

코로나19 진단을 위한 잡음 그룹검사의 성능분석

성진택*

Performance Analysis of Noisy Group Testing for Diagnosis of COVID-19 Infection

Jin-Taek Seong*

요약 현재 코로나19 확진자는 전 세계적으로 빠르게 증가하고 있다. 감염 확산을 억제할 수 있는 방법으로 신속한 코로나19 검사를 통한 확진자를 찾아내는 것이다. 본 논문에서는 코로나19 진단을 위한 잡음 그룹검사(Noisy Group Testing) 문제를 살펴본다. 기존에 제안한 그룹검사 문제는 측정잡음을 무시하였지만, 최근 들어 코로나19 검사에 위 양성(false positive)과 위 음성(false negative) 사례가 발생하고 있다. 이에 대해 본 논문에서는 잡음 그룹검사 문제를 정의하고 측정잡음이 성능에 얼마나 영향을 미치는지 분석한다. 본 연구를 통해 우리는 코로나19 검사 양성률이 낮은 그룹검사를 수행할수록 측정잡음(measurement noise)에 덜 민감하도록 그룹검사 시스템이 설계되어야 함을 제시한다. 또한 최근 발표한 다른 복원 알고리즘들과 비교하여 본 연구에서 제안하는 신호 복원 알고리즘이 잡음 그룹검사서 좋은 성능을 보여준다.

Abstract Currently the number of COVID-19 cases is increasing rapidly around the world. One way to restrict the spread of COVID-19 infection is to find confirmed cases using rapid diagnosis. The previously proposed group testing problem assumed without measurement noise, but recently, false positive and false negative cases have occurred during COVID-19 testing. In this paper, we define the noisy group testing problem and analyze how much measurement noise affects the performance. In this paper, we show that the group testing system should be designed to be less susceptible to measurement noise when conducting group testing with a low positive rate of COVID-19 infection. And compared with other developed reconstruction algorithms, our proposed algorithm shows superior performance in noisy group testing.

Key Words : Noisy Group Testing, Sparse Recovery, Diagnosis of COVID-19

1. 서론

현재 전 세계적으로 코로나19(COVID-19)로 인한 대규모 전염병 확산에 따른 팬데믹이 진행 중이며, 하루에도 수백만 명씩 코로나 확진자가 발생되고 있다[1]. 감염 확산을 억제할 수 있는 한 가지 방법은 조기에 확진자를 찾아내는 것이다. 최근 학계에서는 코로나 확진자를 찾기 위한 방법으로 그룹검사(Group Testing) 방법이 시도되고 있다[2]-[4]. 사실 그룹검사는 2

차 세계대전에 대규모 성병 감염자를 찾기 위해 고안된 방법으로써 1943년 Dorfman에 의해 소개되었다[5]. 그룹검사는 개별 샘플들은 하나의 그룹으로 묶어서 검사하는 방법이다. 다시 말하면, 개별 샘플들을 하나씩 검사하는 것이 아니라 여러 샘플들을 섞어 하나의 그룹(pool)을 생성하고 이것을 검사하는 것이다. 코로나19와 같이 양성률(positive rate)이 낮은 경우[1]에는 개별검사(individual testing)보다 그룹검사 방법이 더 효율적임이 알려져 있다[6].

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (NRF-2020R111A3071739).

*Department of Convergence Software, Mokpo National University (jtseong@mokpo.ac.kr)

Received March 15, 2022

Revised March 26, 2022

Accepted March 30, 2022

우리는 지난 연구에서 코로나19 검사를 위한 그룹 검사 알고리즘을 제안하였으며 그 성능을 분석하였다 [7]. 이를 위해 L1 최소화 방법을 이용한 희소 신호를 찾는 문제로 변형하여 무잡음(noiseless) 그룹검사 문제를 해결하였다. 그러나 실제 코로나19 검사는 검사 환경과 숙련도, 그리고 코로나 바이러스 농도 등에 따라 검사결과에 대해 특이도(specificity)와 민감도(sensitivity)가 95% 신뢰도 기준에서 최대 4.5% 정도의 오차가 있는 것으로 보고되었다[8]. 본 논문에서는 그룹검사 결과에 측정잡음(measurement noise)이 있는 경우 성능에 얼마나 영향을 미치는지에 대해 살펴본다. 또한 코로나19 양성률과 측정잡음 수준이 성능에 얼마나 영향을 미치는지 알아본다.

본 논문은 논문 [7]에서 정의한 그룹검사 문제를 따르지만, 그 차이점은 잡음에 대한 그룹검사 성능분석이다. 무잡음에 대한 그룹검사 성능은 논문 [7]을 참고하기 바라며, 본 논문에서는 잡음이 있는 그룹검사에 대한 성능분석 결과를 보여준다. 구체적으로 코로나19 검사 양성률에 따라 측정잡음이 얼마나 성능에 영향을 미치는지 살펴본다. 그리고 그룹검사 시스템 설계 시에 측정잡음에 강인한 모델 개발을 위한 조건을 제시한다. 마지막으로 제안하는 희소 신호 복원 방법이 기존 복원 방법들보다 우수함을 시뮬레이션을 통해 보여준다.

2. 관련 연구

2.1 잡음 모델과 응용 분야

우리는 먼저 잡음 그룹검사와 관련된 최근 연구결과와 의미를 먼저 살펴보고 본 연구에 대한 내용을 소개하고자 한다. 잡음 유무에 따른 그룹검사에 대한 정보이론적인 성능 임계값은 논문 [9]와 [10]에서 연구되었으며, 최근 들어 많은 문헌에서 그 연구 성과를 제시하고 있다[11], [12]. 개발된 알고리즘은 각 항목에 대해 포함된 그룹에서 양성으로 반환된 비율을 확인하고 이 수치가 적절하게 선택된 임계값을 초과하면 해당 샘플은 결함이 있는 것으로 판단된다. 이것은 비록 최적값은 아니지만 $K \approx N^{\theta} (\theta \in (0, 1))$ 영역에서 최적의 스케일링 법칙을 따르는 것으로 알려졌다[13]. 분리 검사(separate testing of inputs)를 제안한 논문 [9]에서는

샘플들을 개별적으로 고려하여 모든 검사를 이용한다. 다시 말하면, 주어진 샘플의 상태는 이진값을 사용한다. 대칭 잡음 모델의 경우 $\theta \rightarrow 0$ 에서 검사 수가 최적의 정보이론 임계값의 \log_2 이내인 것을 밝혔다. 그러나 θ 가 0에서 멀어질수록 그 검사 수의 수렴속도는 빠르게 증가한다.

잡음 그룹검사에 대해 논문 [14]와 [15]는 이론적 결과 해석 대신 belief propagation과 linear programming을 이용하여 현실적이면서 사용 가능한 그룹검사 복원 알고리즘을 제안했다. 또한 샘플 복잡도에서 최적 성능은 아니지만 샘플 수와 실행 시간을 보장할 수 있는 준선형(sublinear) 알고리즘을 제안했다[16]-[19].

그룹검사는 앞서 언급한 바와 같이 생물학, 통신, 정보이론 및 데이터 과학을 포함하여 광범위한 분야에 적용된다. 무잡음 모델은 이론적인 관점에서 폭넓게 연구되어 왔지만 이러한 다양한 응용 분야에서 모든 검사결과가 모두 잡음 없이 정확한 검사결과를 한다는 가정은 비현실적이다. 그리고 대부분의 잡음 그룹검사는 대칭 잡음 모델을 고려하여 문제를 해결하고자 했다. 그럼에도 불구하고 많은 응용분야에서는 대칭 잡음 모델보다 비대칭 잡음 모델이 더 일반적이다. 즉, 그룹검사 결과가 양성에서 음성으로 또는 음성에서 양성으로 뒤바뀔 확률이 같지 않다는 가정이 더 현실적이다.

데이터 포렌식은 파일을 비교하여 어떤 파일이 변경되었는지 확인이 가능하다. 논문 [20]에서는 파일 변경 내용을 확인하고자 파일 모음에 대한 해시 수를 저장한다. 그리고 위변조 가능성이 있는 해시 전후 값을 비교하여 해시가 변경되었는지를 알 수 있다. 이와 같은 아이디어는 간단한 그룹검사의 예이다. 그룹검사 모델과 비교하면 변경된 파일은 결함 샘플에 해당하고 파일 모음은 그룹에 대응된다. 그리고 변경된 파일이 포함된 해시는 그룹검사 결과가 양성임을 말한다. 해시 값을 변경하지 않는 방식으로 파일이 변경될 수 있다. 이러한 의미에서 양성이어야 하는 검사 결과가 특정 확률로 다른 결과를 이끌어 낼 수 있다. 임의의 긴 해시를 사용하여 잡음 효과를 상쇄할 수 있지만 효율적인 그룹검사를 위해서는 생각보다 짧은 해시를 사용하는 것이 더 적절하다.

2.2 최신 그룹검사 알고리즘

최근 개발된 그룹검사 알고리즘에 대한 정리는 논문 [7]에서 언급하였다. 본 논문에서 성능비교를 위해 사용한 그룹검사 알고리즘에 대한 간략한 소개를 다음과 같다.

첫 번째로 COMP(Combinatorial Orthogonal Matching Pursuit) 알고리즘[13]은 그룹행렬의 열벡터와 결과 벡터를 비교하여 어떤 열에서 양성인지를 확인하여 해당된 열에 대응한 샘플 상태를 결정한다. COMP 알고리즘은 양성으로 판정한 샘플은 정확하지만 음성으로 판정한 샘플에는 위양성이 발생한다. 결국 COMP 알고리즘은 가장 간단하면서 빠르게 결과 벡터와 그룹행렬의 열벡터 간에 비교를 통해 샘플이 양성인지 음성인지를 결정할 수 있지만 위양성이 발생할 수 있기 때문에 좀 더 성능 좋은 그룹검사 알고리즘이 필요하게 되었다.

이를 개선하고자 DD(Definite Defectives) 알고리즘[21]이 제안되었다. DD 알고리즘은 위양성을 최소화할 수 있기 때문에 COMP 알고리즘보다 성능이 우수하다. DD 알고리즘의 디코딩 과정은 기본적으로 COMP 알고리즘을 변형한 것이다. 두 알고리즘에서 차이가 있는 것은 정상 샘플을 찾고 나서 결함과 정상 샘플이 섞여 있는 샘플들에 대해 양성률을 이용하여 확률적으로 결함 샘플을 판별한다. 이렇게 할 수 있는 이유는 양성률이 매우 낮다는 가정에서 접근이 가능하다.

나아가 DD 알고리즘이 위양성을 제거할 수 있다는 점을 이용하여 논문 [21]에서는 SCOMP(Sequential COMP) 알고리즘을 제안한다. 주된 아이디어는 DD 알고리즘을 이용하여 최초 결함 샘플 집합을 찾아내고 이후 양성 결과를 추적하여 결함 샘플 집합을 지속적으로 갱신하여 SCOMP 알고리즘을 종료하는 것이다. 논문 [21]에서는 SCOMP 알고리즘에 대한 결과를 제시하여 성능의 우수성을 입증하였다.

3. 잡음 그룹검사 문제

본 논문은 우리의 앞선 논문 [7]에서 정의하는 그룹검사 문제를 그대로 따르지만 측정잡음(measurement noise)이 추가된 그룹검사 문제에 대해 다룬다. 독자

의 이해를 돕기 위해 잡음 그룹검사 문제를 다음과 같이 정의한다. 입력 신호 $X = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ 는 크기가 N 인 이진 벡터이다, $X \in \{0,1\}^N$, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$. 여기서, j 번째 샘플이 결함이 있다면, $x_j = 1$, 그렇지 않으면 $x_j = 0$ 으로 표현한다. 본 논문에서는 벡터 X 에서 0이 아닌 원소의 수를 K 라고 가정한다, $\|X\|_0 = K$, $K/N = \delta$, 검사 수 대비 확진자 수를 의미하여 본 논문에서는 양성률(positive rate)로 정의한다. 그룹행렬 $A \in \{0,1\}^{T \times N}$ 는 T 개의 행과 N 개의 열을 갖는다. 그룹행렬 A 는 i 번째 그룹검사를 A_i 로 표현하고, 각 원소 A_{ij} 는 j 번째 샘플 x_j 을 포함하여 그룹검사를 수행하면 $A_{ij} = 1$ 로 표현하고 그렇지 않으면 $A_{ij} = 0$ 으로 표현한다[6]. 그룹행렬은 대응하는 샘플이 해당된 그룹검사에 포함되어 참여하는지 그렇지 않은지를 0과 1로 표현한다.

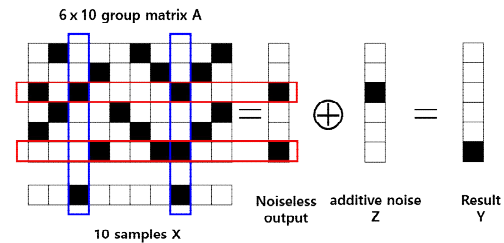


그림 1. 6×10 그룹행렬로 표현되는 잡음 그룹검사 예시.
Fig. 1. One example of noisy group testing with a 6×10 group matrix.

잡음 그룹검사 문제에서 i 번째 그룹검사 결과 y_i 는 측정 잡음 z_i 가 있을 때 다음과 같이 수식으로 표현된다.

$$y_i = \left(\bigvee_{j=1}^N (A_{ij} \wedge x_j) \right) \oplus z_i \quad (1)$$

여기서 기호 \vee , \wedge , \oplus 는 각각 논리연산 OR, AND, XOR을 의미하고, 검사결과 벡터 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_T)$ 로 표현된다. 그리고 측정 잡음 z_i 는 다음과 같은 이진 확률분포를 갖는 것으로 가정한다.

$$\Pr(z_i) = \begin{cases} 1 - \epsilon, & \text{if } z_i = 0 \\ \epsilon, & \text{if } z_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 ϵ 는 잡음 확률이며, $\epsilon \in (0, 0.5)$, 잡음 확률이 0.5보다 크지 않는다고 가정한다. 잡음 벡터 $Z = (z_1, z_2, \dots, z_T)$ 로 표현된다. 그림 1은 $N=10$, $T=6$ 로 구성되고 $X = (0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0)$, $Z = (0, 0, 1, 0, 0, 0)$ 를 갖는 잡음 그룹행렬을 그림으로 표현한 예시이다.

4. 그룹검사 설계 및 성능평가

4.1 그룹행렬과 복원방법

그룹검사의 성능을 좌우하는 것은 두 가지 관점에서 고려된다. 하나는 그룹검사는 역문제(inverse problem)이기 때문에 주어진 그룹행렬과 그룹검사 결과를 이용하여 원래의 샘플 상태를 알아내는 것이다. 즉, 앞선 수식 (1)에서 주어진 Y 와 A 를 이용하여 X 를 찾을 때 어떻게 입력신호 X 를 찾을 것인지에 대한 디코딩 문제가 중요하다. 또 하나는 그룹행렬 A 를 어떻게 설계할 것인지에 관한 문제이다. 과거 연구에서는 그룹행렬을 설계하기 위해 d-Separable 행렬[22]과 d-Disjunct 행렬[23]을 이용하였지만 최근에는 행렬의 원소를 랜덤하게 무작위로 선택하는 방법도 좋은 설계 방법으로 알려져 있다[6].

본 논문에서는 랜덤 행렬을 이용한 그룹행렬 설계 방법을 고려하였으며, 채널코딩 이론에서 잘 알려져 있고 우수한 성능을 보여준 LDPC (Low density parity check) 코드[24]를 이용한다. 그룹행렬은 1962년 Gallager가 제안한 방법[24]에 따라 행렬의 행과 열의 1의 수가 일정하도록 설계된다. 이 행렬의 장점은 1의 개수가 전체 행렬의 크기에 비해 매우 작다는 점이다. 즉 희소(sparse) 행렬을 이용하기 때문에 연산에 대한 부담을 경감할 수 있다. 논문 [25]에서는 LDPC 코드를 이용하여 그룹검사 활용 사례로써 DNA 스크린 문제를 sum-product 알고리즘을 이용하여 디코딩하는 방법을 제안했다.

본 논문에서 수행한 그룹검사 디코딩 방법은 우리의 지난 연구[7]에서 제안한 L1-norm 기반의 희소 신호 복원 알고리즘(sparse recovery: SR)을 따른다. 우리는 잡음 그룹검사에서도 희소 신호를 찾는 최적화 문제를 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{X} = \arg \min_X \|AX - Y\|_2^2 + \lambda \|X\|_1, X \geq 0 \quad (3)$$

여기서 \hat{X} 는 최적화를 통해 찾은 검출 신호이다. 수식 (3)을 통해 얻은 \hat{X} 는 0보다 크거나 같은 실수값이기 때문에 우리는 임계값 0.5를 기준으로 원소의 값이 0 또는 1이 되도록 설정한다. 결과 벡터 Y 는 잡음 벡터 Z 에 따라 원래 값에서 뒤바뀌기 때문에 잡음이 없을 때보다 성능 열화를 겪는다.

4.2 성능평가 및 논의

본 절에서는 앞서 정의한 잡음 그룹검사에 대한 성능을 보여주며, 그 결과에 대해 논의를 한다. 수식 (3)과 같은 희소 신호 복원방법을 통해 $N=1000$ 에서 잡음 그룹검사 문제의 성능평가를 한다. 또한 코로나19 검사 결과의 위양성과 위음성이 0.1%에서 4.5% 정도로 보고[8]되기 때문에 우리는 잡음 확률 $\epsilon = 0.01, 0.03, 0.05$ 세 구간에 대해 성능평가를 수행한다. 그리고 전체 샘플 크기 대비 양성률 1%, 3%, 5% 수준에 대해 $K=10, K=30, K=50$ 로 각각 시뮬레이션 조건을 설정하여 성능을 평가한다.

잡음 그룹검사 알고리즘의 성능평가 기준은 정확하게 입력 신호 X 를 찾는지를 알아보기 위해 위음성이 나올 확률 $P(\text{위음성})$ 과 위양성이 나올 확률 $P(\text{위양성})$ 을 빼고 수식 (4)와 같이 총 일치율 (Overall Percent Agreement; OPA) P_{OPA} 을 정의하여 사용한다.

$$P_{OPA} = 1 - P(\text{위음성}) - P(\text{위양성}) \quad (4)$$

그림 1은 잡음 그룹검사에서도 제안하는 희소 신호 복원(SR) 알고리즘의 성능을 다른 알고리즘들과 비교하여 보여준다. 그림 1에서 보여준 바와 같이 잡음이 있을 때($\epsilon = 0.03$)는 없을 때(noiseless)보다 모든 복원 알고리즘의 성능에서 열화가 있다. 그리고 잡음 여부에 따른 성능 차이는 DD 알고리즘과 SCOMP 알고리즘보다 SR 알고리즘으로 신호를 복원하고자 할 때 그 간격이 크지 않는 점을 보여준다. 다시 말하면 본 연구에서 제안하는 SR 알고리즘이 다른 복원방법들과 비교해서 잡음에 더 강인한 신호 복원 성능을 갖는다.

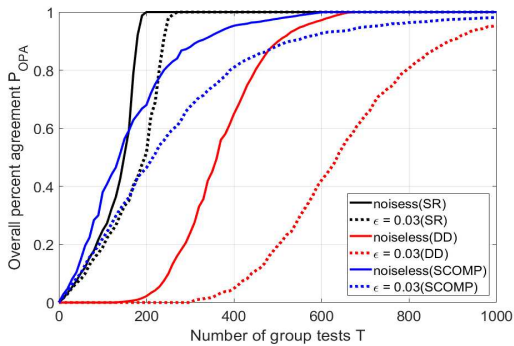


그림 1. 잡음 그룹검사서 제안하는 희소 신호 복원 알고리즘 (SR)과 다른 알고리즘들과의 성능 비교:

$N=1000, K=50$.

Fig. 1. Comparison of performance between the proposed SR algorithm and other algorithms in noisy group testing: $N=1000, K=50$.

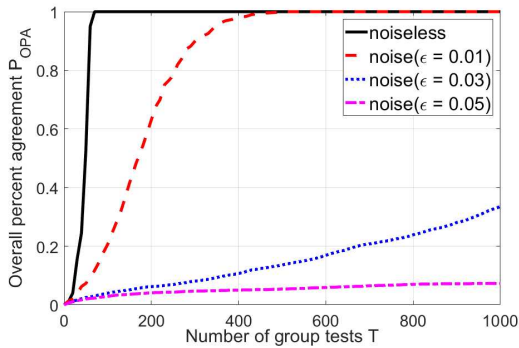


그림 2. 잡음 그룹검사의 총 일치율(OPA):

$N=1000, K=10$.

Fig. 2. Overall percent agreement in noisy group testing: $N=1000, K=10$.

그림 2-4에서는 잡음 확률에 따라 SR 알고리즘이 신호 복원을 위해 얼마나 영향을 받는지 확인할 수 있다. 먼저 관찰되는 특징은 신호의 희소성이 큰 잡음 그룹검사 문제는 위양성과 위음성이 커질수록 복원 성능에 크게 영향을 준다는 점이다. 그림 2에서와 같이 잡음이 없을 때는 $N=1000, K=10$ 에 대해 그룹검사 수가 $T \geq 70$ 에서 총 일치율 0.99 이상을 보였지만, 잡음 확률이 커질수록 검사 수가 최대 1000에 도달하

여도 총 일치율이 낮다는 것이다. 반면 그림 4에서는 $N=1000, K=50$ 으로 양성률이 5% 가정한 시뮬레이션으로써 잡음 확률이 증가하여 0.05 정도로 증가하더라도 검사 수 300 이상에서 총 일치율 0.99 이상의 성능을 보여준다. 결국 성공적인 신호 복원을 위해서는 신호가 희소할수록 잡음에 덜 민감하도록 잡음 그룹검사 시스템을 설계하여야 함을 제시한다.

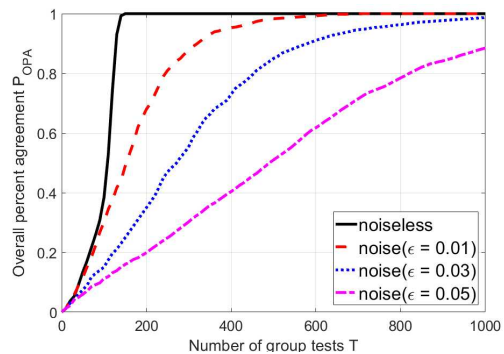


그림 3. 잡음 그룹검사의 총 일치율(OPA): $N=1000, K=30$.

Fig. 3. Overall percent agreement in noisy group testing: $N=1000, K=10$.

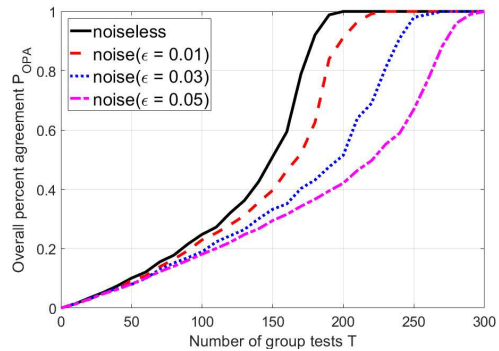


그림 4. 잡음 그룹검사의 총 일치율(OPA):

$N=1000, K=50$.

Fig. 4. Overall percent agreement in noisy group testing: $N=1000, K=50$.

5. 결론

본 논문에서는 위양성과 위음성을 갖는 잡음 그룹검사 문제를 살펴보았다. 코로나19 검사시에 발생할 수 있는 위양성과 위음성에 대한 잡음 요인을 그룹검사

문제에 적용하여 측정잡음 확률이 얼마나 성능에 영향을 미치는지를 확인하였다. 그 결과 코로나19 검사의 양성률이 낮은 그룹검사를 수행할 때는 측정시에 발생할 수 있는 잡음에 덜 취약하도록 설계되어야 한다는 것이다. 또한 최근에 발표한 다른 알고리즘들보다 본 연구에서 제안하는 SR 알고리즘이 잡음에 상관없이 모두 더 좋은 신호 복원 성능을 보여주었다. 본 연구를 통해 얻은 잡음 그룹검사 시스템을 활용하여 코로나19 확진자를 조기에 발견하여 감염확산을 신속히 차단할 수 있을 것으로 기대된다.

REFERENCES

- [1] Accessed: <https://www.worldometers.info/coronavirus/>
- [2] C.M. Verdun et al., "Group Testing for SARS-CoV-2 Allows for Up to 10-Fold Efficiency Increase Across Realistic Scenarios and Testing Strategies," *Frontiers in Public Health*, 9:583377, Aug. 2021.
- [3] L. Mutesa, et al., "A pooled testing strategy for identifying SARS-CoV-2 at low prevalence," *Nature* 589, pp. 276-280, Oct. 2020.
- [4] J.-T. Seong, "Group Testing-Based Robust Algorithm for Diagnosis of COVID-19" *Diagnostics* 2020, 10(6), 396, Jun. 2020.
- [5] R. Dorfman, "The Detection of Defective Members of Large Populations," *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 14, no. 4, pp. 436-440, Dec. 1943.
- [6] D.-Z. Du and F.K. Hwang, *Pooling Designs and Nonadaptive Group Testing: Important Tools for DNA Sequencing*, World Scientific, 2006.
- [7] J.-T. Seong, "Group Testing Scheme for Effective Diagnosis of COVID-19," *Journal of Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, vol. 14, no. 6, pp. 445-451, Dec. 2021.
- [8] D.A. Mistry et al., "A systematic review of the sensitivity and specificity of lateral flow devices in the detection of SARS-CoV-2", *BMC Infectious Diseases*, 21:828, 2021.
- [9] M. B. Malyutov and P. S. Mateev, "Screening designs for non-symmetric response function," *Mat. Zametki*, vol. 29, pp. 109-127, 1980.
- [10] M. Malyutov, "The separating property of random matrices," *Math. Notes Acad. Sci. USSR*, vol. 23, no. 1, pp. 84-91, 1978.
- [11] M. Aldridge, "The capacity of Bernoulli nonadaptive group testing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 63, no. 11, pp. 7142-7148, 2017.
- [12] J. Scarlett and V. Cevher, "Limits on support recovery with probabilistic models: An information-theoretic framework," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 63, no. 1, pp. 593-620, 2017.
- [13] C.L. Chan, P.H. Che, S. Jaggi, and V. Saligrama, "Non-adaptive probabilistic group testing with noisy measurements: near-optimal bounds with efficient algorithms," 49th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, pp. 1832-1839. Sep. 2011.
- [14] D. Sejdinovic and O. Johnson, "Note on noisy group testing: Asymptotic bounds and belief propagation reconstruction," 48th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Sep. 2010.
- [15] D. Malioutov and M. Malyutov, "Boolean compressed sensing: LP relaxation for group testing," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 3305-3308, March 2012.
- [16] S. Cai, M. Jahangoshahi, M. Bakshi, and S. Jaggi, "Efficient algorithms for noisy group testing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 63, no. 4, pp. 2113-2136, 2017.
- [17] K. Lee, R. Pedarsani, and K. Ramchandran, "SAFFRON: A fast, efficient, and robust framework for group testing based on sparse-graph codes," *IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, July 2016.
- [18] H. A. Inan, P. Kairouz, M. Wootters, and A. Özgür, "On the optimality of the Kautz-Singleton construction in probabilistic group testing," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.

65, no. 9, pp. 5592-5603, Sep. 2019.

[19] S. Bondorf, B. Chen, J. Scarlett, H. Yu, and Y. Zhao, "Sublinear-time non-adaptive group testing with $O(k \log n)$ tests via bit-mixing coding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 67, no. 3, pp. 1559-1570, 2021.

[20] M. T. Goodrich, M. J. Atallah, and R. Tamassia, "Indexing information for data forensics," *Proceedings of the Third international conference on Applied Cryptography and Network Security*, pp. 206-221. 2005.

[21] M. Aldridge, L. Baldassini, and O. Johnson, "Group Testing Algorithms: Bounds and Simulations," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 6, pp. 3671-3687, Jun. 2014.

[22] W. H. Kautz and R. R. Singleton, "Nonrandom binary superimposed codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 10, pp. 363-377, 1964.

[23] A. G. Dyachkov and V. V. Rykov, "A survey of superimposed code theory," *Problems of Control Information Theory*, vol. 12, pp. 1-13, 1983.

[24] R.G. Gallager, "Low density parity check codes," *IRE Transaction Information Theory*, vol. IT-8, no. 1, pp. 21- 28, Jan. 1962.

[25] H. Uehara and M. Jimbo, "A Positive Detecting Code and Its Decoding Algorithm for DNA Library Screening," *IEEE Trans. Computational Biology and Bioinformatics*, vol. 6, no. 4, pp. 652-666, Oct. 2009.

성진택(Jin-Taek Seong)

[정회원]



- 2014년: 광주과학기술원
정보통신공학과 (공학박사)
- 2008년 ~ 2010년: LG전자
- 2014년 ~ 2016년:
대구경북첨단의료산업진흥재단
- 2016년 ~ 2017년: 방위사업청
- 2018년 3월 ~ 현재: 목포대학교
융합소프트웨어학과 부교수

〈관심분야〉 정보이론, 압축센싱, 통신이론, 딥러닝