

# Financial Engineering and Computations

## Monte Carlo Methods for Option Pricing

Dai, Tian-Shyr

## 課程大綱

- 亂數建立及應用
- 用蒙地卡羅法評價陽春選擇權
- 用蒙地卡羅法評價亞式選擇權
- Quasi-Monte Carlo Simulation
- 蒙地卡羅法的改進方法
  - Antithetic variates、Control Variant
- 高維度的蒙地卡羅法

## 亂數定義

- 亂數是一個隨機產生的數字,廣泛的應用在電腦程式中
  - 例如電腦遊戲: 麻將,撲克牌
- 透過亂數所服從的分配,可了解亂數的特性
  - 例如當標的物的價格服從對數常態分配

$$S(t) = S(0)e^{(r - \frac{1}{2}\sigma^2)t + \sigma\sqrt{t}\varepsilon} \quad \varepsilon \sim N(0,1)$$

- C語言提供函式產生亂數
  - rand() $\Rightarrow$  ~Uniform(0,RAND\_MAX)
  - #include<stdlib.h>

## 產生不同的亂數序列

- 設定亂數的起始點
  - srand();
  - 起始點不同,就會產生不同的亂數序列
  - 爲了確保每次都有不同的亂數
    - 使用系統時間
    - #include<stdlib.h>

## 範例程式

參照RandomNumber Project

```
#include <stdlib.h>
#include <stdio.h>
#include <time.h>

void main( void )
{
    int i;
    //使用系統時間產生亂數序列
    srand( (unsigned)time( NULL ) );
    for( i = 0; i < 10;i++)
    {
        printf( " %d\n", rand() );
    }
}
```

如將本行移除,則每次產生的亂數序列都會相同

列印亂數

## 常態分配隨機變數建立

- 做財務模擬程式經常需要常態隨機變數

$$S(T) = S(0)e^{(r-\frac{1}{2}\sigma^2)T+\sigma\sqrt{T}\epsilon}$$

- 常態分配變數可用下列方式逼近
  - 使用RAND()產生 0~1 的 uniformly distributed 的隨機變數
  - 假定產生的變數為 $W_i$   $E(W_i) = 0.5$ ,  $\text{Var}(W_i) = \frac{1}{12}$
  - 根據中央極限定理:  $\sum_{i=1}^{12} W_i - 6 \sim N(0,1)$

程式範例:

```
double Normal=0;
for(int j=0;j<12;j++)
{
    Normal=Normal+double(rand())/RAND_MAX;
}
Normal=Normal-6;
```

## 課堂演練

- 更改上述程式,輸入M和V,製造平均為M且變異數為V的常態隨機變數

## Homework

- 課本第九章習題4、5

# 蒙地卡羅法

- 標的物價格表示:  $S(T) = S(0)e^{(r-\frac{1}{2}\sigma^2)T+\sigma\sqrt{T}\varepsilon}$
- 已知  $\varepsilon \sim N(0,1)$ , 該隨機變數可用電腦模擬, 計算出標的物在到期日的價格
- 以一買權為例, 用蒙地卡羅法模擬到期日 **payoff** 可表示如下:

$$\left( S(0)e^{(r-\frac{1}{2}\sigma^2)T+\sigma\sqrt{T}\varepsilon_i} - X \right)^+ \equiv V_i$$

- Value =  $e^{-rT} E_Q(\text{Payoff}) = e^{-rT} E_Q(V_i)$

# 蒙地卡羅法

- 定義  $\text{Var}(V_i) = U$

$$P_n = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n}$$

$$E_Q(\text{Payoff}) = E_Q(P_n)$$

$$\text{Var}(P_n) = \frac{nU}{n^2} = \frac{U}{n}$$

- 當計算次數夠多時, 蒙地卡羅法收斂至正確值

## 蒙地卡羅法 陽春買權的評價

- 買權的到期日 **payoff** 為

$$(S(T) - X)^+ = (S(0)e^{(r-\frac{1}{2}\sigma^2)T+\sigma\sqrt{T}\varepsilon} - X)^+$$

- 買權的價格估計如下:

$$e^{-rT} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S(T, i) - X)^+ \rightarrow e^{-rT} E(S(T) - X)^+$$

- 程式設計如下:

- 輸入相關參數
- 建立一個副函式計算常態隨機變數
- 隨機產生標的物到期日的價格, 並計算選擇權的報酬
- 計算報酬的平均值

### 參照 Monte Carlo Project

#### 副程式

```
double Max(double a, double b)
{
    if(a > b) return a;
    else return b;
}

double Normal()
{
    double N=0;
    for(int j=0; j<12; j++)
    {
        N=N+double(rand())/RAND_MAX;
    }
    N=N-6;
    return N;
}
```

模擬 n 次, 計算  
每一次 payoff

Standard Error 的計算

```
//輸入資料
float S, T, X, r, Sigma;
int n;
printf("輸入標的物價格:");
scanf("%f", &S);
printf("輸入到期日:");
scanf("%f", &T);
printf("輸入履約價格:");
scanf("%f", &X);
printf("輸入無風險利率:");
scanf("%f", &r);
printf("輸入標的物價格波動率:");
scanf("%f", &Sigma);
printf("輸入模擬的次數:");
scanf("%d", &n);
//蒙地卡羅模擬
srand( (unsigned)time( NULL ) );
double OptionValue=0;
double SquareSum=0;
for(int i=0; i<n; i++)
{
    double N=Normal();
    double ST=S*exp((r-Sigma*Sigma/2)*T+Sigma*sqrt(T)*N);
    double Payoff=exp(-r*T)*Max(ST-X, 0);
    OptionValue=OptionValue+Payoff;
    SquareSum=SquareSum+pow(Payoff, 2);
}
OptionValue=OptionValue/n;
double STDERR=sqrt((SquareSum/n-pow(OptionValue, 2))/(n-1));
printf("Value=%f, Standard Err~%f", OptionValue, STDERR);
```

#### 主程式

## 課堂練習

- 修改上述程式,計算賣權的價值
  - 賣權的payoff:  $(X - S(T))^+ = (X - S(0)e^{(r - \frac{1}{2}\sigma^2)T + \sigma\sqrt{T}e})^+$

## 使用Put-Call Parity評價賣權

- 考慮買權和賣權到期日的payoff:
  - 買權:  $(S(T) - X)^+$  賣權:  $(X - S(T))^+$
- 如果買一個買權,賣一個賣權,到期日payoff
  - $(S(T) - X)^+ - (X - S(T))^+ = S(T) - X$
  - 其 payoff相當於期初借  $Xe^{-rT}$ ,並購買標的物
- 在無套利的假定之下,假定C,P為買權和賣權的價格,可得  $C - P = S(0) - Xe^{-rT}$

## 課堂練習

- 用蒙地卡羅法所得的買權和賣權的價格,驗證put-call parity

$$C - P = e^{-rT} \sum_{1 \leq i \leq n} S(T, i) / n - Xe^{-rT}$$

- 比較使用Monte Carlo Methods和put-call parity計算出的賣權的價值
  - 程式驗證:如何擔保程式碼以及概念推導過程正確(可參考課本C++財務程式設計 pp.9-12. )

## 亞式選擇權

- 亞式選擇權的payoff和標的物的平均價格有關
  - 假定一個標的物的價格在一段時間內的價格為  $S(0), S(1), S(2), S(3), \dots, S(m)$
  - 標的物的平均價格  $A = \frac{S(0) + S(1) + S(2) + \dots + S(m)}{m+1}$
- 以一個亞式買權為例,到期日的payoff可寫成  $(A - X)^+$
- 亞式選擇權的用途
  - 防止標的物的價格被操縱
  - 規避和平均價格有關的風險

## 用蒙地卡羅法評價亞式選擇權

- 標的物的價格隨機過程滿足:

$$S(t) = S(t-1)e^{(r - \frac{1}{2}\sigma^2)T/m + \sigma\sqrt{T/m}\epsilon_t}$$

- 時間 $t$ 的價格,可用時間 $t-1$ 的價格和常態隨機變數  $\epsilon_t$  構成
- 產生  $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_m$  共 $m$ 個常態隨機變數,利用這些變數產生價格路徑 $S(0), S(1) \dots S(m)$
- 求出該價格路徑平均值=> 求出選擇權報酬
- 模擬 $n$ 條路徑,並求報酬的平均值

## 核心程式碼

參照AsianOption Project

```
//蒙地卡羅模擬
srand( (unsigned)time( NULL ) );
double OptionValue=0;
double SquareSum=0;
double DT=T/m;
for(int i=0;i<n;i++)
{
    double ST=S;
    double Sum=ST;
    for(int j=1;j<=m;j++)
    {
        double N=Normal();
        ST=ST*exp((r-Sigma*Sigma/2)*DT+Sigma*sqrt(DT)*N);
        Sum=Sum+ST;
    }
    double Avg=Sum/(m+1);
    double Payoff=exp(-r*T)*Max(Avg-X,0);
    OptionValue=OptionValue+Payoff;
    SquareSum=SquareSum+pow(Payoff,2);
}
OptionValue=OptionValue/n;
double STDERR=sqrt((SquareSum/n-pow(OptionValue,2))/n);
printf("Value=%f, Standard Err=%f",OptionValue,STDERR);
```

模擬 $n$ 條價格路徑

模擬該路徑在每個時間點價格

## 課堂演練

- 用O-notation來估計上述程式的計算複雜度
- 輸入不同的 $n$ ,驗證standard error隨著 $n$ 增大而減小,計算時間隨 $n$ 增大而增加,
  - 驗證當 $n$ 增加10倍時,standard error大概變成原來1/3,計算時間變10倍
- 要求精確的價格所付出的計算代價頗高

## Quasi-Monte Carlo Simulation

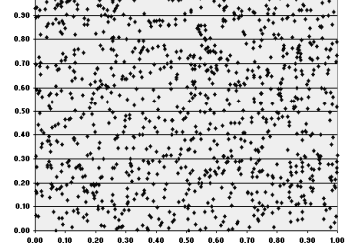
- 蒙地卡羅法有幾個重大缺陷
  - 計算結果是一個隨機變數,
    - 每次計算結果都不相同
    - 當取的隨機變數品質不佳,則計算結果會不正確
  - 收斂速度太慢
    - $O(\frac{1}{\sqrt{n}})$
- Quasi-Monte Carlo simulation採用一些方式改善蒙地卡羅法的缺陷
  - 取的隨機變數品質不佳
  - 收斂速度太慢

# Quasi-Monte Carlo Simulation

GBM

$$S_t = S_{t-1} \exp \left[ \left( r - \frac{\sigma^2}{2} \right) \Delta t + \sigma \sqrt{\Delta t} \varepsilon_t \right]$$

Pseudo Random Numbers

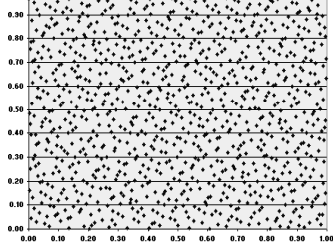


•Rand()

收斂速度

$$O\left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right)$$

Low Discrepancy Sequences



- Halton Sequences
- Faure Sequences
- Sobol Sequences

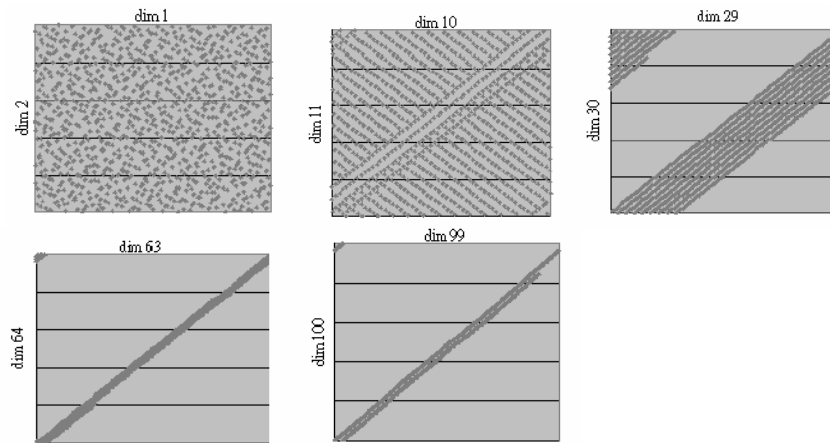
$$O\left(\frac{(\log N)^s}{N}\right)$$

# Low Discrepancy Sequences

## Halton sequence

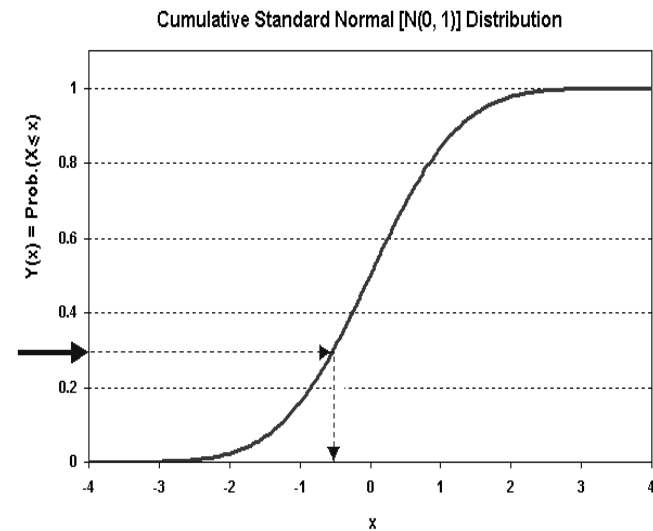
- 每一條 Halton 數列 由一個質數產生
- m1 base=2  $\left( \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{8}, \frac{5}{8}, \frac{3}{8}, \frac{7}{8}, \frac{1}{16}, \dots \right)$
- m2 base=3  $\left( \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{9}, \frac{4}{9}, \frac{7}{9}, \frac{2}{9}, \frac{5}{9}, \frac{8}{9}, \dots \right)$
- m3 base=5  $\left( \frac{1}{5}, \frac{2}{5}, \frac{3}{5}, \frac{4}{5}, \frac{1}{25}, \frac{6}{25}, \frac{11}{25}, \frac{16}{25}, \dots \right)$
- Halton數列的缺點：
  - 數列有循環
  - 數列在每次的循環中單調遞增
  - 若維度高兩數列間呈現高相關性

## Halton sequence Two-Dimensional Projections



若維度高兩數列間呈現高相關性

## 使用轉換函數將均勻分配轉換常態分配



# 產生Halton Sequence和常態隨機變數

```
double ma[MAX_DIM_NUM][1000]; //存放亂數的容器
int dim_times=1000; //每個dimension需要1000個亂數
int dim_num=20; //需要20 dimensions
int step=10; //每個dimension從第10個值開始
double r[MAX_DIM_NUM]; //計算亂數的容器
FILE* Write=fopen("T.txt","w");
halton_ndim_set ( dim_num ); //設定 dimension numbers
halton_step_set ( step ); //設定第幾個值開始
for (int i = 0; i <dim_times; i++)
{
    halton( r ); //產生1~20 dimension 的第10個值
    for(int k=0;k<dim_num;k++) //將產生的亂數向量存入 自己的容器
    {
        r[k]=ltqnorm(r[k]);
        ma[k][i]=r[k];
        fprintf(Write,"%f\t",r[k]);
    }
    fprintf(Write,"\n");
}

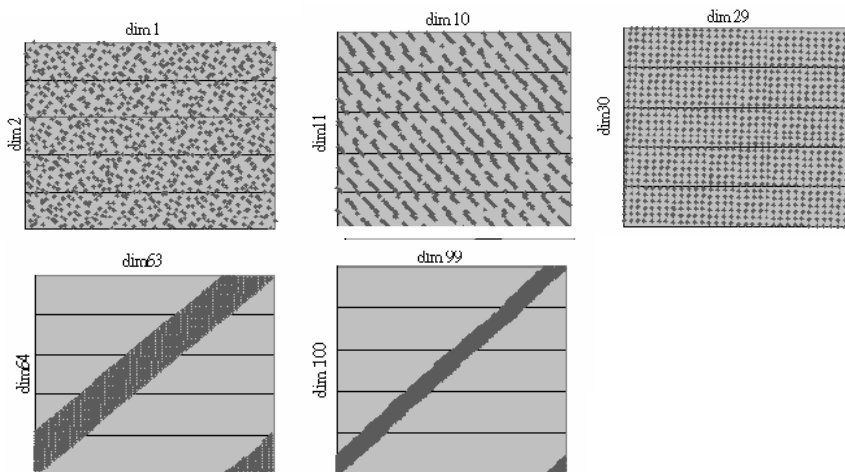
```

請參見 Halton project

# Low Discrepancy Sequences -Faure sequence-

- 每一條 Faure數列 由一同一個質數P產生,而P要大於 維度 M
- m1 base=3  $\left( \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{1}{9}, \frac{4}{9}, \frac{7}{9}, \frac{2}{9}, \frac{5}{9}, \frac{8}{9}, \dots \right)$
- m2 base=3  $\left( \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{4}{9}, \frac{7}{9}, \frac{1}{9}, \frac{8}{9}, \frac{2}{9}, \frac{5}{9}, \dots \right)$
- m3 base=3  $\left( \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, \frac{7}{9}, \frac{1}{9}, \frac{4}{9}, \frac{5}{9}, \frac{8}{9}, \frac{2}{9}, \dots \right)$
- Halton數列的缺點：
  - 數列有循環
  - 若維度高兩數列間呈現高相關性

# Faure sequence Two-Dimensional Projections



若維度高兩數列間呈現高相關性

程式碼請參見  
Faure project

```
double ma[20][1000]; //存放亂數的容器
int dim_times=1000; //每個dimension需要1000個亂數
int dim_num=20; //需要20 dimensions
int seed=-1; //每個dimension從第seed值開始
//if Seed<0.....start (qs)^(4)-1 -->qs means base
//if Seed>0.....start seed
double r[MAX_DIM_NUM]; //計算亂數的容器
FILE* Write=fopen("T.txt","w");
for (int i = 0; i <dim_times; i++)
{
    faure ( dim_num, &seed, r ); //產生1~20 dimension 的第seed個值
    for(int k=0;k<dim_num;k++) //將產生的亂數向量存入 自己的容器
    {
        r[k]=ltqnorm(r[k]);
        ma[k][i]=r[k];
        fprintf(Write,"%f\t",r[k]);
    }
    fprintf(Write,"\n");
}

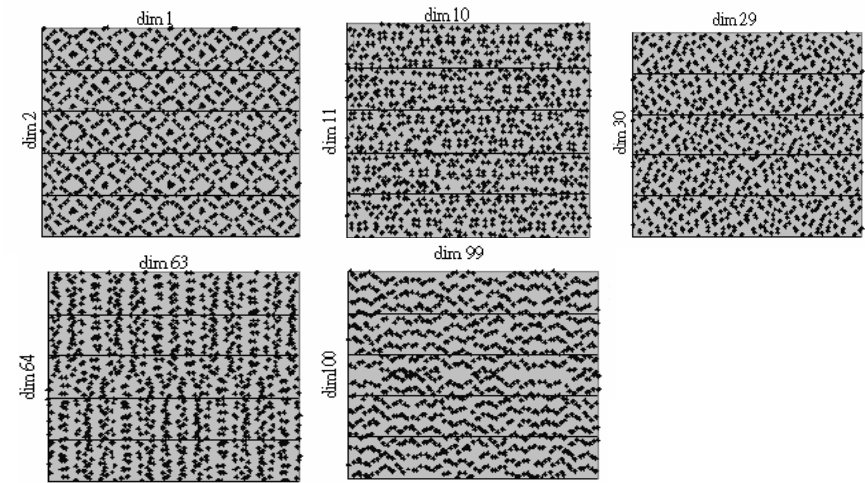
```

## Sobol sequence

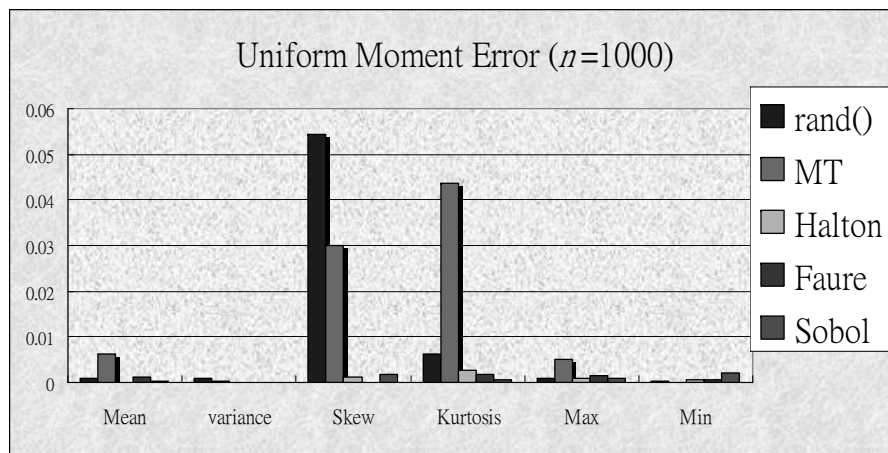
- 每一條 Sobol 數列 由同一個質數2產生
- Dim1 base=2  $\left( \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{8}, \frac{7}{8}, \frac{5}{8}, \frac{1}{8}, \frac{3}{16}, \dots \right)$
- Dim2 base=2  $\left( \frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{8}, \frac{7}{8}, \frac{1}{8}, \frac{5}{8}, \frac{5}{16}, \dots \right)$
- Dim3 base=2  $\left( \frac{1}{2}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{5}{8}, \frac{1}{8}, \frac{3}{8}, \frac{7}{8}, \frac{5}{16}, \dots \right)$

沒有上述兩數列的缺點

## Sobol sequence Two-Dimensional Projections



## 比較均勻特性



## 比較產生亂數所需要的時間

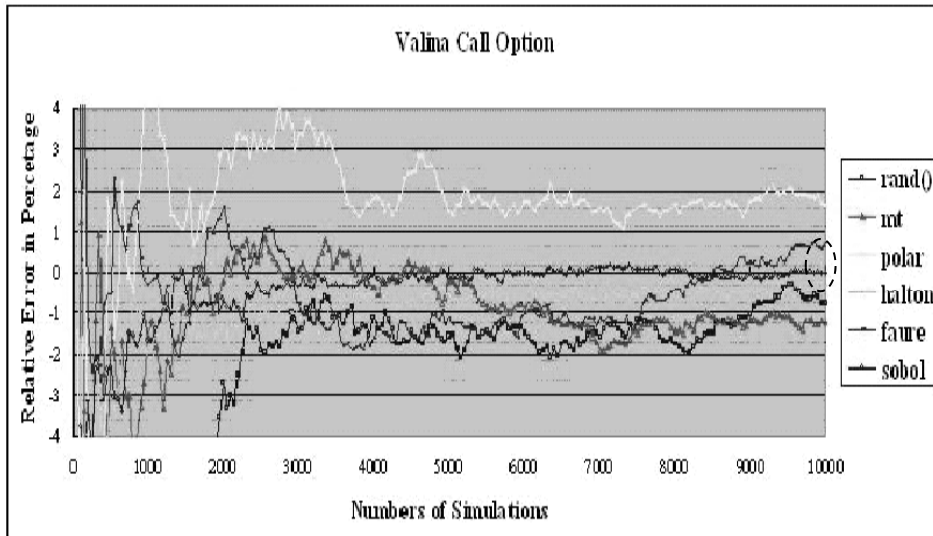
Generation time  $n=100000$   $dimension=20$

Sequence	rand()	MT	Halton	Faure	Sobol
seconds	2.26500	1.53900	2.46900	2.71500	1.21900

- Sobol 數列速度顯著的優於其他數列



- 以計算買權價格 比較收斂速度



- QMC 確實比傳統 MC 收斂更快，其中又以Sobol數列最準確

## Summary

- The Sobol sequence can be generated significantly faster than all the other sequences.
- For high-dimensional integrals, Sobol sequences exhibit better convergence properties than either the Faure or the Halton sequences.
- If the dimension is under 100, QMC using Sobol exhibits better convergence than standard MC.

## 課堂演練

QmcAsianOption Project程式已使用sobol數列，評價亞式選擇權

- 參數:
  - (標的物價格)S=100,
  - (履約價格)X=100,
  - (無風險利率)r=0.1,
  - (波動率)sigma=0.3,
  - (到期日)T=1,
  - (Sample次數)m=52,
  - (模擬價格路徑數)n=1000
- 使用傳統蒙地卡羅法的AsianOption Project做比較價格與標準差

## 常見的蒙地卡羅法的改進方法

- Antithetic variates
  - 當產生隨機變數  $\varepsilon$  ,同時產生對應的變數  $-\varepsilon$
  - 以陽春買權評價為例
  - 產生  $(S(T) - X)^+ = (S(0)e^{(r - \frac{1}{2}\sigma^2)T + \sigma\sqrt{T}\varepsilon} - X)^+$
  - 同時算  $(S(T) - X)^+ = (S(0)e^{(r - \frac{1}{2}\sigma^2)T + \sigma\sqrt{T}(-\varepsilon)} - X)^+$
  - 總共會模擬2n條路徑
  - 取的隨機變數的平均值為0 (提高隨機變數品質)
$$\varepsilon + (-\varepsilon) = 0$$

## 課堂演練

- 改寫陽春買權的評價程式,採用**Antithetic variates** 的方法評價

## 使用Control Variant評價亞式選擇權

- **Control Variant**可用來提高蒙地卡羅法的收斂速度
  - 考慮幾何平均選擇權
    - 標的物的幾何平均價格  $G = \sqrt[m+1]{S(0)S(1)S(2)\dots S(m)}$
    - 幾何平均買權的payoff=  $(G - X)^+$
- $$P_A = (A - X)^+; P_G = (G - X)^+$$
- $$V_A = e^{-rT} E(P_A); V_G = e^{-rT} E(P_G)$$
- $$P'_A \equiv P_A + (e^{rT} V_G - P_G) \rightarrow V_A = e^{-rT} E(P'_A)$$
- $$\text{Var}(V_A) = e^{-2rT} \frac{\text{Var}(P_A) + \text{Var}(P_G) - 2\text{Cov}(P_A, P_G)}{n}$$

## 使用Control Variant評價亞式選擇權

- 幾何平均選擇權的價格( $V_G$ )已有公式解
- **Black-Scholes** 處理dividend-yield( $q$ ) 的公式:  
$$\text{SN}\left(\frac{\ln(S/X) + (r - q + \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}}\right) - e^{-rT} \text{XN}\left(\frac{\ln(S/X) + (r - q - \sigma^2/2)T}{\sigma\sqrt{T}}\right)$$
  - Vol:  $\frac{\sigma}{\sqrt{3}}$  dividend yield ( $q$ ):  $\frac{1}{2}(r + \frac{\sigma^2}{6})$
- $P_A$ 和 $P_G$ 有高度正相關,
  - 用 $P'_A$ 來估計 $V_A$ 時,其變異數較小
  - 可以用較少的模擬次數求得精確的價值

## 課堂練習

- 給定幾何平均買權的評價程式
  - 見函式 **GeometricCall()**
  - 請修改蒙地卡羅評價亞式選擇權的程式,改用**control variants** 的方式來計算亞式選擇權的價格
  - 驗證在相同的模擬次數( $n$ )下,變異數縮小

## 高維度的蒙地卡羅法

- 彩虹選擇權的報酬受多種標的物影響
- 假定有k種標的物的價格
$$dS_1 = rdt + \sigma_1 dW_1$$
$$dS_2 = rdt + \sigma_2 dW_2$$

...

$$dS_k = rdt + \sigma_k dW_k$$
- 其中 $w_1, w_2, w_3, \dots, w_k$ 分別代表標準布朗運動  $w_i$  和的相關  $w_j$  係數為  $\rho_{ij}$ 。
- k個標的物價格不獨立，所以無法各自去模擬標的物價格的變化

## 多維常態分配

- 假定常態隨機變數向量 $(a_1, a_2, a_3, \dots, a_k)$
- $a_i$  和  $a_j$  的相關係數可用  $\rho_{ij}$  表示
- 取k個獨立標準常態隨機變數構成的向量w
- 帶入  $a = Bw^T$ 
  - 其中 B 為一k\*k的二維下三角矩陣
  - 令  $\Sigma$  為a的共變異數矩陣  $\Sigma = BB^T$
  - B可用Cholesky分解定理求得

見 C++財務程式設計 pp.9-26.

## 矩陣B元素的決定

- $B(i,j)=0 \quad i < j$ ，
- $B(i,1) = \rho_{i1}$ ，
- $B(i,j) = \frac{\rho_{ij} - \sum_{l=1}^{j-1} B(i,l) \times B(j,l)}{B(j,j)}$ ， if  $j < i$ ，
- $B(j,j) = \sqrt{1 - \sum_{l=1}^{j-1} B(j,l)^2}$ 。
- 利用a 帶入  $S_i(T) = S_i(0)e^{(r-0.5\sigma_i^2)T + \sigma_i \sqrt{T}a_i}$ ，就可以模擬出k種標的物價格變動的連動性

## Variance 計算

$$\begin{aligned} \text{Var}(a_i) &= \text{Var}\left(\sum_{j=1}^{i-1} B(i,j)w_j + \sqrt{1 - \sum_{j=1}^{i-1} (B(i,j))^2} w_i\right) \\ &= \sum_{j=1}^{i-1} B(i,j)^2 \text{Var}(w_j) + \left(1 - \sum_{j=1}^{i-1} B(i,j)^2\right) \text{Var}(w_i) \\ &= \sum_{j=1}^{i-1} B(i,j)^2 + 1 - \sum_{j=1}^{i-1} B(i,j)^2 = 1 \end{aligned}$$

# Covariance 計算

$$\begin{aligned} \frac{Cov(a_i, a_j)}{\sqrt{Var(a_i)Var(a_j)}} &= E((a_i - 0)(a_j - 0)) = E\left(\sum_{l=1}^i B(i, l)w_l \times \sum_{h=1}^j B(j, h)w_h\right) \\ &= \sum_{l=1}^i B(i, l) \times B(j, l) E(w_l^2) = \sum_{l=1}^{i-1} B(i, l) \times B(j, l) + B(i, i) \times B(j, i) \\ \text{Let } i < j & \rightarrow \\ &= \sum_{l=1}^{i-1} B(i, l) \times B(j, l) + B(i, i) \times \frac{\rho_{ij} - \sum_{l=1}^{i-1} B(i, l) \times B(j, l)}{B(i, i)} \\ &= \rho_{ij} \end{aligned}$$

$B(j, i)$

# 程式撰寫

- 程式包含三個部分：請參閱Rainbow project
  - 文字檔(檔名TestData.txt)，包含標的物初始價格，波動率和跟其他標的物價格的相關係數，
  - 利用Cholesky分解定理計算矩陣B
  - 蒙地卡羅程式的主體。

# 文字檔

```
100 110 120 130
0.3 0.4 0.5 0.6
0.5
0.4 0.3
0.5 0.4 0.6
```

- 第一行的四個數字(100, 110, 120 130)代表四個標的物的初始價格，第二行的四個數字(0.3, 0.4, 0.5, 0.6)代表四個標的物的價格波動率，第三行的0.5代表第一個和第二個標的物價格報酬率的相關係數  $\rho_{12}$ ，第四行兩個數字分別代表  $\rho_{13}$ 和  $\rho_{23}$ ，最後一行三個數字別代表  $\rho_{14}$ 、 $\rho_{24}$ 和  $\rho_{34}$ 。

# Cholesky分解定理計算矩陣B

- 放在ComputeB()這個副函式中
- 求出矩陣B後，就可利用  $a = Bw^T$  產生向量a，這一部份的程式碼放在副函式GenNormalVector()中
  - 計算結果則擺在矩陣a[]中

# 蒙地卡羅程式的主體

- 可分成三個部分
  - 輸入相關的參數，如無風險利率，
  - 呼叫ComputeB()計算矩陣B，
  - 利用GenNormalVector()模擬標的物的價格和選擇權的報酬
- 程式中採用Maximum call option定義
- $Max(Max(S_1(T), S_2(T), \dots, S_k(T)) - X, 0)$

## 程式主體

```
ComputeB(k); ← 計算矩陣B
//蒙地卡羅模擬
srand( (unsigned)time( NULL ) );
double SumU=0;
double SquareSum=0;
for( int i=0;i<n;i++) ← 計算n次
{
  GenNormalVector(k);
  double MaxST=0,ST;
  for(int j=0;j<k;j++) ← 每次模擬k個標的物
  {
    ST=InitPrice[j]*
    exp((r-Vol[j]*Vol[j]/2)*T+Vol[j]*sqrt(T)*a[j]);
    MaxST=Max(MaxST,ST);
  }
  double V=exp(-r*T)*Max(MaxST-X,0); ← 計算Maximum option payoff
  SumU=SumU+V;
}
double U=SumU/n;
printf("Value=%f\n",U);
```

## 課堂練習

- 請修改上述程式來評價Minimum put

$$Max(X - Min(S_1(T), S_2(T), \dots, S_k(T)), 0)$$