

PSO/SQP를 이용한 제어기 이득 자동 추출

이장호*, 유 혁**, 민병문***

Automated Control Gain Determination Using PSO/SQP Algorithm

Jang-Ho Lee*, Hyeok Ryu**, Byoung-Moom Min***

Abstract

To design flight control law of an unmanned aerial vehicle, automated control gain determination program was developed. The procedure for determination of control gain was formulated as the control gains were designed from the optimal solutions of the optimization problem. PSO algorithm, which is one of the evolutionary computation method, and SQP algorithm, which is one of the nonlinear programming method, are used as optimization problem solver. Thru this technique, computation time required for finding the optimal solution is decreased to 1/5 of that of PSO algorithm and more accurate optimal solution is obtained.

초 록

무인항공기의 비행제어법칙 설계를 위하여 자동 제어기 이득 결정 프로그램을 개발하였다. 제어기 이득 결정 문제를 최적화 문제로 정식화 하고, 최적화 문제의 최적해로부터 제어기 이득을 결정하였다. 최적화 문제의 해를 계산하기 위해 진화연산기법의 하나인 PSO 알고리즘과 비선형 프로그래밍의 하나인 SQP 알고리즘을 연결하여 사용하였다. 이 방법을 통하여 최적해 계산 시간을 PSO 방법에 비하여 1/5로 감소시켰으며, 보다 정확한 최적해를 계산할 수 있었다.

키워드 : 진화연산(evolutionary computation), PSO 알고리즘(PSO algorithm), SQP 알고리즘(SQP algorithm), 틸트로터(tilt-rotor)

1. 서 론

틸트로터 항공기의 비행제어법칙 설계를 위해서는 많은 설계점에 대한 설계가 필요하다. 틸트

로터 항공기는 헬리콥터, 친이, 고정익 모드의 3가지의 비행모드가 있으며, 비행모드마다 항공기 형상이 변화되어 서로 다른 비행특성을 나타낸다. 이는 비행제어법칙 설계를 위해 비행모드마다 다른 제어기를 사용하여야 함을 의미한다. 또

접수일(2007년 12월 14일), 수정일(1차 : 2008년 6월 5일, 2차 : 2008년 6월 17일, 게재확정일 : 2008년 7월 1일)

* 첨단비행제어팀/jh7677@kari.re.kr

** 엔진팀/hryu@kari.re.kr

*** 한국과학기술원/bmmin@fdcl.kaist.ac.kr

한 동일 비행모드에서 여러 비행속도에 대해 제어를 설계해야 하며, 1개 비행속도에 대해서도 3축 방향의 제어를 설계하여야 하므로, 제어 설계점의 수가 많아지게 된다.

많은 제어 설계점과 더불어, 제어가 만족하여야 하는 다수의 제어설계 요구사항과 항공기 동특성 제한 사항은 제어기 이득 결정을 매우 어렵게 한다. 따라서 제어기 설계를 원활히 수행하기 위해서는 제어기 이득을 자동으로 결정하는 프로그램이 필요하게 된다.

제어기 이득을 자동으로 선정하기 위해 제어기 설계 문제를 최적화 문제로 정식화하고, 최적화 문제의 해로부터 제어기 이득을 결정하는 방법이 많이 연구되어 왔다[1]. 이러한 방식에 기반을 둔 제어 설계 자동화 프로그램에서는 다수의 제어사항을 충족할 수 있게 하는 성능지수(performance index) 선정과 최적해를 효과적으로 얻을 수 있는 방법의 개발이 매우 중요하다. 성능지수의 선정은 제어설계 항공기의 제어 사양 및 항공기 동특성 제한 등에 밀접하게 관계되며, 제어설계 과정을 통하여 제어설계문제에 최적인 성능지수를 결정하게 된다.

최적화 문제의 최적해를 효과적으로 얻기 위하여 비선형 프로그래밍이나 진화연산기법(evolutionary computation technique)들이 적용되어 왔다[2]. 비선형 프로그래밍 방법은 적절한 초기치가 주어지면 진화연산 방법에 비하여 빠른 시간에 최적해를 계산할 수 있다. 그러나 초기치가 잘못 선정되는 경우 국부 최적해로 수렴하게 된다. 진화연산 기법은 초기치 선정에 대한 어려움이 거의 없으나, 최적해 계산시간이 비선형 프로그래밍 보다 많이 소요된다.

본 논문에서는 비선형 프로그래밍과 진화연산 기법을 효과적으로 결합하여 초기치 문제와 계산시간 문제를 해결할 수 있는 방법을 제시하고, 이 방법의 특성을 계산 결과를 통하여 분석하였다. 2장에서는 제어기득 자동추출 방법을 설명하고, 3장에서는 PSO/SQP 알고리즘의 구조를 기술하였으며, 4장에서는 제안된 방법의 특성 분석 결과를 제시하였다.

2. 제어기 이득 자동추출 알고리즘

제어기득 자동추출의 목표는 제어기의 구조와 요구사항이 주어져 있을 때 요구사항을 충족하는 제어기 이득을 자동으로 결정하는 것이다. 제어기 이득을 자동으로 결정하는 방법으로 여러 가지 방법들이 연구되어 왔으며, 본 연구에서는 제어기 이득 자동결정 문제를 최적화문제로 정식화하고, 최적해를 이용하여 제어기 파라미터를 결정하는 방법을 사용하였다.

최적화 기반 제어기득 자동추출 과정은 그림 1과 같이 설명할 수 있다. 먼저 주어진 제어기 구조와 설계사항으로부터 성능지수와 구속조건을 정의하여 최적화 문제를 구성한다. 이때 성능지수는 최적해에 직접적으로 영향을 주며, 항공기의 동특성 및 설계사항과 많은 관련이 있으므로, 각 설계 문제마다 최적인 형태를 제어설계 과정을 통하여 결정할 수 있다.

최적화문제가 구성되면 최적해를 수치해법을 이용하여 계산하고, 이를 이용하여 제어기 이득을 결정한다. 이렇게 결정된 제어기득은 설계사항이 충족되는지와 유사설계점의 제어기득과 유사한지를 검증한다. 만일 요구사항이 충족되지 않거나 유사설계점의 제어기득과 큰 차이가 발생하면 성능지수나 구속조건을 변경하여 제어기득을 다시 결정하여야 한다. 이러한 방법을 통하여 적절한 제어기 이득을 찾을 수 없는 경우에는 설계사항의 수정을 고려하여야 한다.

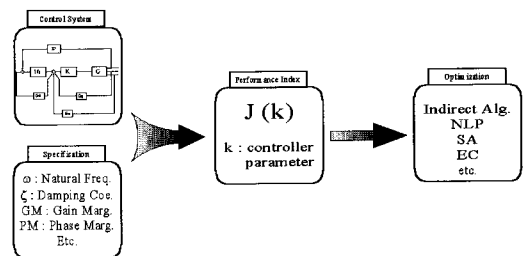


그림 1. 최적화를 이용한 제어기득 자동결정 과정

3. PSO/SQP 기반 제어이득 자동추출 프로그램 구조

3.1 PSO 기반 제어설계 프로그램의 특성

제어이득 결정을 위한 최적화 문제가 구성되면 최적해를 계산하여야 한다. 최적해를 계산하는 방법으로는 진화연산 기법과 비선형프로그래밍 기법을 사용할 수 있다. 참고문헌 [3]에서는 최적해 계산 방법으로 진화연산 기법 중의 하나인 PSO(Particle Swarm Optimization) 알고리즘을 사용하는 연구 결과를 제시하였다. 이 방법에서는 PSO 알고리즘을 사용하여 최적해를 계산하였으며, 종료조건으로 프로그램 종료 세대수(본 논문에서는 300세대)를 사용하였다. 이 경우 각 세대의 개체수가 30개이므로, 제어이득 결정을 위한 성능지수 계산횟수는 9,000번이 되었다.

틸트로터 무인항공기의 피치각 유지 제어기 설계 문제에 이 방법을 적용한 결과 계산시간은 30분정도가 소요되었다. 동일 조건에 대하여 계산을 반복하였을 때 세대수에 따른 성능지수(Cost)의 변화를 그려보면 그림 2와 같다.

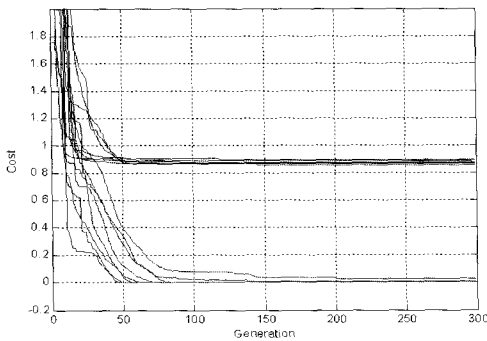


그림 2. PSO 알고리즘 적용시 성능지수 변화

반복계산에서 얻어진 최적해는 그림 3과 같으며, 2가지 부류의 해가 얻어졌음을 알 수 있다. 그림 2의 성능 지수 변화에서 성능지수 최소치가 2부류로 나누어져 있음을 알 수 있으며, 이는 최적해가 2개 부류로 나누어지는 것과 일치함을 알

수 있다.

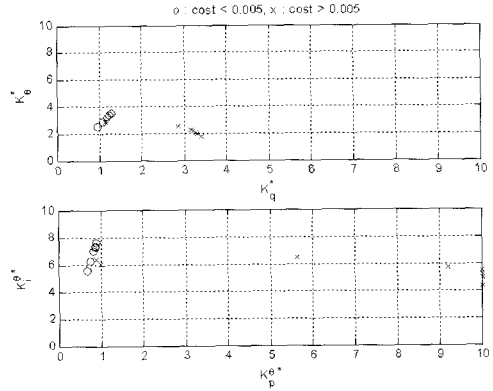
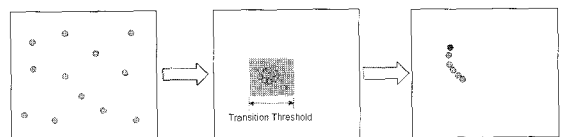


그림 3. PSO 알고리즘 적용시 이득분포

PSO 기반 프로그램이 최적해를 찾는 과정을 살펴보면, 최적 성능지수 값과 유사한 성능지수 값이 100세대 이내에서 확보됨을 알 수 있다. 이후 세대에서는 최적해를 조금씩 개선하는 과정이 진행되며, 이 과정에서 계산시간이 많이 소요됨을 알 수 있다.

3.2 PSO/SQP 기반 제어설계 프로그램 구조

PSO/SQP 알고리즘에서는 PSO 알고리즘과 SQP(Sequential Quadratic Programming) 알고리즘을 결합하여 사용한다. 이 방법에서는 PSO 알고리즘을 사용하여 계산된 해들이 일정 범위(Transition Threshold) 안에 들어오게 되면, 최적해 계산 방법을 SQP 알고리즘으로 천이한다. SQP 알고리즘의 초기치는 PSO 알고리즘의 개체 중에서 성능지수가 가장 작은 개체의 이득을 이용한다.



(a) PSO 초기치 (b) PSO 계산과정 (c) SQP 적용

그림 4. PSO/SQP 알고리즘 기반 방법의 계산과정

PSO 알고리즘의 특성상 2~3개의 개체가 탐험(exploration)을 위해 일정범위 내로 들어오지 않는 경우가 발생하며, 이러한 경우 SQP로 전환이 이루어지지 않는 경우가 자주 발생하게 된다. 이를 위하여 전체 개체수의 일정 비율에 해당하는 개체수(예, 전체 개체수의 80%)가 일정범위 내에 들어오면 SQP 알고리즘으로 전환하는 방법을 사용하였다.

4. 제어설계 프로그램 특성분석

4.1 특성 분석 방법

프로그램의 특성 분석을 위하여 PSO/SQP 기반 프로그램을 틸트로터 무인항공기의 피치각 유지제어설계에 적용하였다. 최적해 계산을 위한 제어기 이득 범위는 0~10으로 하였으며, Transition Threshold 값을 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0으로 변화시켜가며 최적해를 계산하였다. PSO 알고리즘에서 랜덤변수를 사용하므로, 통계적 특성 분석을 위해 각 Transition Threshold 값에 대해 20번씩 반복 계산을 하였다. 여기서 Transition Threshold가 0.1 이하 함은 PSO 계산을 통하여 계산된 해의 분포가 0.1 이내인 경우에 SQP 알고리즘으로 천이하는 것을 의미한다.

4.2 계산결과 분석

분석 프로그램의 계산시간 비교를 위하여 성능지수를 몇 번 계산했는지를 나타내는 성능지수 계산회수를 사용하였다. 각 Transition Threshold에 대해 20번 반복 계산 결과에서 얻어진 성능지수 계산회수와 최적해의 성능지수 값을 나타내면 그림 5와 같다. PSO가 랜덤변수를 사용하므로, 이 결과가 프로그램의 일반적인 특성을 나타낸다고는 할 수 없으나, 프로그램의 특성을 나타내는 경향 정보를 제공하므로, 프로그램 특성분석에 사용하였다.

그림 5에서 가로축은 Transition Threshold 값을 나타낸다. 상단 그림의 세로축은 20번 반복계산에서 최적해 도달 때까지의 성능지수 계산회수의 평균치와 계산회수 분포를 나타낸다. 이 그림에서 Transition Threshold가 증가함에 따라 성능지수 계산회수가 감소함을 알 수 있다. 이는 SQP로 빨리 천이할수록 성능지수 계산회수가 감소함을 나타낸다. 다만 계산회수의 분포를 볼 때 Transition Threshold가 증가한다고 해서 언제나 성능지수 계산회수가 감소하는 것은 아님을 알 수 있다. 이는 PSO 알고리즘의 랜덤 특성 때문에 나타나는 현상이다.

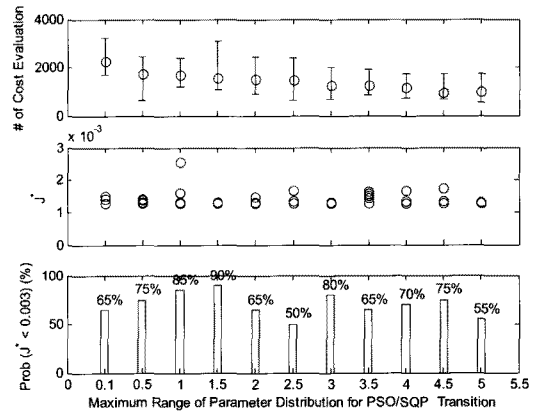


그림 5. Transition Threshold에 따른 성능지수

그림 5의 중간그림의 세로축은 최적 성능지수 값 중 0.003보다 적은 성능지수를 나타내며, 하단 그림은 최적 성능지수 값이 0.003보다 작은 경우의 수를 비율로 나타낸 것이다. 중간 그림에서 알 수 있듯이 최적 성능지수 값은 0.001 정도임을 알 수 있다. 하단의 그림에서 모든 Transition Threshold에서 최적 성능지수 값이 0.003이하인 경우가 50% 이상 얻어졌음을 알 수 있다. 이 결과만을 고려하면 Transition Threshold가 1.5인 경우가 제일 좋은 결과를 주는 것으로 생각되나, 통계치 계산을 위한 시험 회수가 20회이어서 통계적 의미를 부여하기는 무리가 있는 것으로 판단된다.

Transition Threshold를 0.1로 한 경우 20번 반복계산의 각 경우에 대한 최종 성능지수, 천이시 PSO 세대수, 성능지수 계산회수를 표시하면 그림 6과 같다. 그림 7은 최적해로부터 계산된 제어기득 분포를 나타낸다.

그림 6의 최종 성능지수 값을 살펴보면 PSO 과정을 통하여 성능지수 값이 이미 최적 성능지수 값 근처로 감소되어 있음을 알 수 있다. 그리고 PSO에서 SQP로의 천이 후에 성능지수 값이 최적 성능지수 값으로 감소됨을 알 수 있다. 다만 최적해가 국부해로 수렴한 경우에는 성능지수 값이 최적 값보다 큰 값으로 수렴함을 알 수 있다.

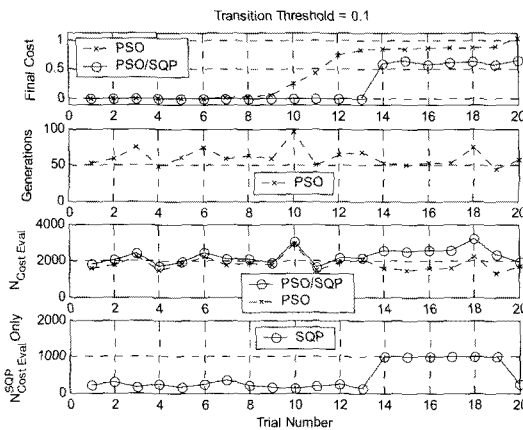


그림 6. Transition Threshold가 0.1인 경우 최적 성능지수

그림 6의 두 번째 그림은 PSO에서 SQP로 천이가 발생하는 세대수를 나타내며, 대부분의 경우 50~100세대에서 천이가 발생함을 알 수 있다. 천이 발생시점은 최종해의 최적해 수렴과는 관련이 없는 것을 알 수 있으며, 이는 천이가 PSO 알고리즘에 의해 세대수에 따라 해들이 모이게 되는 것에 의해 결정되기 때문이다.

성능지수 계산회수를 나타내는 그림 6의 3번째와 4번째 그림을 살펴보면 전체 성능지수 계산회수는 PSO 알고리즘에 의한 계산회수에 지배됨을 알 수 있다. 다만 국부 최적해에 수렴한 경우에는 SQP 알고리즘에 의한 계산회수가 SQP의

최대 반복수 제한치인 1,000번이 되며, SQP 계산회수가 상당한 부분을 차지함을 알 수 있다. 그림 7에서 수렴된 해를 살펴보면 수렴된 해가 최적해에 수렴한 경우에는 천이시점에서 PSO에 의해 얻어진 해가 최적해와 유사함을 알 수 있다. 그리고 SQP 과정에서 500번 이내의 성능지수 계산을 통하여 최적해로 빠르게 수렴됨을 알 수 있다. 이는 PSO를 통하여 적절한 초기치가 확보되면, SQP를 통해 신속하게 최적해를 도달할 수 있음을 의미한다.

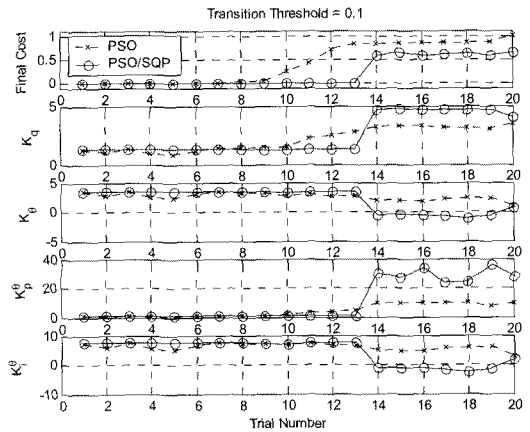


그림 7. Transition Threshold가 0.1인 경우 제어기득 분포

그림 8은 천이시 PSO의 해와 PSO/SQP에 의한 해의 분포와 두가지 해의 연관관계를 나타내고 있다. PSO에 의해 얻어진 해에서 일부해는 최적해로 수렴하고, 일부해는 국부 최적해로 수렴함을 알 수 있다. 이 그림에서 최적해와 국부 최적해로 수렴하는 경계가 존재함을 알 수 있다. 특히 최적해로 수렴한 경우에는 유사한 위치에 최종해가 분포하나, 국부해로 수렴되는 경우에는 수렴해가 넓게 분포함을 알 수 있다. 이는 국부해로 수렴하는 경우 대부분 SQP 알고리즘의 최대 반복제한수에 의해 프로그램이 종료되었기 때문이다.

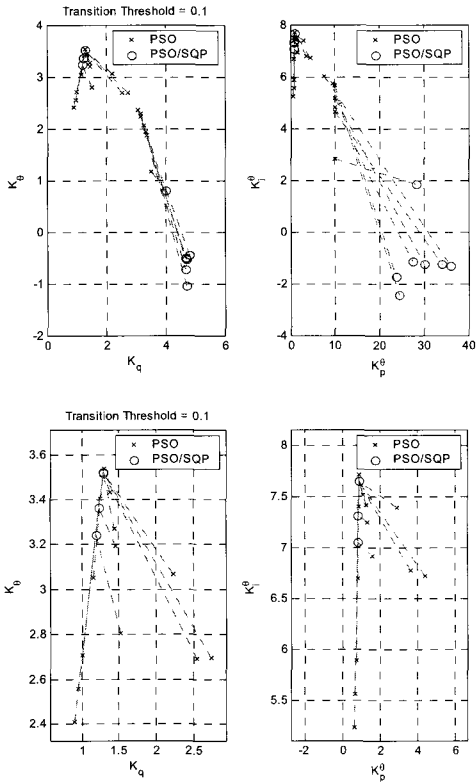
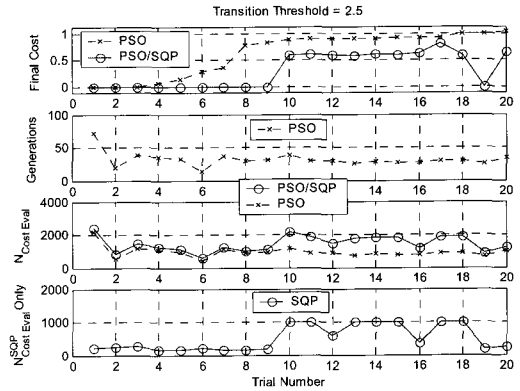


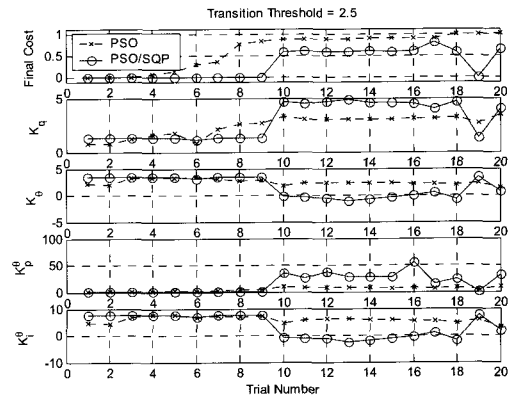
그림 8. Transition Threshold가 0.1인 경우 PSO 수렴해와 PSO/SQP 과정의 최적해 분포

그림 9에서 그림 12는 Transition Threshold가 2.5와 5.0인 경우에 대한 최적해 성능지수 값, 천이 시 PSO 세대수, 성능지수 계산회수와 제어이득의 분포 및 PSO 수렴해와 PSO/SQP 과정의 최적해를 나타내고 있다.

이 결과로부터 Transition Threshold가 증가함에 따라 천이 시 PSO 세대수가 점차 감소하고 있음을 알 수 있으며, 또한 PSO에서 계산된 해의 성능지수가 최적 성능지수의 차이가 증가하고 있음을 알 수 있다. 이 경우에도 SQP 과정을 통하여 최적해로 수렴하며, 이를 위해 요구되는 성능지수 계산회수는 Transition Threshold가 0.1인 경우와 유사함을 알 수 있다. 결과적으로 수렴해 계산을 위해 사용된 성능지수 계산수가 Transition Threshold 증가에 따라 점차 감소하고 있음을 알 수 있다.



(a) 최적 성능지수, 천이 시 PSO 알고리즘 세대수, 성능지수 계산회수의 분포



(b) 제어이득 분포

그림 9. Transition Threshold가 2.5인 경우

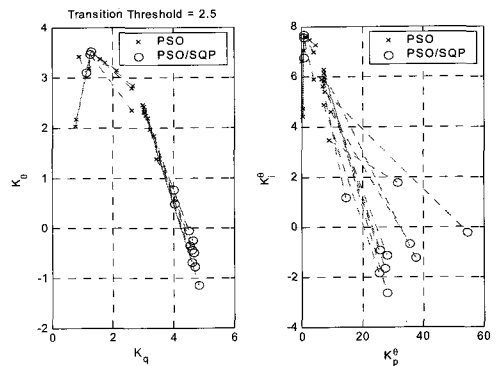


그림 10. Transition Threshold가 2.5인 경우 PSO 수렴해와 PSO/SQP 과정의 최적해

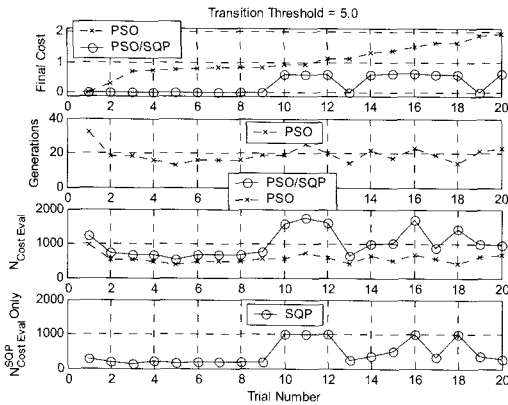
5. 결 론

무인항공기의 비행제어법칙 설계를 위한 제어기 이득 자동추출 프로그램을 개발하였다. 제어기 이득 추출 문제를 최적화 문제로 정식화하여 최적해로부터 제어 이득을 결정하였다. 최적화 방법으로 진화연산 기법의 하나인 PSO 알고리즘과 비선형 프로그래밍의 하나인 SQP를 결합하여 사용하였다. 이 방법을 통하여 기존의 PSO 알고리즘을 사용하는 방법에 비하여 계산시간을 1/5로 줄일 수 있었으며, 더 정확한 최적해를 구할 수 있었다. 또한, PSO/SQP 알고리즘을 통하여 얻은 제어이득을 축소형 틸트로터 항공기에 적용하여 비행시험을 수행함으로써 성능을 검증하고 있다.

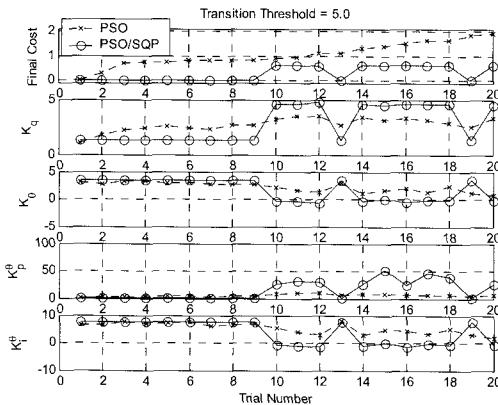
PSO/SQP 방법을 통하여 PSO 방법보다 계산시간을 크게 줄일 수 있었지만, 최적해를 계산하기 위해서는 반복적인 계산이 필요함을 알 수 있었다. 향후 이러한 국부 최적해로 수렴하는 문제를 해결할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Mark B. Tischler et. al., "A Multidisciplinary Flight Control Development Environment and Its Application to a Helicopter," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 19, No. 4, pp. 22-33, August 1999.
2. 류혁, 탁민제, "파라미터 최적화기법을 이용한 항공기 제어설계 자동화," *한국항공우주학회지*, 26권 1호, pp. 111-119, 1998년 2월.
3. 민병문, 이장호, 유혁, 김응태, "스마트무인기의 제어설계 자동화 프로그램 개발," 2006년 한국항공우주학회 춘계학술발표회 논문집, 현대성우리조트, pp. 278-282, 2006.



(a) 최적 성능지수, 천이시 PSO 알고리즘 세대수, 성능지수 계산회수의 분포



(b) 제어이득 분포

그림 11. Transition Threshold가 5.0인 경우

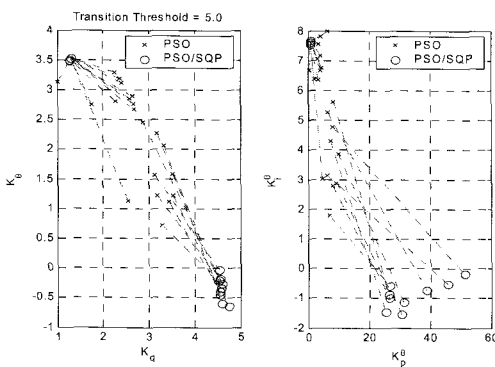


그림 12. Transition Threshold가 5.0인 경우 PSO 수렴해와 PSO/SQP 과정의 최적해