200	250	224900

16	1500	177200	100	254700
17	2200	169300	100	215800
18	2600	228300	100	224900
19	2000	248500	250	224900
20	2200	304500	100	293500
21	2900	660900	100	529500
22	1700	149300	100	224900
23	1100	233300	250	323300
24	1500	525700	250	451800

4. 결론

본 실험의 결과로 우리는 microfluidics의 채널 저항을 가지고 경로들의 가중값들을 표현해서 최단 경로 문제를 풀 수 있다는 것을 보였다. 이는 유체의 흐름만을 가지고도 계산이 가능하다는 것을 보여주는 새로운 형태의 계산 모델(fluidic computing)이라고 할 수 있다. 이 계산 방식은 또한 DNA molecule을 사용한 분자 컴퓨팅에도 응용 가능하다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 차세대신기술사업과 BK21 프로그램에 의하여 일부 지원되었음. 이 연구를 위해 연구 장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터신기술공동 연구소에 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] L. M. Adleman, "Molecular Computation of Solutions to Combinatorial Problems," *Science* 266, pp. 1021-1024, 1994
- [2] A. Vergis, K. Steiglitz and B. Dickinson, "The Complexity of Analog Computation," *Math. Comput. Simul.* 28, pp. 91-113, 1986
- [3] O. Steinbock, A. Toth and K. Showalter, "Navigating Complex Labyrinths: Optimal Paths from Chemical Waves," *Science* 267, pp. 868-871, 1995
- [4] D. R. Reyes, G. M. Whitesides and A. Manz, "Using Microfluidics Systems as Analog Devices for Solving Computational Problems," *uTAS*, 2001
- [5] T. H. Cormen, C. E. Leiserson and R. L. Rivest, *Introduction to Algorithms*, MIT press, pp. 514-549, 1990
- [6] E. A. Dijkstra, "A Note on Two Problems in Connection with Graphs," *Numer. Math.* 1, pp. 269-271, 1959
- [7] R. W. Floyd, "Algorithm 97: Shortest Path," *Commun. ACM* 5, pp. 345, 1962