인공신경망을 이용한 함상 자동착륙 상황에서의 위험도 평가 기법

이지훈, 이소망, 이석원, 김동해, 김유단*

Risk Evaluation Scheme in Automatic Aircraft Carrier Landing Using Artificial Neural Network

Jihoon Lee*, Somang Lee, Seokwon Lee, Donghae Kim and Youdan Kim*
Department of Aerospace Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

Automatic aircraft carrier landing on an aircraft carrier has many risk factors, and it is important to make a proper wave-off decision by evaluating the risk. While a landing signal officer generally takes responsibility for the decision, full automation of carrier landing requires a appropriate risk evaluation scheme. In this paper, two position error-based risk evaluation schemes considering landing environment are proposed using artificial neural network. The artificial neural network takes vertical/horizontal glide path error or corresponding scale factor of ellipse as inputs in addition to root mean square value of distance to glide path, and takes reward or penalty according to the outcome of the landing attempt: successful landing, bolter and crash. Learning data for the network are obtained through Monte Carlo simulation.

초 록

항공기가 항공모함에 착륙할 때는 많은 위험 요소들이 존재하기 때문에 위험도를 적절히 평가하여 착함 재시도 의사결정을 내리는 것이 매우 중요하다. 일반적으로는 착함 관제장교가 의사결정을 수행하지만, 함상 이착륙 과정의 자동화를 위해서는 적절한 위험도 평가 기법이 요구된다. 본 연구에서는 인공신경망을 이용하여 착함 환경을 고려한 위치오차 기반 위험도 평가 기법을 제안하였다. 인공신경망 입력으로 수직/수평 경로오차 또는 그에 대응되는 타원의 환산계수와 경로오차(활강 경로와의 거리)의 최소 자승값을 사용하였으며, 출력으로는 착함 성공, 재이륙, 실패로 구분되는 세 가지 결과에 따른 점수를 부여하였다. 인공신경망 학습에 필요한 데이터를 얻기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

Key Words : Automatic Aircraft Carrier Landing(함상 자동착륙), Decision Making(의사결정), Wave-off Boundary(착함 재시도 경계), Risk Evaluation(위험도 평가), Artificial Neural Network(인공신경망)

* Corresponding author, E-mail : ydkim@snu.ac..kr

목 차

초 록

Ⅰ. 서 론

Ⅱ. 위험도 평가 기법

2.1 함상 자동착륙 환경

2.1.1 착륙 절차

2.1.1 Landing Box

2.2 위험도 평가기법 Ⅰ

2.3 위험도 평가기법 Ⅱ

Ⅲ. 수치 시뮬레이션

Ⅳ. 결 론

후 기

참고문헌

Ⅰ. 서 론

해상에서 함상에 착륙하는 것은 일반적인 지상 활주로에 착륙하는 경우보다 많은 위험요소를 지니고 있다. 위험도를 가중시키는 요소로는 고정된 지상 활주로와 달리 항공모함이 계속 움직인다는 점과 착륙용 활주로에서 허용되는 착지 영역이 매우 좁다는 것, 항공모함의 진행방향과 나란하지 않은 착륙용 활주로, 그리고 함상에서 이륙하는 항공기들의 엔진 후류가 만들어내는 난류가 항공모함 후미로 착륙하기 위해 접근하는 항공기에 영향을 미친다는 점 등을 들 수 있다. 또한 함미 충돌(ramp strike) 가능성을 줄이기 위해 항공기가 착륙 마지막 단계에 플레어(flare) 기동을 수행하지 않기 때문에 강하율(sink rate)의 작은 증가도 경착륙(hard landing)으로 이어질 수 있는 위험성이 있다.

미 해군의 경우, 수동착륙 과정에서는 일반적으로 터치다운 12.5초 전부터 1.5초 전 사이에 착함관제 장교(landing signal officer)가 위험도를 평가하여 착함 재시도(wave-off) 의사결정(decision making)을 내리게 되며, 자동착륙 과정에서는 수직 및 수평방향 경로오차에 따라 수동착륙으로 전환하거나 또는 자동으로 착함 재시도를 수행하게 된다[1-2]. Richards는 착함관제 장교의 의사결정을 돕기 위해 다중 인공지능 기법을 이용하여 의사결정 보조장치(decision support tool)가 제안하였으며[3], Lee 등은 착함 결과에 결정적으로 영향을 미치는 변수들의 확률분포를 이용한 위험도 평가기법을 제안하였다[4]. 최근에는 인공신경망을 이용하여 함미-후크간 간격(ramp-to-hook clearance)을 예측함으로써 착함 위험도를 평가하려는 연구가 수행되었다[5-6]. 그 외에도 potential carrier ramp strike waveoff criteria를 정의하여 착함 재시도 의사결정 장치를 고안한 연구도 있었다[7].

본 연구에서는 인공신경망을 이용하여 착함 위험도를 평가하는 기법을 제안하였다. 인공신경망의 입력으로는 수직/수평 경로오차, 경로오차의 Root Mean Square(RMS) 값 또는 타원의 scale factor와 경로오차의 RMS 값을 사용하였으며, 출력으로는 성공, 실패, 재이륙으로 구분되는 착함결과에 따라 일정한 reward 또는 penalty가 주어지도록 하였다. 결과적으로 성공적으로 학습된 인공신경망은 현재 경로오차의 RMS 값과 수직/수평 경로오차 또는 타원의 scale factor가 입력으로 주어지면 해당하는 지점의 위험도를 출력한다. 수직/수평 위치오차와 RMS 값을 사용하는 경우에는 인공신경망의 출력이 0이 되는 위치가 폐곡선으로 나타나지 않는 경우가 있기 때문에, 위험도를 평가하는 데는 적절하지만 시각적으로 직관적인 착함 재시도 경계를 만들어내기는 어렵다. 본 연구에서는 타원 형태로 학습된 인공신경망을 이용하여 실시간 위험도 평가가 반영된 착함 재시도 문턱값을 설정하였다.

Ⅱ. 위험도 평가 기법

2.1 함상 자동착륙 환경

2.1.1 착륙절차

일반적으로 항공기의 함상착륙은 Fig. 1과 같은 절차를 따라 이루어진다. Marshal point에 도달한 시점부터 착륙절차가 시작되며, radar acquisition window를 통과하는 시점부터 Instrument Landing System (ILS)으로부터 glideslope/localizer deflection값을 받게 된다. 함미로부터 약 4마일 뒤에 있게 되는 시점부터 descent phase가 시작되며, Fresnel Lens Optical Landing System (FLOLS)로부터 정의된, 공간상에 고정된 활강 경로를 추종하게 된다. 고도가 낮아지고 항공모함에 가까워짐에 따라 해면 효과와 항공모함 후류에 의한 공력섭동이 증가하게 된다. 따라서 이러한 위험요소들을 모두 고려하여 터치다운 12.5초 전부터

1.5초 전 사이에 착함과정을 중단하고 착함 재시도를 여부를 결정한다. 착함 재시도를 결정하는 구간을 이와 같이 잡는 이유는 터치다운까지 남은 시간이 12.5초보다 큰 경우에는 현재의 위치와 터치다운 시점의 위치가 밀접한 관련이 있지 않기 때문에 위험도를 평가하기 적절하지 않고, 1.5초 이내에는 항공모함과의 거리가 너무 가까워 급격한 기동을 하는 것이 위험하기 때문이다.

항공기는 항공모함 위 착륙 갑판에 설치된 arresting wire 중의 하나에 tail hook을 걸어 감속하면서 착륙을 한다. 일반적으로 arresting wire는 40ft 간격으로 4개가 설치되어 있으며, 터치다운을 한 이후에 hook 체결에 실패한 항공기는 재이륙(bolter)을 시도한다. 재이륙 과정을 위해 터치다운 직전의 항공기는 엔진 추력을 최대로 올리고 터치다운을 수행한다. 재이륙이나 착함 재시도 이후 항공기는 항공모함 진행방향과 평행하게 뒤로 비행하여 다시 접근을 시도한다.

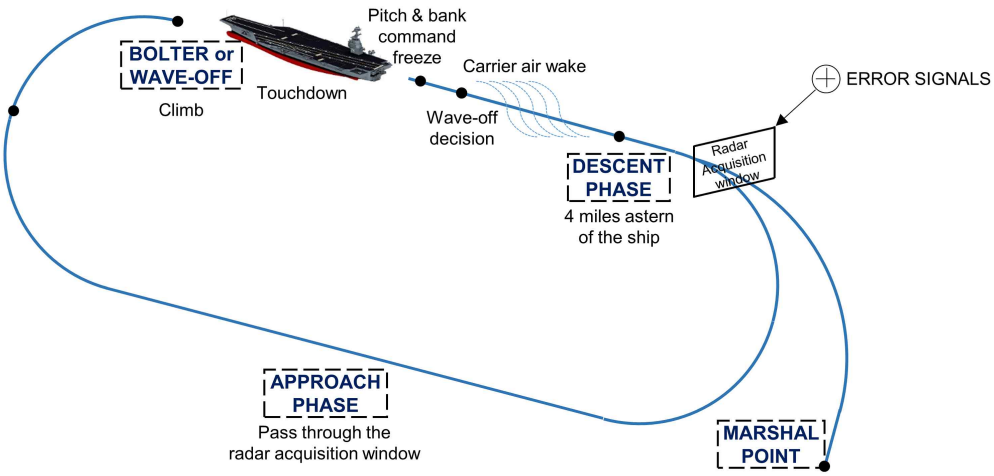


Figure 1. Aircraft carrier landing procedure.

2.1.2 Landing Box

Radar acquisition window를 통과한 이후 항공기의 위치에 따라 glideslope/localizer deflection값이 측정되는데, 일반적으로는 수평방향으로 ±3°, 수직방향으로는 ±0.7°까지 측정된다. 따라서 landing box는 그림 2와 같이 거리가 가까워짐에 따라 공간상에서 점점 작은 크기를 갖게 된다. 이 수직/수평 경로오차는 경로추종 제어와 위험도 평가에 사용된다.

수평경로 오차는 빠른 수정이 가능하다. 반면에 활강경로가 해면과 이루는 각도가 작으므로 작은 수직경로 오차로도 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 일반적으로 갑판 위 바람의 세기와 방향에 따라 활강 경로각을 약 4°로 설정하는데, 이 경우 활강경로로부터 1m의 수직방향 오차는 착륙 활주로상의 터치다운 지점을 14m 이동시키는 효과를 가진다.

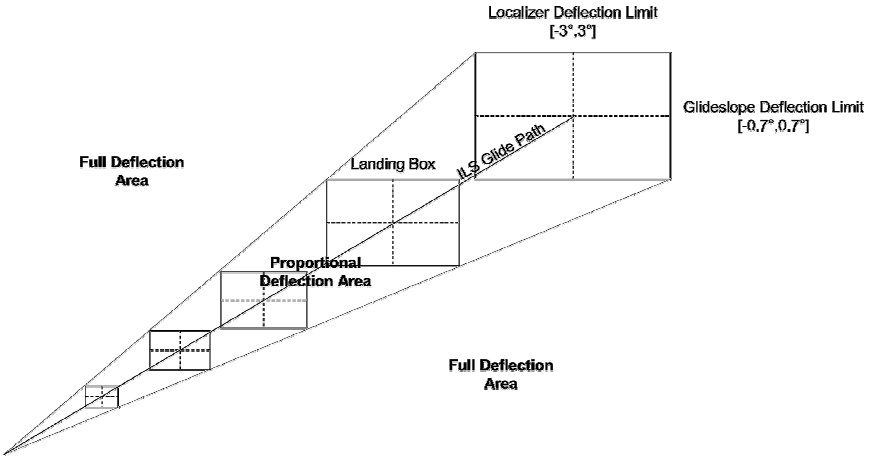


Figure 2. Landing boxes along the glide path.

2.2 위험도 평가기법 Ⅰ

본 연구에서는 터치다운까지 남은 시간 대신에 기준 터치다운 지점과의 거리에 따라 landing box를 설정했다. 착함결과는 현재의 경로오차로부터 직접적으로 영향을 받지만, 난류와 같은 외란이나 경로추종 성능의 영향도 받는다. 이때, 특정한 외란 조건에서 현재 접근하고 있는 항공기가 경로를 얼마나 잘 추종하는가는 기준경로와의 거리의 RMS 값으로 나타낼 수 있다. 기준경로를 이상적으로 추종하는 경우에는 경로오차 RMS 값은 0이 되며, 외란이 심해지거나 경로추종 성능이 떨어지는 경우에는 이 값이 커지게 된다. 따라서 같은 시점에 같은 경로오차를 갖더라도 경로오차의 RMS 값이 작은 항공기는 남은 시간동안 경로를 절절하게 제어하여 성공적으로 착함할 수 있을 것이라고 예상할 수 있다. 반대로 경로오차 RMS 값이 큰 항공기는 현재의 위치오차가 작더라도 남은 시간동안 기준경로를 벗어날 수 있는 가능성이 클 것으로 예상할 수 있다.

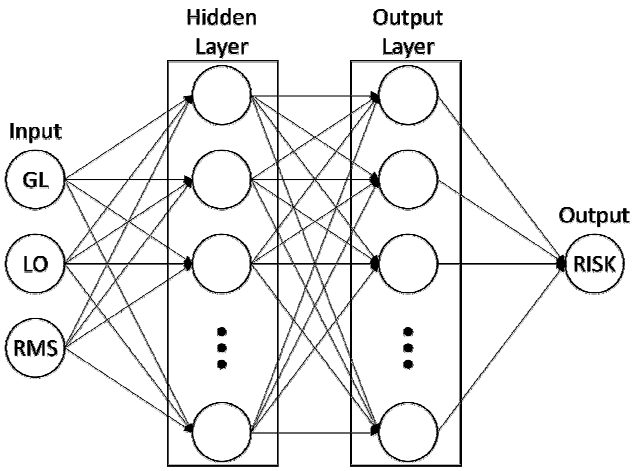


Figure 3. Schematic diagram of artificial neural network for risk evaluation scheme Ⅰ.

따라서 착함을 시도하고 있는 항공기의 착함 위험도를 평가하기 위해서는 수직/수평 위치오차 뿐만이 아니라 경로오차의 RMS 값도 동시에 고려해야 한다. 본 연구에서는 수직경로 오차, 수평경로 오차, 경로오차 RMS 값을 입력으로 하고, 착함결과에 따른 reward 또는 penalty를 출력으로 하는 인공신경망을 Fig. 3과 같이 구성하여 착함 위험도를 평가하였다.

2.3 위험도 평가기법 II

위험도 평가기법 I과 같이 착함 위험도를 평가하는 경우, 기준 위치에서 위아래 또는 좌우로 벗어난 정도에 따라 위험도가 대칭적으로 증가하지 않는다. 이 방식은 짧은 시간 내에 의사결정을 내려야 하는 착함상황에서는 불필요한 복잡성으로 작용할 수 있다. 따라서 불필요할 수 있는 복잡성을 감소시키기 위해 수직/수평 경로오차를 타원 형태로 대체하였다.

하나의 landing box는 Fig. 4와 같은 형태를 갖는다고 생각할 수 있다. 이때 localizer deflection(deg)을 x축, glideslope deflection(deg)을 y축으로 생각한다. 장반경이 a=3이고, 단반경이 b=1인 타원을 단위 타원으로 생각하면, 그 타원의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{x^2}{a^2}+\frac{y^2}{b^2}=1 \tag{1}$$

항공기의 현재 위치 (x_1,y_1)이 주어졌을 때, 다음에 해당하는 scale factor K를 찾을 수 있다.

$$\frac{x_1^2}{(Ka)^2}+\frac{y_1^2}{(Kb)^2}=1 \tag{2}$$

Figure 5와 같이 인공신경망의 입력에서 glideslope/localizer deflection을 scale factor K로 대신하면, 수평/수직 오차가 주어졌을 때 두 방향으로의 가중치가 반영된 위험도를 산출할 수 있다. 이 scale factor와 함께 앞에서와 마찬가지로 경로오차의 RMS 값이 입력으로 주어지며, 착함결과에 따른 reward 또는 penalty가 출력으로 주어진다.

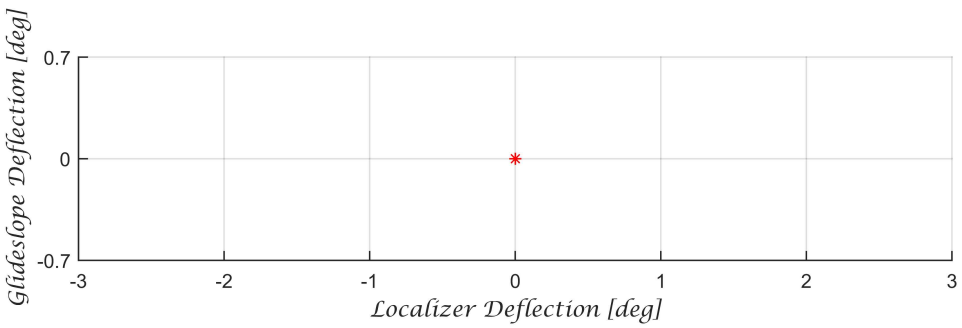


Figure 4. Landing box

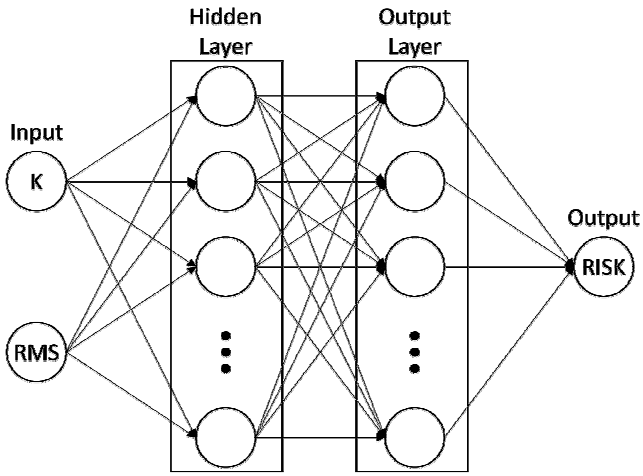


Figure 5. Schematic diagram of artificial neural network for risk evaluation scheme Ⅱ.

Ⅲ. 수치 시뮬레이션

본 연구에서는 두 가지 위험도 평가기법을 적용하여 인공신경망을 구성하였다. 함상 착륙 시뮬레이터는 참고문헌 [4]에서와 같이 X-Plane flight simulator와 MATLAB/Simulink를 이용해 구성하였으며, 몬테 카를로(Monte Carlo) 시뮬레이션은 다양한 외란조건에서 총 20,000회 수행되었다. Figure 6는 X-Plane에서 지원하는 함상착륙 시나리오의 한 모습이다.



Figure 6. X-Plane flight simulator. MQ-9 Reaper is attempting to land on USS Nimitz aircraft carrier.

Figure 7은 위험도 평가기법 Ⅰ에서 제안된 방법으로 학습된 인공신경망에 의한 landing box risk map을 다양한 RMS 값과 거리에 대해서 보여주고 있다. Figure 7a의 각 행은 거리오차 RMS 값이 0, 3, 6, 9, 12인 경우에 해당하고, 각 열은 터치다운 지점으로부터의 거리가 50m, 100m, 150m, 200m, 250m인 지점에 해당한다. Figure 7b의 각 열은 터치다운 지점으로부터의 거리가 300m, 350m, 400m, 450m, 500m인 지점에 해당하며, 각 행이 의미하는 바는 Fig. 7a에서와 같다. 본 연구에서는 착함에 성공한 경우에는 출력 값에 1을 할당하고, 터치다운은 하였으나 arresting hook 체결에 실패하여 재이륙을 하여야 하는 경우에는 출력 값에 0을, 함미충돌이나 경착륙 등 항공모함과 충돌하여 항공기가 파손되는 경우에는 출력 값에 -1을 할당하였다. 따라서 landing box risk map에서 위험도가 1에 가까우면 안전한 영역에 해당하고, 위험도가 -1에 가까운 값을 가지는 경우에는 위험도가 높아서 착함 과정을 중단해야 하는 경우에 해당한다. Figure 7에서 RMS 값이 0인 경우에는 landing box 내부의 대부분의 위치에서 위험도가 1에 가까운 값을 가지며, RMS 값이 증가할수록 전체적으로 위험도가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 터치다운 지점으로부터의 거리가 가까운 지점에서는 중심에서 멀어질수록 위험도가 증가하는 뚜렷한 패턴이 나타나지만, 거리가 먼 지점에서는 상대적으로 그러한 경향이 다소 약해다는 것을 알 수 있다. 전체적으로 위험도가 직관과 부합되게 평가되고 있지만, 복잡한 계산이 요구된다.

Figure 8은 위험도 평가기법 Ⅱ에서 제안된 방법으로 학습된 인공신경망에 의한 landing box risk map을 보여준다. Figure 8을 살펴보면 기법 Ⅱ는 기법 Ⅰ과 비교했을 때 다양한 위치에 대한 위험도를 서로 다르게 평가하지는 않으며, 따라서 특이 경우(peculiar case)를 효과적으로 배제하여 더 직관적인 위험도 평가결과를 제공할 수 있음을 확인할 수 있다.

Figure 9는 경로오차 RMS 값이 0m, 1m,..., 10m, 11m인 경우에 대해 위험도 평가를 다시 수행하여 3차원 공간상에 착함 재시도 경계를 계산한 결과이다. 즉, 위험도 평가기법 Ⅱ를 이용하여 50m부터 500m까지 50m간격으로 각 지점에 해당하는 landing box에서 위험도를 평가한 후, 위험도 값이 0인 지점들을 이어 그린 것이다. 따라서 경계 내부는 착함에 실패할 가능성보다는 성공할 가능성이 더 높은 영역에 해당한다. 이러한 착함 재시도 경계는 착함을 시도하는 항공기의 위치 데이터로부터 계산된 RMS 값만 있으면 실시간으로 계산하여 생성할 수 있다.

본 연구에서는 착함 재시도 경계 값을 0으로 설정하였지만, 위험도가 0인 지점을 기준으로 착함 재시도 결정을 수행할 필요는 없다. 이러한 형태의 인공신경망은 출력으로 일종의 결과 사이의 확률을 제공하기 때문에, 보수적으로 착함 재시도 결정을 내리기 위해서는 경계 값을 0보다 큰 값으로 설정하면 된다. 또한 재이륙을 한 경우의 출력을 1과 -1 사이의 어떤 값을 부여하느냐에 따라서도 landing box risk map의 형태가 달라질 수 있다. 보다 다양한 시뮬레이션을 통해 많은 에피소드를 확보하면 위험도 평가 성능이 개선될 수 있을 것이다.

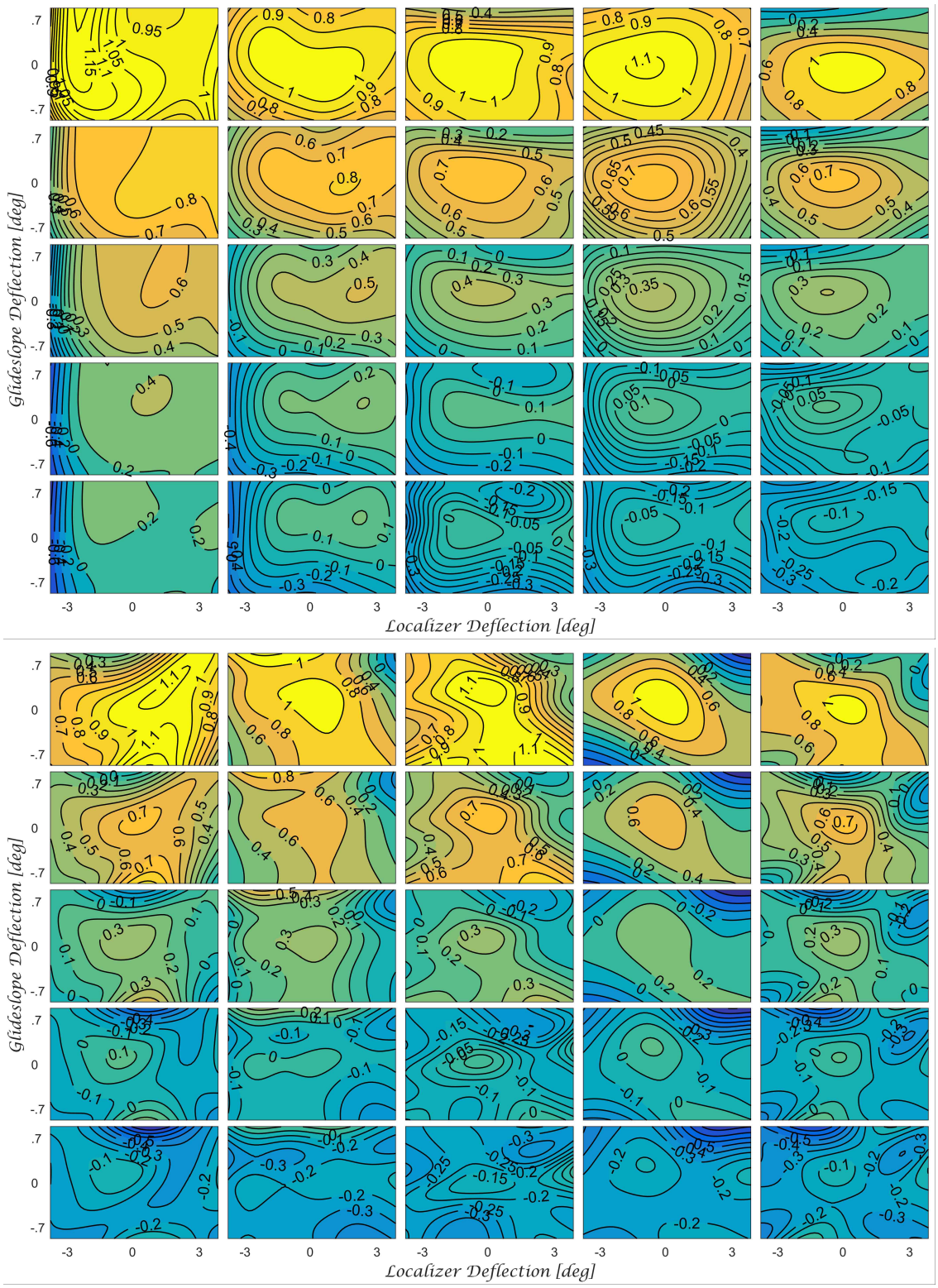
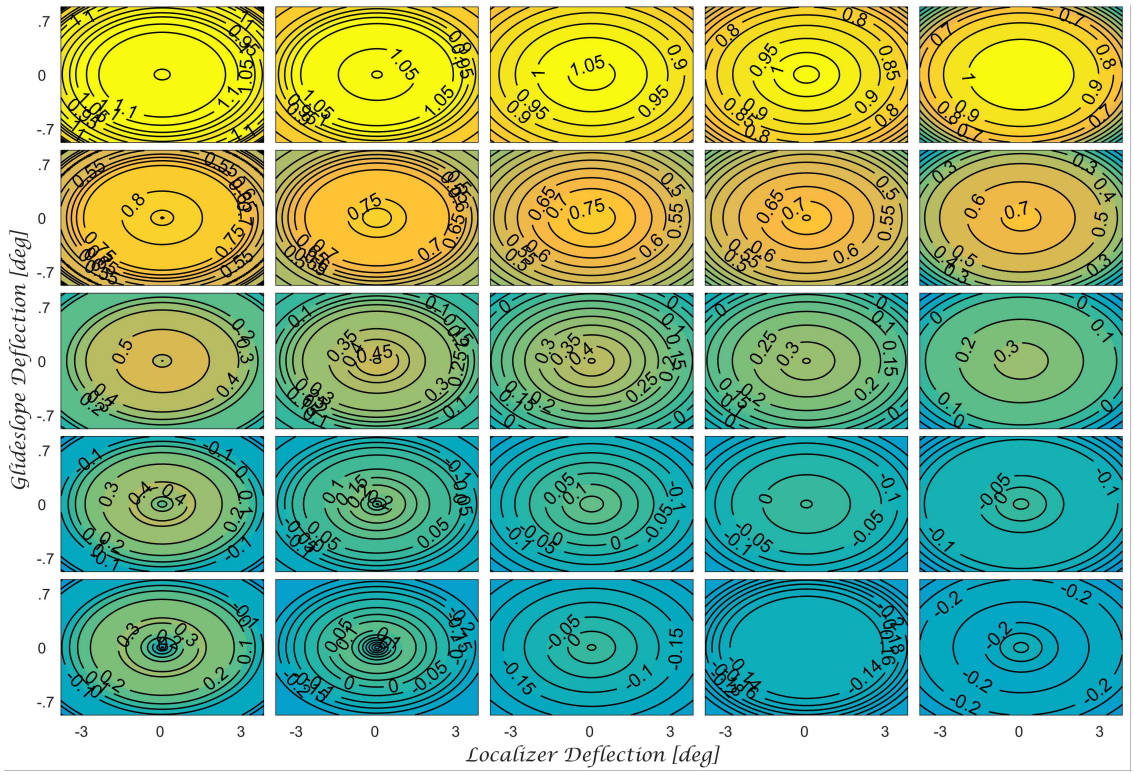


Figure 7a, 7b. Landing box risk map generated by risk evaluation scheme Ⅰ.



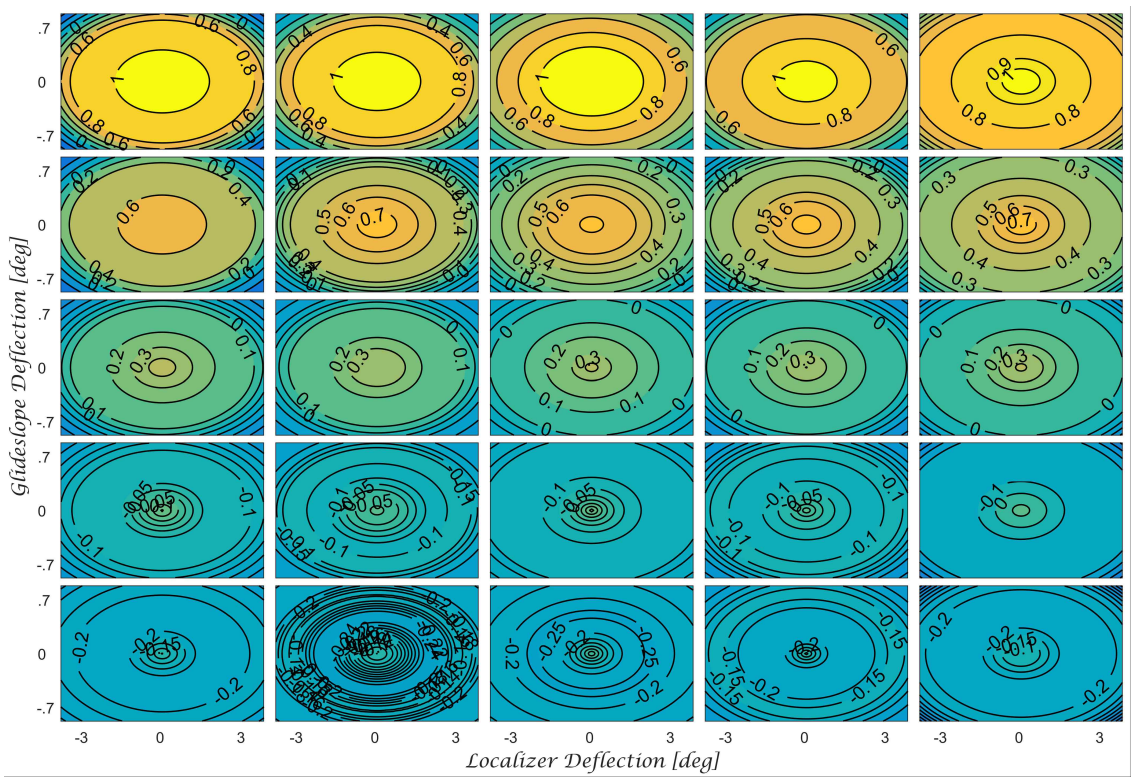


Figure 8a, 8b. Landing box risk map generated by risk evaluation scheme Ⅱ.

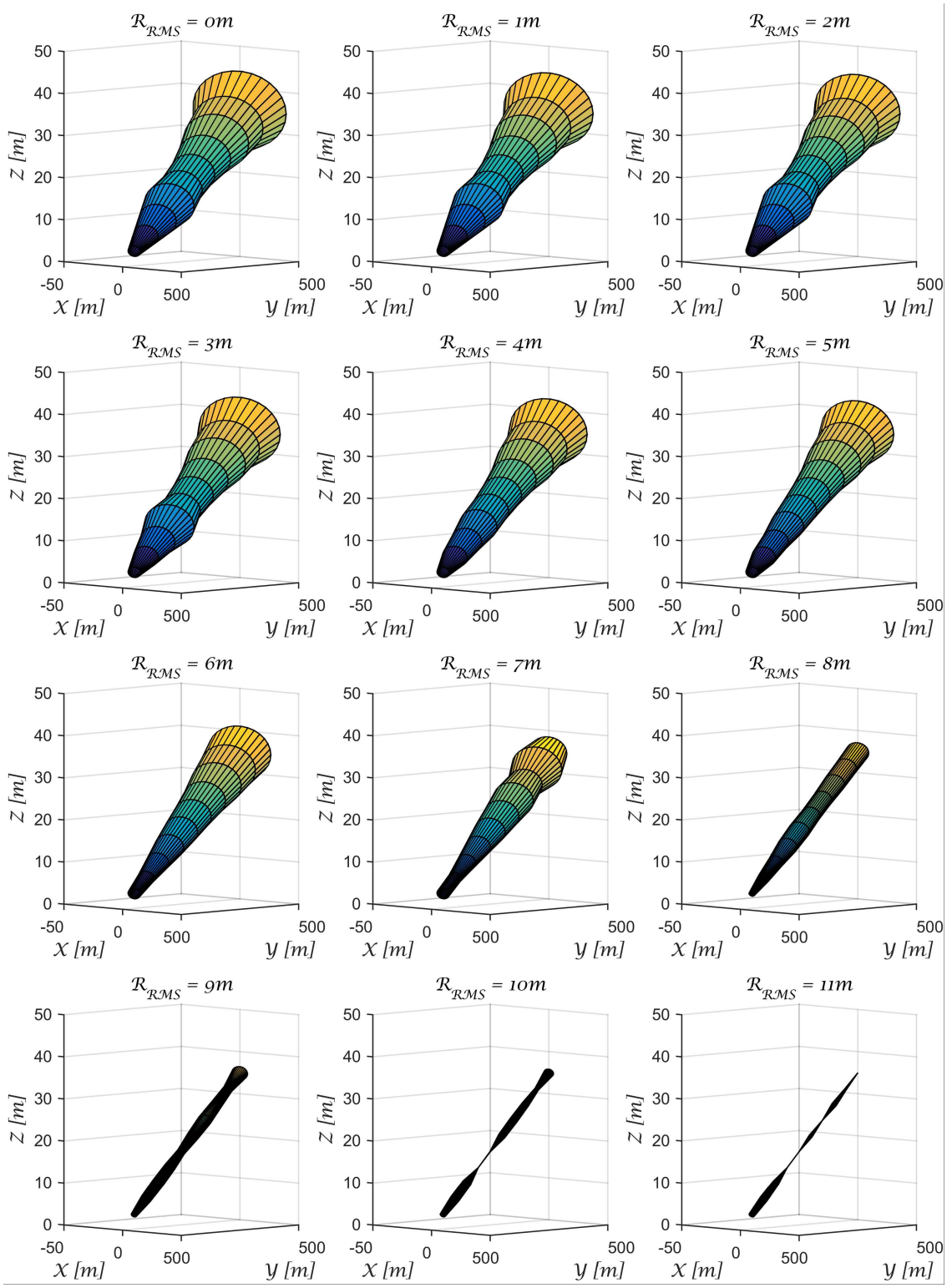


Figure 9. Wave-off boundaries generated by artificial neural network.

Ⅳ. 결 론

본 연구에서는 함상 자동착륙 상황에서 착함 위험도를 평가할 수 있는 기법을 제안하였다. 위험도 평가기법 Ⅰ에서는 수직/수평 경로오차와 경로오차의 RMS 값을 입력으로 사용하였고, 위험도 평가기법 Ⅱ에서는 입력 중 수직/수평 경로오차를 타원의 scale factor로 대체하여 불필요한 복잡성을 제거하고 위험도 평가성능을 개선하였다. 제안된 구조의 인공신경망이 위험도를 적절히 평가하는지 확인하기 위하여 몬테 카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 얻어진 에피소드들을 이용하여 인공신경망을 학습시킨 결과 위험도가 적절히 평가될 수 있음을 확인하였다.

후 기

이 논문은 국토교통부의 「날다 프로젝트」로 지원 되었습니다.

참고문헌

[1] Aviation Electronics Technician 1 (Organizational), Technical Report, U.S. Navy Naval Education and Training Command NAVEDTRA 14030, June 1993.

[2] NATOPS Landing Signal Officier Manual, Technical Report, U.S. Navy Naval Air Systems Command NAVAIR 00-80T-104, December 2001.

[3] Richards, R. A., “Application of Multiple Artificial Intelligence Techniques for an Aircraft Carrier Landing Decision Support Tool,” 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Honolulu, HI, May 2002.

[4] Lee, J., Lee, S., Lee, S., Kim, Y., Park J., Kim, S., and Suk, J., “Stochastic Risk Evaluation Scheme for Wave-off Decision Making in Automatic Aircraft Carrier Landing,” 2015 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, Cairns, Australia, November 2015.

[5] Zhu, Q. D., Li, H., Yu, M. Z., Zhang, Z., and Jiang, X. W., “Landing Risk Evaluation of Carrier-Based Aircraft Based on BP Neural Network,” 2012 2nd International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, Harbin, Heilongjiang, China, December 2012.

[6] Jiang, H. T., Su, X. D., and Li, H., “Ramp-Strike Risk Evaluation Making of Carrier-Based Aircraft,” International Journal of Control and Automation, Vol. 7, No. 10, 2014, pp. 321 – 330.

[7] Johnstone, R. B., “Development of the Waveoff Decision Device,” Journal of Aircraft, Vol. 6, No. 4, 1969, pp. 367 – 371.