

Development of GPS Coordinates Measuring Algorithm for a Transmission Tower

송전탑 GPS 좌표측정 알고리즘 개발

Seok-tae Kim[†], Joon-young Park, Jae-kyung Lee, In-hyuk Choi, Ji-wan Ham
김석태[†], 박준영, 이재경, 최인혁, 함지완

KEPCO Research institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-Ro, Yuseong-Gu, Daejeon 34056, Korea

[†] stkim-76@kepcoco.kr

Abstract

Traditionally, the GPS coordinates of a transmission tower have been measured at the center of the tower on the ground, which usually takes dozens of minutes. However, this method often produces errors of tens of meters or sometimes demands several hours due to signal interference from the huge steel structure of the tower. To solve this problem, in this paper, a new measuring method for GPS coordinates of steel towers is proposed. First, instead of measuring the center of a tower, four GPS coordinates of the edges of the tower are obtained by using a measuring device with three GPS modules, and then are averaged to find the center of the tower. When a measured value is deviated considerably by signal interference, a newly proposed algorithm filters out such an inaccurate coordinate, effectively calculating the center of the tower by using other edge coordinates. Through field tests, it was confirmed that this new algorithm could improve the task efficiency and its measuring accuracy for GPS coordinates in a GPS interference environment.

기존의 송전탑 좌표 측정방식은 송전탑 지상중심에서 GPS를 이용하여 좌표를 측정하고 일반적으로 측정시간은 수십 분 정도 소요되었다. 그러나 이러한 방법은 종종 거대한 철골구조물인 송전탑 간섭으로 인해 수십 미터의 좌표 오차를 발생하거나 수 시간씩 측정시간이 소요되기도 한다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 송전탑의 새로운 GPS 측정 방법을 제안한다. 먼저, 송전탑의 중심을 측정하던 방법 대신, 3개의 GPS로 구성된 측정장치를 이용하여 송전탑 가장자리 4 지점의 GPS 좌표를 측정하고 그 값들을 평균하여 송전탑의 중심을 구한다. 측정된 값이 전파간섭에 의해 상당히 벗어난 경우, 새롭게 제시하는 알고리즘이 부정확한 좌표를 걸러내고 다른 가장자리 좌표로 대체하여 송전탑의 중심을 효과적으로 계산할 수 있다. 현장 측정시험을 통해 본 논문에서 제시하는 새로운 알고리즘은 전파간섭 환경에서 송전탑 측정의 효율성과 정확도를 향상시킬 수 있다.

Keywords: GPS Coordinates, Algorithm, Transmission Lines, Signal Interference

I. 서론

정확한 송전탑의 GPS 좌표는 송전선로를 유지·관리하기 위해 필요한 정보로 최근 드론을 이용하여 송전선로를 점검하는 기술에 정확한 GPS 좌표는 안전한 비행을 위해 필수적인 요소이다.

현재의 GPS 좌표 측정원리는 지구에 6개의 궤도를 따라 회전하고 있는 24개의 인공위성 중 최소 4개의 인공위성 신호를 수신 받아 위성간의 거리와 시간보정을 통해 측량한다. 또한, 현재 유통되고 있는 GPS는 좌표데이터를 누적하고 표준편차를 계산하여 좌표를 제공하는 등 신뢰도가 향상되었다. 하지만, 전리층에 의한 전파산란, 대기권 통과 거리차이로 인한 오차, 태양플레어 및 지자기폭풍에 의한 GPS 수신저해 등 자연적인 요인으로 GPS 측정에 오차는 여전히 상존하고 있다. 게다가 기존의 송전탑 좌표 측정방식은 하나의 GPS 수신기를 송전탑 지상중심에서 측정하기 때문에 격자형태의 철골구조

물인 송전탑에 의해 전파간섭이 생겨 위치를 측정하는데 수십 분에서 몇 시간씩 소요되기도 하고 오차도 수 미터에서 수십 미터까지 발생하는 등 좌표데이터로서 가치도 낮고 측정 시간이 과다하게 소요되어 작업효율이 낮은 편이었다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서는 송전탑 GPS 좌표측정 지점을 송전탑 지상중심에서 송전탑의 가장자리 4지점으로 변경하여 측정한다. 하지만 이러한 측정방법의 경우에도 자연적인 GPS 수신저해 외에 전파간섭은 여전히 존재한다. 이는 지평선 이후의 사용 불가능한 위성을 제외하면 수신 가능한 위성은 보통 5~10개이고 이 위성들도 궤도를 따라 회전하다가 Fig. 1과 같이 붉은색 위성 2개가 우연히 비슷한 방향에 위치하고 그 방향이 송전탑을 중심으로 가장자리 GPS 측정지점(하늘색 별)의 반대편이면 송전탑으로 인한 전파간섭은 그 한 지점에 대해서는 여전히 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이러한 구조적 간섭에 의해 측정된 한 지점의 좌표를 대체하여 중심점을 계산하는 알

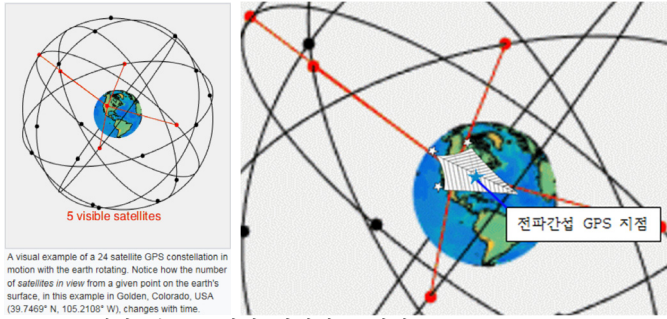


Fig. 1. 6개의 궤도를 따라 회전하는 위성 [1].

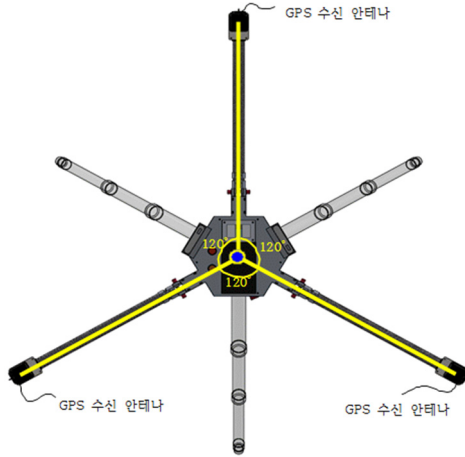


Fig. 2. GPS 수신 안테나의 배치.

고리증을 제시할 예정이다.

II. GPS의 배치 및 좌표측정

본 논문에서는 GPS 측정의 신뢰도를 높이기 위하여 3개의 GPS 모듈(C94-M8P)로 구성된 GPS 측정기를 사용하였고 수신 안테나를 Fig. 2와 같이 120°로 일정 간격으로 배치하여 각 GPS에 수신된 좌표를 조합하여 기구의 중심을 구하여 좌표를 측정한다 [2].

이상적인 GPS 수신에 의해 측정된 3개의 좌표를 연결하면 기하학적으로 Fig. 3의 파랑색 정삼각형을 얻을 수 있을 것이다. 그러나 실제 각 GPS 수신된 좌표는 상황에 따라 오차를 포함하고 있고 각 좌표를 연결하면 Fig. 3의 초록색 삼각형으로 나타날 수 있을 것이다. GPS 좌표 측정자는 초록색 삼각형의 왜곡정도를 보고 재측정할지 초록색 삼각형의 중심을 측정좌표로 사용할지 정성적으로 판단할 수 있고 Eq. 1~4와 같이 각 GPS의 좌표를 이용하여 P_C 를 계산할 수 있다.

$$P_C = (x_c, y_c)$$

$$x_c = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}$$

$$y_c = \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3}$$

(1)

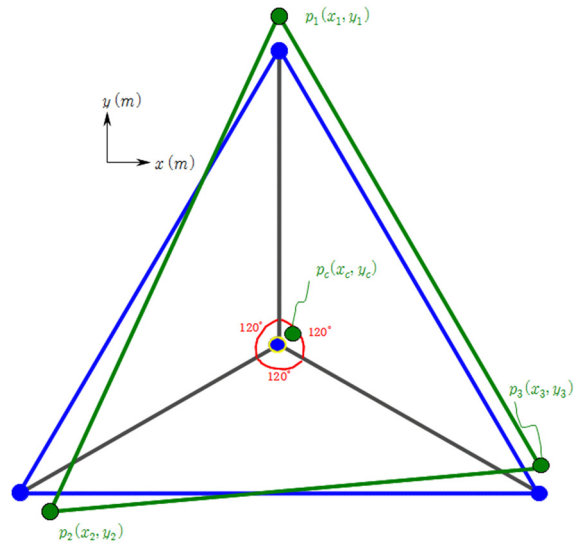


Fig. 3. 정확도 높은 좌표데이터 측정 예.

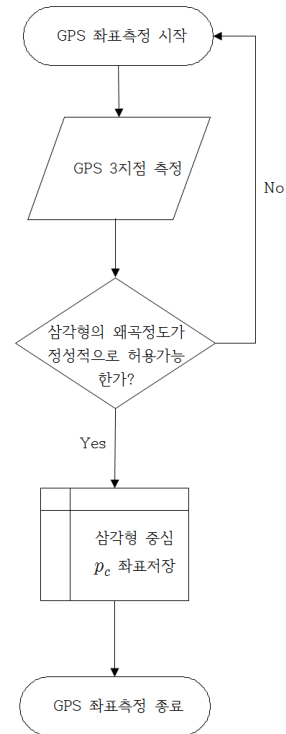


Fig. 4. GPS 좌표 측정 흐름도.

$$l_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

$$l_{23} = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2} \quad (3)$$

$$l_{31} = \sqrt{(x_3 - x_1)^2 + (y_3 - y_1)^2} \quad (4)$$

상기와 같이 송전탑의 가장자리 4지점을 각각 측정할 수 있고 또한, 측정된 4개의 좌표를 이용하여 송전탑의 최종 좌표를 계산할 수 있다. 다음 장에서는 Fig. 4와 같이 측정하는 과정에서 발생할 수 있는 오류를 걸러줄 수 있는 알고리즘을 제시할 것이다.

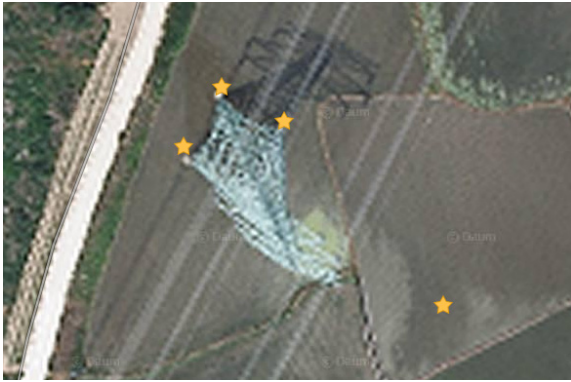


Fig. 5. 전파간섭에 의한 부정확한 좌표데이터 취득 예.

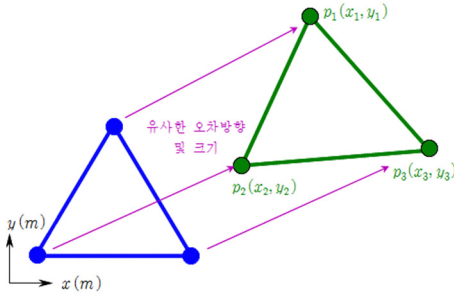


Fig. 6. GPS 좌표 3점이 비슷한 간격과 방향으로 오차를 갖는 경우.

III. 송전탑 위치측정 알고리즘

국토교통부에 의하면 GNSS (Global Navigation Satellite System, 위성측위시스템) 관측 관련 소구점은 인위적 전파장애, 지형·지물 등의 영향을 받지 않도록 초고압송전 선 등의 장소를 피하여 선점하여야 한다고 기술되어 있다 [3]. 이와 같이 송전선 근처나 선하지에서 GPS의 사용에 대해서는 이슈가 제기되어 왔으나 송전선로 아래 현장 측정을 통해 GPS와 위성 간의 신호간섭이 일어나지 않거나 고전압에 의한 영향은 입증되지 않았다는 결론을 얻었다 [4][5].

그러므로 본 논문에서는 송전탑 GPS 좌표 측정 시 발생하는 오차를 고압송전선 보다는 대형 철골구조물인 송전탑이 전파간섭의 원인이라고 판단하고 전파간섭이 존재하는 환경에서 송전탑의 GPS 좌표측정 정확도를 향상시키기 위한 송전탑 위치측정 알고리즘과 그 절차를 소개하고자 한다.

현장에서 Fig. 4와 같은 과정으로 송전탑 가장자리 GPS 좌표를 측정해 보면 대부분은 정확한 좌표를 취득할 수 있지만, 종종 Fig. 5와 같이 송전탑의 가장자리 4점 중 1점만이 심하게 벗어나는 경우가 발생한다. 이러한 현상은 앞서 서론에서 언급했던 Fig. 1과 같이 송전탑을 중심으로 우연찮게 좌측에 GPS 수신 위성들이 배치되고 우측에 송전탑 가장자리 측정지점 (하늘색 별)이 위치하게 된다면 거대 철골구조물인 송전탑에 의해 전파간섭이 발생하게 될 것이다. 이러한 이유로 GPS 좌표 측정기의 3개 GPS 좌표가 Fig. 6과 같이 비슷한 오차를 가지고 비슷한 방향으로 벗어나 측정이 된다면 초록색 삼각형과 같이 정삼각형에 가까운 좌표세트가 구해지게 된다. 결과적으로 이런 부정확한 좌표데이터 세트임에도

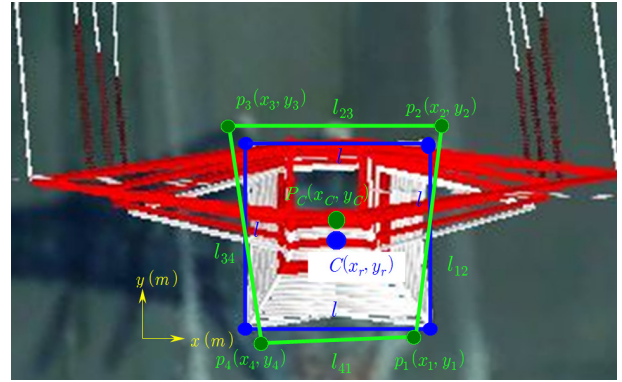


Fig. 7. 송전탑의 위치 측정을 위한 측정지점.

불구하고 측정자가 왜곡 정도를 정성적으로 허용가능하다고 판단하게 되어 전혀 다른 위치를 측정하는 현상이 발생할 수 있다. 이러한 경우는 Fig. 4와 같은 절차로 구분해내기 어렵기 때문에 송전탑 위치측정 알고리즘을 이용하여 이러한 오류를 걸러낼 수 있다.

Fig. 7과 같이 일반적인 격자구조 송전탑의 경우, 정사각형 배치의 레그를 가지고 있는데 줄자나 거리측정기를 이용하여 레그간 간격 l 을 측정 후 반시계 방향으로 송전탑 가장자리 지점 p_1, p_2, p_3, p_4 를 순서대로 GPS 좌표측정기를 이용하여 Fig. 4와 같이 측정한다. 또한, 송전탑의 실제 위치좌표를 알 수는 없지만 알고 있다고 가정하고 송전탑의 위치 참값을 $C(x_r, y_r)$ 로 가정한다. Fig. 6과 같은 오류가 발생하지 않았다면 Fig. 7의 초록색 사각형과 같은 형태로 송전탑 가장자리 4지점이 측정될 것이며 오차범위 이내의 좌표세트를 취득한 것이라 할 수 있다. 이때 송전탑의 측정된 GPS 좌표는 P_C 로 표기하고 Eq. 6과 같이 구할 수 있을 것이다. 이와 같이 오차범위 이내의 좌표데이터 세트를 취득하였다고 판단하기 위해서 오류판별계수 α 를 도입하고 Fig. 7의 초록색 사각형의 각 변을 $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{41}$ 로 정하고 Eq. 7~10 같이 계산하여 모든 변이 Eq. 11과 같이 αl 보다 작거나 같은 조건을 만족하면 오차범위 이내의 송전탑 좌표를 구했다고 판단할 수 있다.

$$P_C = (x_C, y_C)$$

$$x_C = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}$$

$$y_C = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}$$

(6)

$$l_{12} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

(7)

$$l_{23} = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2}$$

(8)

$$l_{34} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2}$$

(9)

$$l_{41} = \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2}$$

(10)

$$l_{12} \leq \alpha l, l_{23} \leq \alpha l, l_{34} \leq \alpha l, l_{41} \leq \alpha l$$

(11)

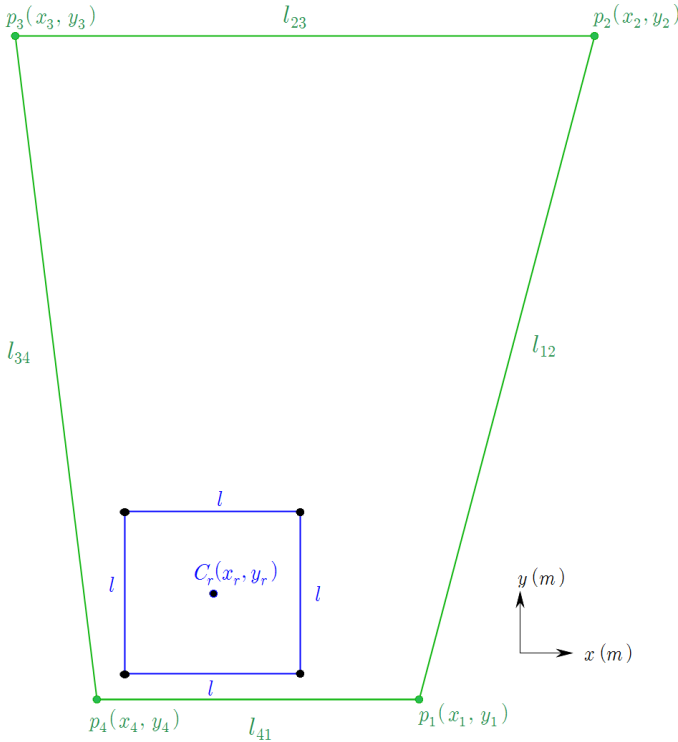


Fig. 8. 송전탑 가장자리 2지점 이상 부정확한 GPS 좌표 발생 경우.

30여 기의 송전탑 GPS 현장측정 중 아직까지 경험해 보지 못해 거의 발생하지 않을 것으로 예상되는 경우로, p_1, p_2, p_3, p_4 중 2개 이상 송전탑 가장자리 GPS 좌표 데이터가 허용오차를 벗어난다고 가정한다면 Fig. 8과 같이 $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{41}$ 중 al 보다 큰 것이 3개 이상 존재할 수도 있다. 이러한 경우, 송전탑 가장자리 지점의 GPS 위치측정을 새로 수행하여 p_1, p_2, p_3, p_4 값을 새로 측정할 수 있다. 서론에서 언급한 바와 같이 상공에 공전하는 5~10개의 위성 배치와 송전탑 가장자리 4지점의 구조상 비슷한 시각에 측정한다면 Fig. 8과 같은 현상은 발생하지 않을 것으로 판단된다.

30여 기의 송전탑 위치측정 중 3회 정도 발생했던 경우로, 예를 들면 Fig. 9와 같이 p_1, p_2, p_3, p_4 중 1개 지점이 허용범위를 벗어나면 $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{41}$ 중 al 보다 큰 값이 2개 생기게 되어 Eq. 12와 같은 조건이 성립된다.

$$l_{12} > al, l_{23} > al, l_{34} > al, l_{41} > al \quad (12)$$

이 경우, 초록색 실선 사각형 l_{12}, l_{23} 이 al 보다 크기 때문에 아래첨자가 공동으로 포함된 2번 지점이 허용범위를 벗어난 좌표데이터라고 판단할 수 있으며, 이때 p_2 를 다시 측정하지 않고 새로 계산된 P_{C_1} 로 대체하고 다시 두 번 l_{12C_1} 과 l_{23C_1} 를 al 과 비교하여 여전히 al 보다 크다면 P_{C_1} 을 다시 P_{C_2} 로 대체하고 다시 두 번 l_{12C_2} 과 l_{23C_2} 를 al 과 비교한다. 이러한 비교과정과 대체과정을 $l_{12C_n}, l_{23C_n}, l_{34}, l_{41}$ 모두가 al 보다 작거나 같을 때까지 Eq. 13~27과 같이 계산을 여러 번(n 번) 반복하여 송전탑 위치좌표 $P_{C_{n+1}}$ 를 얻을 수 있다.

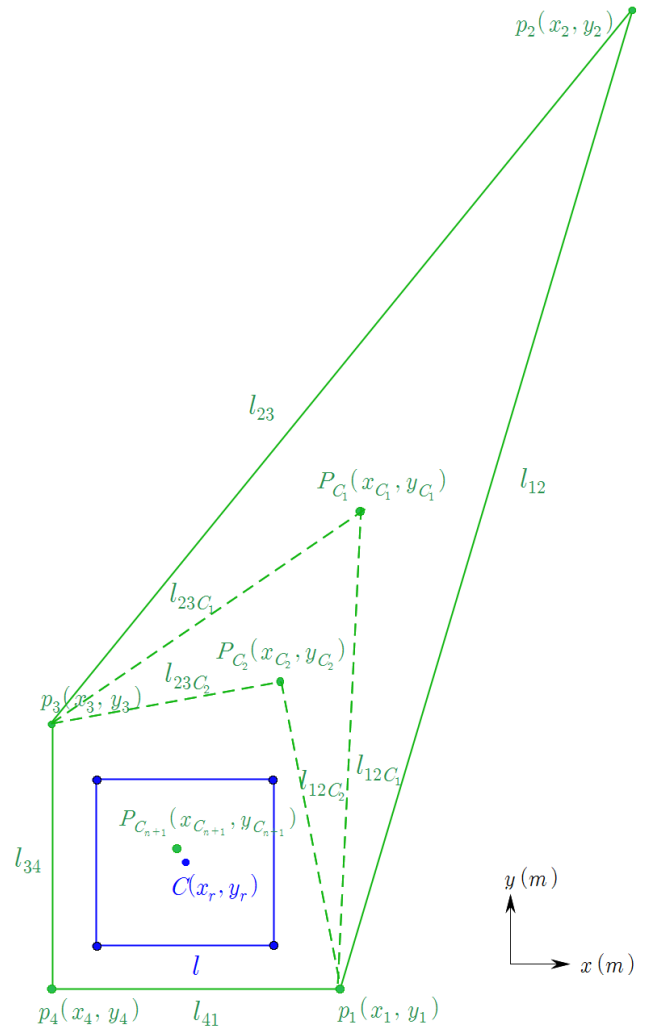


Fig. 9. 송전탑 가장자리 GPS 좌표 1개 지점이 허용범위를 벗어난 경우.

$$P_{C_1} = (x_{C_1}, y_{C_1})$$

$$x_{C_1} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}$$

$$y_{C_1} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} \quad (13)$$

$$l_{12C_1} = \sqrt{(x_1 - x_{C_1})^2 + (y_1 - y_{C_1})^2} \quad (14)$$

$$l_{23C_1} = \sqrt{(x_{C_1} - x_3)^2 + (y_{C_1} - y_3)^2} \quad (15)$$

$$l_{34} = \sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (y_3 - y_4)^2} \quad (16)$$

$$l_{41} = \sqrt{(x_4 - x_1)^2 + (y_4 - y_1)^2} \quad (17)$$

$$l_{12C_1} > al, l_{23C_1} > al, l_{34} \leq al, l_{41} \leq al \quad (18)$$

$$P_{C_2} = (x_{C_2}, y_{C_2})$$

$$x_{C_2} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + x_4}{4}$$

$$y_{C_2} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4}$$

(19)

$$l_{12C_2} = \sqrt{(x_1 - x_{C_2})^2 + (y_1 - y_{C_2})^2}$$

(20)

$$l_{23C_2} = \sqrt{(x_{C_2} - x_3)^2 + (y_{C_2} - y_3)^2}$$

(21)

$$l_{12C_2} > \alpha l, l_{23C_2} > \alpha l, l_{34} \leq \alpha l, l_{41} \leq \alpha l$$

(22)

$$P_{C_n} = (x_{C_n}, y_{C_n})$$

$$x_{C_n} = \frac{x_1 + x_{C_{n-1}} + x_3 + x_4}{4}$$

$$y_{C_n} = \frac{y_1 + y_{C_{n-1}} + y_3 + y_4}{4}$$

(23)

$$l_{12C_n} = \sqrt{(x_1 - x_{C_n})^2 + (y_1 - y_{C_n})^2}$$

(24)

$$l_{23C_n} = \sqrt{(x_{C_n} - x_3)^2 + (y_{C_n} - y_3)^2}$$

(25)

$$l_{12C_n} \leq \alpha l, l_{23C_n} \leq \alpha l, l_{34} \leq \alpha l, l_{41} \leq \alpha l$$

(26)

$$P_{C_{n+1}} = (x_{C_{n+1}}, y_{C_{n+1}})$$

$$x_{C_{n+1}} = \frac{x_1 + x_{C_n} + x_3 + x_4}{4}$$

$$y_{C_{n+1}} = \frac{y_1 + y_{C_n} + y_3 + y_4}{4}$$

(27)

상기와 같이 허용 가능한 좌표인지를 판단하기 위해서는 도입한 오류판별계수 α 을 구할 필요가 있다. 오류판별계수 α 는 무차원 계수로 실제로 측정된 송전탑의 레그와 레그 간의 한 변 길이(l)에 곱하여 측정되는 각 좌표를 연결하는 각 변과 비교할 수 있다. 오류판별계수 α 를 구하기 위하여 Eq. 28과 같이 가정된 송전탑의 참값 좌표 $C(x_r, y_r)$ 와 n 번의 반복계산을 통해 계산된 $P_{C_{n+1}} = (x_{C_{n+1}}, y_{C_{n+1}})$ 와의 거리를 오차 값 L_{n+1} 이라고 하고 Eq. 28과 같이 나타낼 수 있다. 오류판별계수 α 는 L_{n+1} 값을 최소화하는 계수를 선정하면 된다.

$$L_{n+1} = \sqrt{(x_t - x_{C_{n+1}})^2 + (y_t - y_{C_{n+1}})^2}$$

(28)

Table 1. 송전탑의 참값 좌표

구분	좌표(x,y) [단위 m]
1번 지점	10, 0
2번 지점	0, 0
3번 지점	0, 10
4번 지점	10, 10
중심	5, 5

Table 2. 송전탑의 허용범위를 벗어난 지점의 샘플 좌표

샘플번호	벗어난 지점좌표		송전탑 중심좌표	오차거리 (m)	샘플번호	벗어난 지점좌표		송전탑 중심좌표	오차거리 (m)
	x	y				x	y		
1	x	0.4	2.6	9.26	11	x	68.1	19.5	14.89
	y	45.8				y	23.1		
2	x	23.7	8.4	16.05	12	x	9.6	4.9	20.09
	y	72.7				y	90.4		
3	x	91.8	25.5	21.74	13	x	42.8	13.2	8.89
	y	39.4				y	23.7		
4	x	17.9	7	9.48	14	x	26.2	9	9.89
	y	47.1				y	46.1		
5	x	34.9	11.2	6.51	15	x	37.4	11.8	6.91
	y	17.8				y	13.7		
6	x	78.3	22.1	20.81	16	x	8.2	4.6	12.07
	y	57.6				y	58.3		
7	x	75.1	21.3	17.36	17	x	35.7	11.4	16.45
	y	34.1				y	70.6		
8	x	67.9	19.5	16.41	18	x	77.5	21.9	16.95
	y	40.9				y	15.9		
9	x	65.4	18.8	14.19	19	x	60.4	17.6	12.89
	y	22.4				y	20.9		
10	x	98.6	27.1	22.2	20	x	76.3	21.6	17.65
	y	16.2				y	34.3		

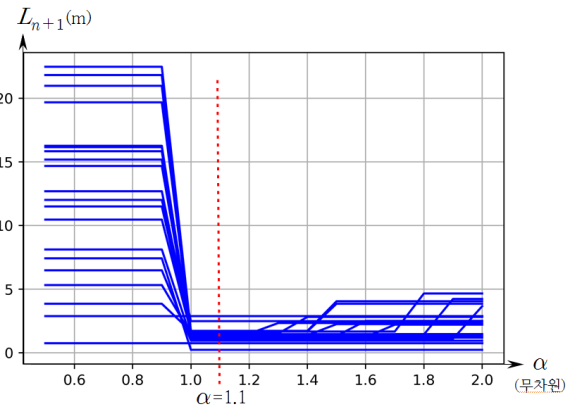


Fig. 10. 오류판별계수 α 에 대한 오차 값 L_{n+1} 의 변화.

오류판별계수 α 의 계산을 위해 송전탑의 참값 좌표를 Table. 1과 같이 선정하고 Table. 2와 같이 송전탑의 4개 지점 중 허용범위를 벗어난 지점(Fig. 9의 p_2)의 샘플 좌표를 무작위로 20개 선정하여 알고리즘 적용 전의 송전탑 중심좌표(오류를 포함하여 계산된 좌표)와 송전탑의 참값 좌표와의 오차거리를 계산하였다.

오류판별계수 α 를 결정하기 위하여 Table. 2의 20개의 샘플 좌표에 대하여 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하여 α 값을 Fig. 10과 같이 다변화하여 오차 값 L_{n+1} 을 구하여 보았다. 오차 값 L_{n+1} 을 최소화하는 오류판별계수 α 값은 1.0~1.2 구간이다. α 값이 1.0보다 작거나 1.2보다 크면 오히려 오차 값 L_{n+1} 이 증가하게 된다.

각 샘플 좌표에 대하여 본 논문에서 제시한 알고리즘이 적용되어 샘플 좌표들이 수렴되는 과정을 보여주기 위하여 α 값을 Fig. 10과 같이 구간이 중간 값인 1.1로

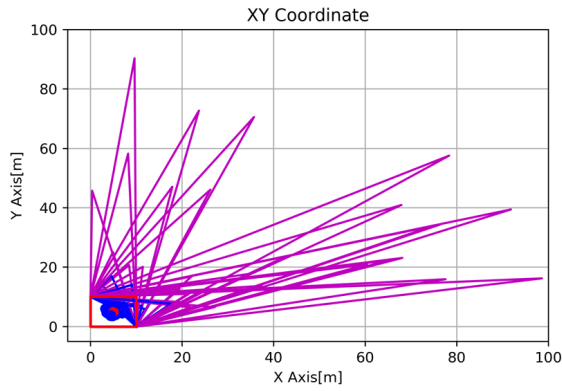


Fig. 11. 오류판별계수 $\alpha=1.1$ 을 적용한 샘플 좌표 20개 전체의 수렴 모습.

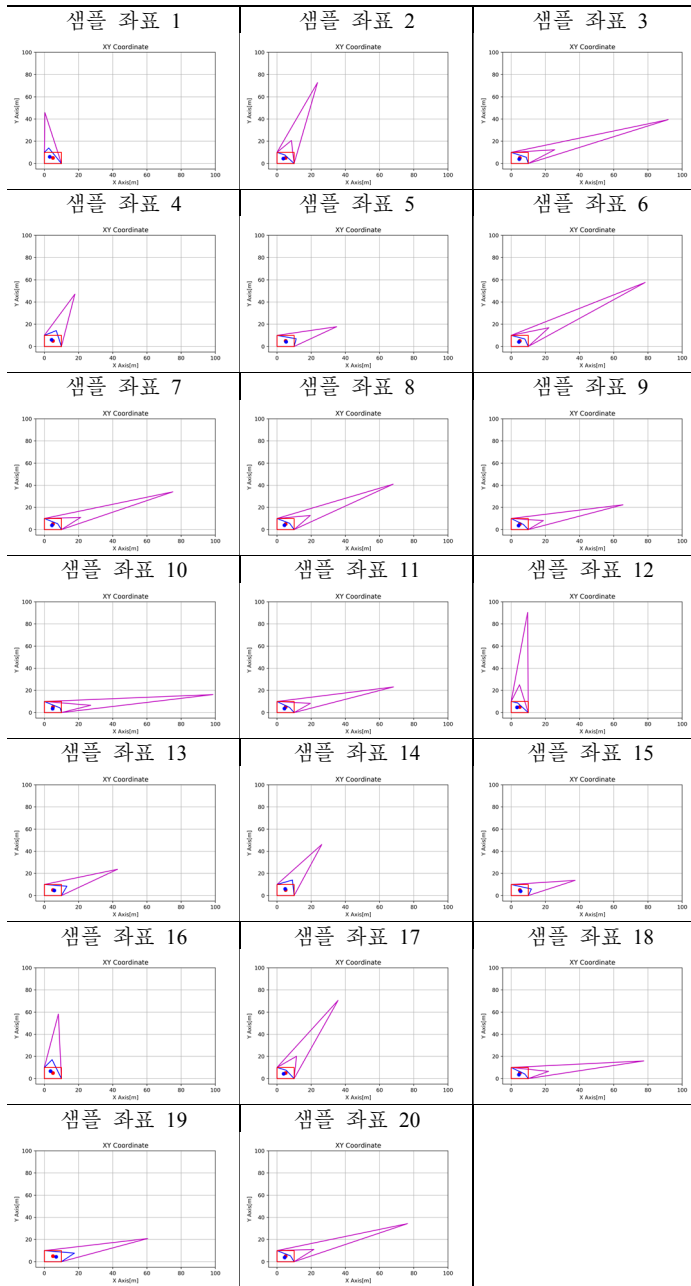


Fig. 12. 샘플 좌표 20개에 대한 각각의 수렴 결과($\alpha=1.1$).

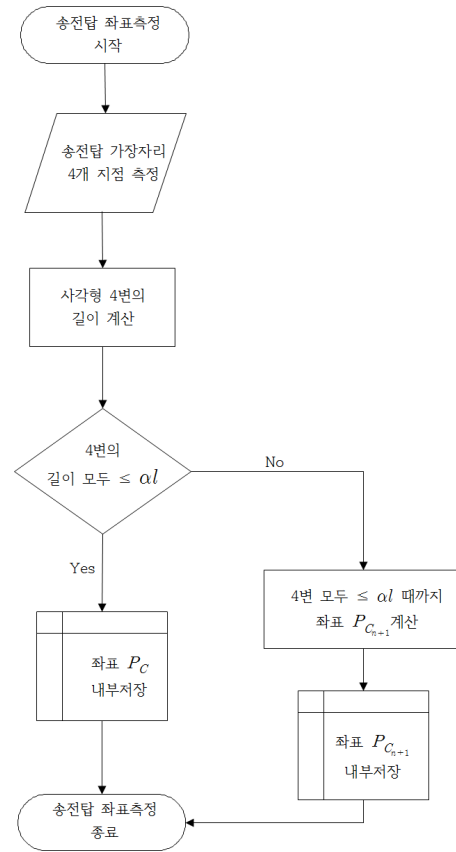


Fig. 13. 송전탑 위치측정 흐름도.

정하여 반복계산을 수행하였다. Fig. 11은 샘플 좌표 20개 전체에 대하여 수렴되는 과정을 한 그래프에 표시하였다. Fig. 11의 보라색 실선은 샘플 좌표가 수렴되는 과정을 표시하였고 파랑색 실선은 수렴된 결과를 표시하였다. 각 샘플에 대한 독립적인 수렴과정은 Fig. 12에서 볼 수 있으며 실제 송전탑 참값 좌표에 가깝게 수렴된 결과를 볼 수 있다.

Fig. 11과 12에서 보는 바와 같이 본 알고리즘을 이용하면 전파간섭에 영향 하에서도 비교적 정확한 송전탑 GPS 좌표를 구할 수 있다. 상기의 송전탑 위치측정 과정을 간단한 흐름도로 표시하면 Fig. 13과 같이 정리할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 3개의 GPS 모듈로 구성된 GPS 좌표 측정기를 이용하여 송전탑 가장자리 4지점을 측정하여 전파간섭에 의한 부정확한 좌표를 걸러내고 송전탑의 GPS 좌표를 측정할 수 있는 송전탑 위치측정 알고리즘에 대하여 소개하였다. 본 논문에서 제안된 방법을 이용하여 30여 기의 송전탑 위치를 현장 측정하였고 측정된 송전탑의 GPS 좌표를 기반으로 드론의 비행경로를 생성하여 한국전력공사 충남지역본부와 경남지역본부의 송전탑 30기를 포함한 송전선로 구간을 점검드론을 이용하여 안전하게 점검하였다. 본 알고리즘은 송전탑에 의한 전파간섭 하에서도 신뢰도 있는 송전탑 위치를 구할

수 있고 측정시간을 단축시킬 수 있어 송전탑의 GPS 좌표측정에 매우 적합하다고 할 수 있다.

REFERENCES

- [1] Wikipedia, Available at https://en.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System
- [2] J. W. Ham, S. T. Kim, J. K. Lee, J. Y. Park, I. H. Choi, "Development of GPS Coordinate Measurement Device for Planning Waypoints of Power Line Inspection Drone", KSPE 2017 Spring Conference, 2017.
- [3] 국토교통부, "GNSS에 의한 지적측량규정", 2장 제5조.
- [4] J. Michael Silva and R. G. Olsen, "Use of Global Positioning System (GPS) Receivers Under Power-Line Conductors," IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, pp. 938~944, October 2002.
- [5] M. Rabah and A. El-Hattab, "Investigating the Impact of High Voltage Power Lines on GPS Signal," Zfv - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Vol. 6, pp.338~343, 2011.