Kiegyenlítő számítások MSc 2023/24

2. gyakorlat

Áttekintés

- Mérési bizonytalanság számítására szolgáló programok
  - NIST Uncertainty Machine
  - számpéldák
- Rendellenes hibaterjedés
  - számpélda

Mérési bizonytalanság számítására szolgáló programok

- GUM Workbench (Metrodata GmbH)
- GUM_MC (Jean-Marie Biansan, GPL)
- Uncertainty Machine (NIST, public domain)
- GUMsim (QuoData GmbH)
- DataMelt (http://jwork.org/dmelt)
- Uncertainty Calculator (John Denker)
- OpenTurns (LGPL, http://www.openturns.org/)

NIST Uncertainty Machine

- Web-es felület, R nyelvű programok, offline telepítés lehetséges (https://uncertainty.nist.gov/)
  - bemeneti mennyiségek megadása
    - szám, elnevezés, eloszlás (, korreláció)
  - Monte Carlo minták száma
  - Kimeneti mennyiség(ek) képletének megadása (R programnyelven)
  - számítás végrehajtása

About | App

Introduction

The NIST Uncertainty Machine is a Web-based software application to evaluate the measurement uncertainty associated with an output quantity defined by a measurement model of the form $y = f(x_0, \ldots, x_n)$.

User's manual available here.

Load examples

Drop configuration file here or click to upload

1. Select Inputs & Choose Distributions

Number of input quantities: 1

Names of input quantities:

x0

x0 Gaussian (Mean, StdDev) 0 1

Correlations

2. Choose Options

Number of realizations of the output quantity: 1000000

Random number generator seed: 54

Symmetrical coverage intervals

3. Write the Definition of Output Quantity

Definition of output quantity (R expression):

```
x0
```

- +

Run the computation

1. példa

- Detrekői 4.8 példa:

  Határozzuk meg a kör kerületének és területének a középhibáját, feltételezve, hogy a sugárra végzett mérés $L = 10{,}000 \text{ m}$ eredménye és a mérés $\mu = 0{,}03 \text{ m}$ középhibája ismert

1. Select Inputs & Choose Distributions

Number of input quantities: 1

Names of input quantities:

L

L Gaussian (Mean, StdDev) 10 0.03

Correlations

2. Choose Options

Number of realizations of the output quantity: 1000000

Random number generator seed: 54

Symmetrical coverage intervals

3. Write the Definition of Output Quantity

Definition of output quantity (R expression):

```
2*pi*L
```

```
pi*L^2
```

- +

Run the computation

Shared Ouputs

Download binary R data file with Monte Carlo values all output quantities

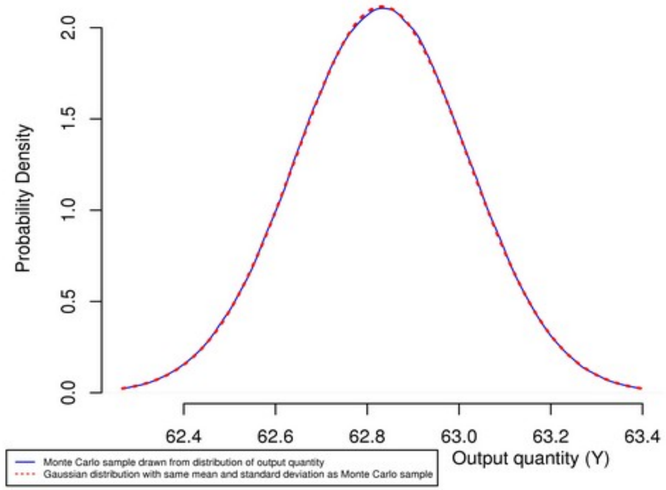
Download a text file with Monte Carlo values of all output quantities

Download text file with numerical results

Download configuration file

Ouput 1

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 1000000

ave     = 62.832
sd      = 0.189
median  = 62.832
mad     = 0.19

Coverage intervals

99% (   62.35,     63.32)        k =      2.6
95% (  62.462,    63.201)        k =        2
90% (  62.521,    63.141)        k =      1.6
68% (  62.643,    63.021)        k =        1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
L                      100         100
Residual                NA           0

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

       y  = 62.832
     u(y) = 0.188

             SensitivityCoeffs Percent.u2
L                          6.3        100
Correlations                NA          0
============================================
```



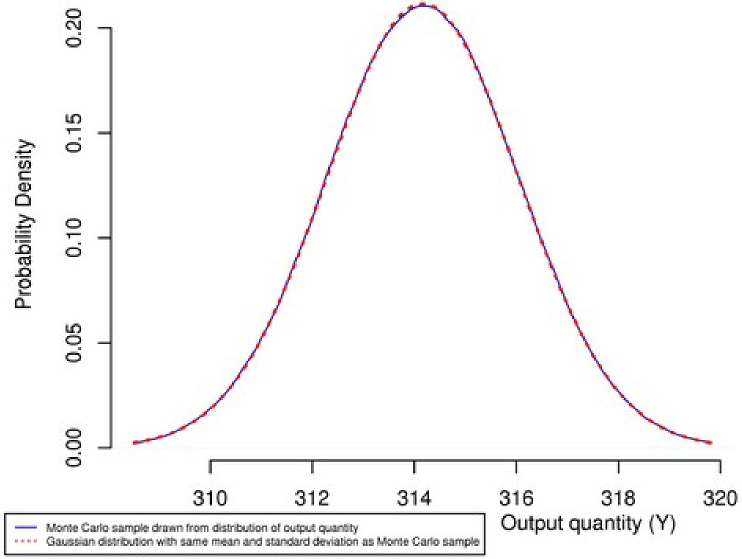
Download JPEG file of this plot

Detrekői 4.8 példa eredmények

kerület középhibája: 0.188 m

Ouput 2

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 1000000

ave     = 314.16
sd      = 1.89
median  = 314.16
mad     = 1.9

Coverage intervals

99% (    309.3,       319)        k =       2.6
95% (    310.5,     317.9)        k =         2
90% (    311.1,     317.3)        k =       1.6
68% (   312.28,    316.05)        k =         1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
L                      100         100
Residual                NA           0

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 314.16
      u(y) = 1.88

             SensitivityCoeffs Percent.u2
L                           63        100
Correlations                NA          0
============================================
```



Download JPEG file of this plot

Detrekői 4.8 példa eredmények

terület középhibája: 1.885 m

További lehetőségek

Download binary R data file with Monte Carlo values all output quantities

Download a text file with Monte Carlo values of all output quantities

Download text file with numerical results

Download configuration file

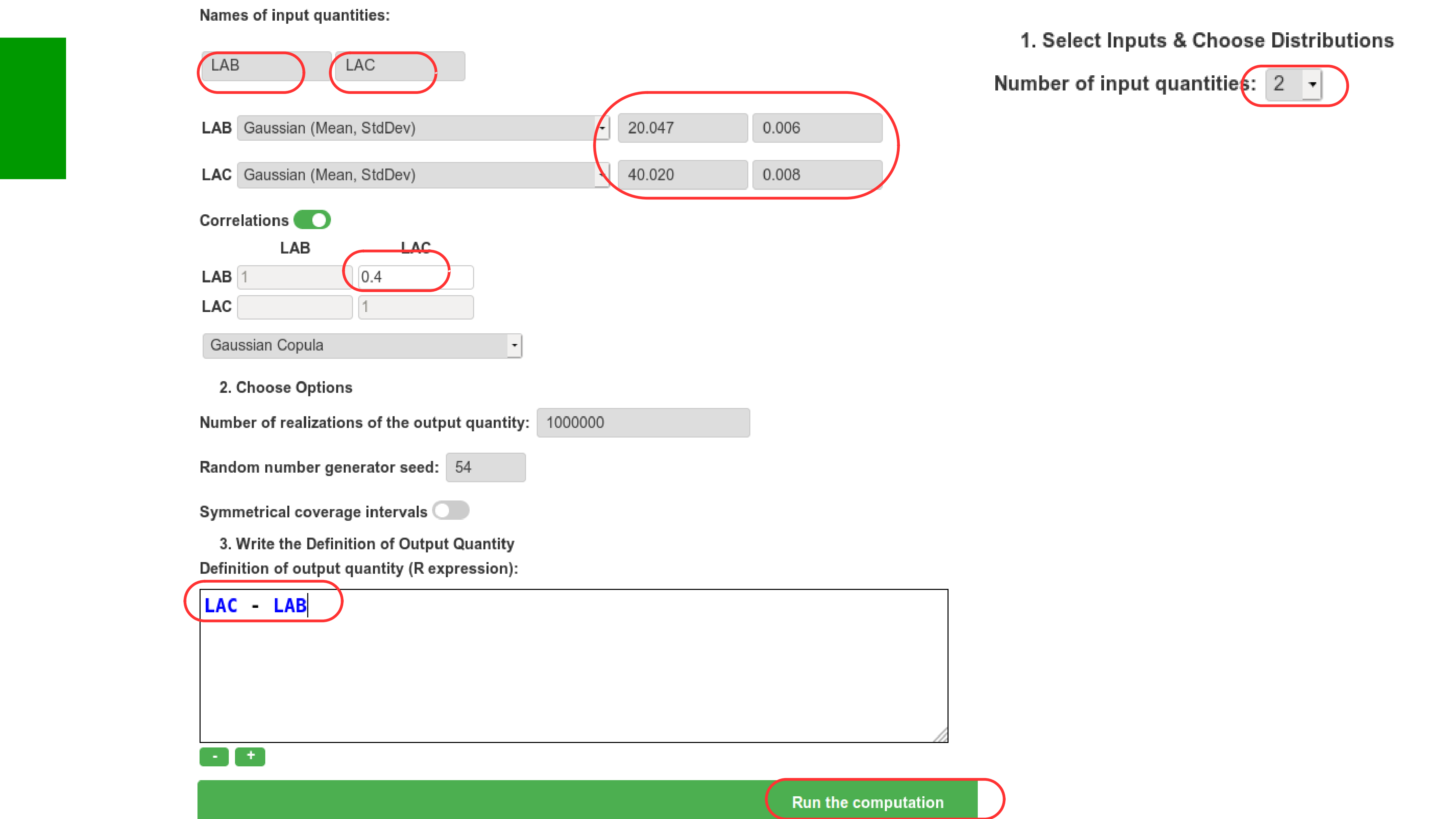
Download JPEG file of this plot

- Eredmények letölthetők kép formájában és szöveges fájlként (results.txt)
- Beállítás fájl letölthető és a példa újra futtatható: (config.um)

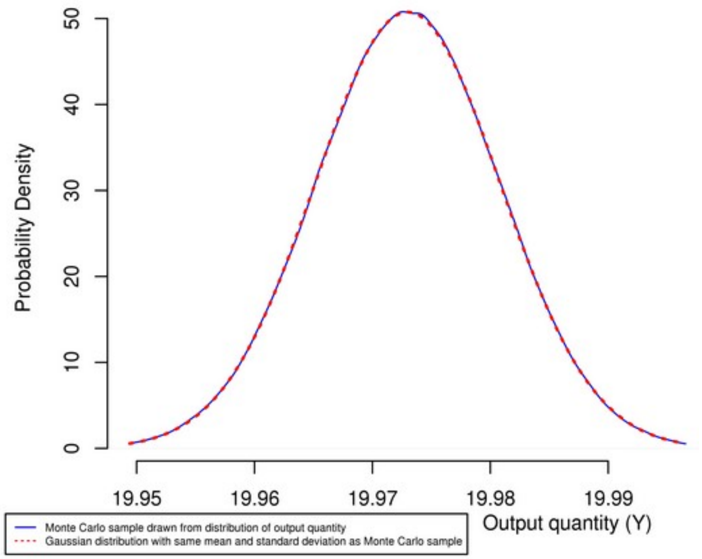
2. példa

- Detrekői 4.9 példa:

  Határozzuk meg valamely egyenesesen egy A pontból kiindulva acélszalaggal folyamatosan mért B és C pontok távolságának a középhibáját. A mérési eredmények: $L_{AB} = 20{,}047\ \mathrm{m}$, $L_{AC} = 40{,}020\ \mathrm{m}$. A mérési eredményeket a $\mu_{AB} = 6\ \mathrm{mm}$ és a $\mu_{AC} = 8\ \mathrm{mm}$ középhibák jellemzik. A két mérés kapcsolatát az $r_{BC} = 0{,}4$ korrelációs együtthatóval adjuk meg.


1. Select Inputs & Choose Distributions
Number of input quantities: 2
Names of input quantities:
LAB
LAC
LAB Gaussian (Mean, StdDev) 20.047 0.006
LAC Gaussian (Mean, StdDev) 40.020 0.008
Correlations
LAB LAC
LAB 1 0.4
LAC 1
Gaussian Copula
2. Choose Options
Number of realizations of the output quantity: 1000000
Random number generator seed: 54
Symmetrical coverage intervals
3. Write the Definition of Output Quantity
Definition of output quantity (R expression):
LAC - LAB
-
+
Run the computation

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 1000000

ave     = 19.973
sd      = 0.00786
median  = 19.973
mad     = 0.0078

Coverage intervals

99% (  19.953,   19.993)        k =      2.5
95% (  19.958,  19.9884)        k =      1.9
90% ( 19.9601,  19.9859)        k =      1.6
68% ( 19.9651,  19.9809)        k =        1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
LAB                  12.59       12.59
LAC                  87.41       87.41
Residual                NA        0.00

-------------------------------------------


Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 19.973
      u(y) = 0.00785

             SensitivityCoeffs Percent.u2
LAB                         -1         58
LAC                          1        100
Correlations                NA        -62
============================================
```



Download binary R data file with Monte Carlo values of output quantity
Download a text file with Monte Carlo values of output quantity
Download text file with numerical results shown on this page
Download JPEG file with plot shown on this page
Download configuration file

Detrekői 4.9 példa eredmények

BC távolság középhibája: 7.8 mm

2. példa, korreláció nélkül

- Detrekői 4.9 példa:

  Határozzuk meg valamely egyenesen egy A pontból kiindulva acélszalaggal folyamatosan mért B és C pontok távolságának a középhibáját. A mérési eredmények: $L_{AB} = 20{,}047 \text{ m}$, $L_{AC} = 40{,}020 \text{ m}$. A mérési eredményeket a $\mu_{AB} = 6 \text{ mm}$ és a $\mu_{AC} = 8 \text{ mm}$ középhibák jellemzik. *A két mérés kapcsolatát ne vegyük figyelembe*.

Names of input quantities:

1. Select Inputs & Choose Distributions

Number of input quantities: 2

Name	LAB	LAC	
LAB	Gaussian (Mean, StdDev)	20.047	0.006
LAC	Gaussian (Mean, StdDev)	40.020	0.008

Correlations

	LAB	LAC
LAB	1	0.0
LAC		1

Gaussian Copula

2. Choose Options

Number of realizations of the output quantity: 1000000

Random number generator seed: 54

Symmetrical coverage intervals

3. Write the Definition of Output Quantity

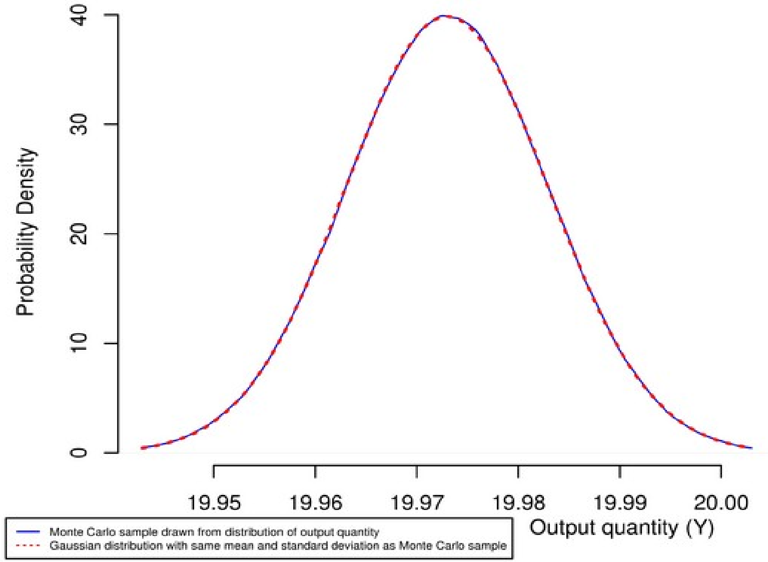
Definition of output quantity (R expression):

```
LAC - LAB
```

- +

Run the computation

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 1000000

ave     = 19.973
sd      = 0.01
median  = 19.973
mad     = 0.01

Coverage intervals

99% (  19.947,   19.999)        k =      2.6
95% (  19.953,   19.993)        k =        2
90% (  19.956,   19.989)        k =      1.6
68% (  19.963,   19.983)        k =        1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
LAB                  35.83       35.83
LAC                  64.17       64.17
Residual                NA        0.00

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 19.973
      u(y) = 0.01

             SensitivityCoeffs Percent.u2
LAB                         -1         36
LAC                          1         64
Correlations                NA          0
============================================
```



Download binary R data file with Monte Carlo values of output quantity
Download a text file with Monte Carlo values of output quantity
Download text file with numerical results shown on this page
Download JPEG file with plot shown on this page
Download configuration file

Detrekői 4.9 példa eredmények

BC távolság középhibája: 10.0 mm

3. példa

- Detrekői 4.13 példa:

  Ismert koordinátájú A pontból giroteodolittal és távmérővel mérést végeznek az ismeretlen koordinátájú P pont meghatározására. A giroteodolittal mért azimut értéke: $L_\alpha = 30°42'06''$, a távmérővel mért távolságé pedig $L_t = 310{,}410\ \mathrm{m}$. Az azimutot a $\mu_\alpha = 12''$, a távolságmérést a $\mu_t = 0.01\ \mathrm{m}$ középhiba jellemzi. A két mérés függetlennek tekinthető. Határozzuk meg a P pont A ponthoz viszonyított koordinátáit és azok kovarianciamátrixát

1. Select Inputs & Choose Distributions

Number of input quantities: 2

Names of input quantities:

Lt La

Lt	Gaussian (Mean, StdDev)	310.410	0.01
La	Gaussian (Mean, StdDev)	30.70166667	0.00333333

Correlations

2. Choose Options

Number of realizations of the output quantity: 500000

Random number generator seed: 54

Symmetrical coverage intervals

3. Write the Definition of Output Quantity

Definition of output quantity (R expression):

```
Lt*cos(La*pi/180)
```

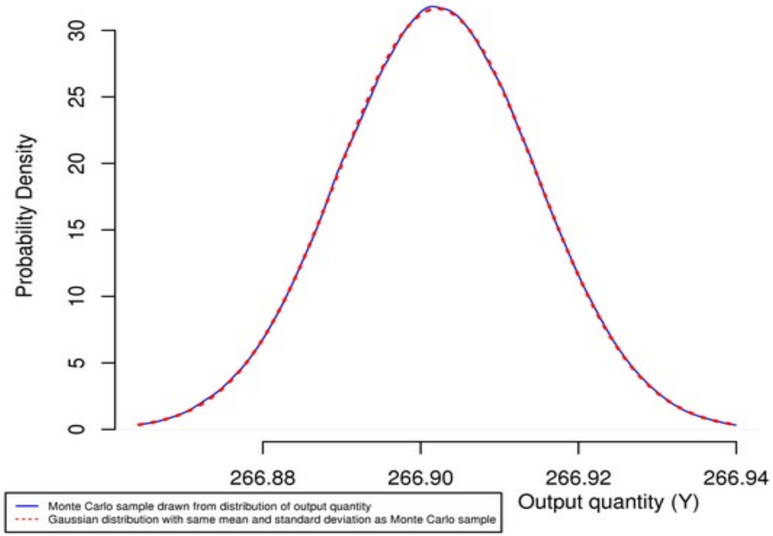
```
Lt*sin(La*pi/180)
```

- +

Run the computation

Ouput 1

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 500000

ave      = 266.9021
sd       = 0.013
median   = 266.902
mad      = 0.013

Coverage intervals

99% (  266.87,  266.934)        k =       2.5
95% ( 266.877,  266.927)        k =         2
90% ( 266.881,  266.923)        k =       1.7
68% (  266.89,  266.915)        k =      0.99

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
Lt                   46.48       46.48
La                   53.52       53.52
Residual                NA        0.00

-------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 266.9021
      u(y) = 0.013

             SensitivityCoeffs Percent.u2
Lt                        0.86         47
La                       -2.80         53
Correlations                NA          0
===========================================
```



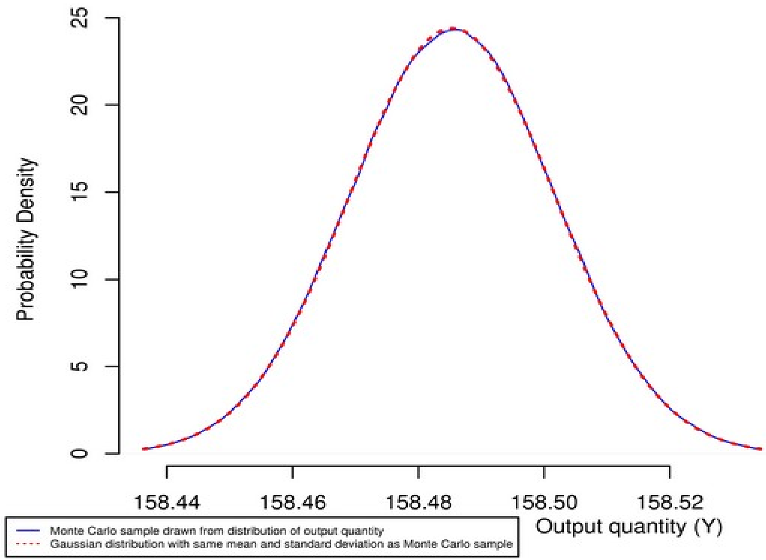
Download JPEG file of this plot

Detrekői 4.13 példa eredmények

X koordináta középhibája: 0.013 m

Ouput 2

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 500000

ave      = 158.485
sd       = 0.016
median   = 158.485
mad      = 0.016

Coverage intervals

99% ( 158.443,  158.527)        k =      2.6
95% ( 158.453,  158.517)        k =        2
90% ( 158.459,  158.512)        k =      1.6
68% ( 158.469,  158.502)        k =        1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
Lt                    9.77        9.77
La                   90.23       90.23
Residual                NA        0.00

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 158.485
      u(y) = 0.016

             SensitivityCoeffs Percent.u2
Lt                        0.51        9.8
La                        4.70       90.0
Correlations                NA        0.0
============================================
```



Download JPEG file of this plot

Detrekői 4.13 példa eredmények

Y koordináta középhibája: 0.016 m

3. példa – kovariancia mátrix

- A NIST Uncertainty Machine nem számítja ki a kovariancia mátrixot
- A Monte Carlo számítás eredményei viszont letölthetők (`values.txt`) és ezekből a számítás elvégezhető

Download binary R data file with Monte Carlo values all output quantities

Download a text file with Monte Carlo values of all output quantities

Download text file with numerical results

Download configuration file

```
"y1" "y2"
266.896465773678 158.510627930491
266.901775051475 158.49156616866
266.90907895783 158.444060010151
266.883259174918 158.518634359747
266.928823328455 158.484721799438
266.88425496917 158.516710228299
266.929457687034 158.457267899579
266.877322252119 158.503631394655
266.904873642514 158.482674759476
...
```

Kovariancia mátrix számítása

- Python program

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import numpy as np

data = np.loadtxt('values.txt', skiprows=1)
nd = data.shape[0]
nv = data.shape[1]
covmx = np.cov(data.T)
v = ['x','y']

print("Kovariancia mátrix Monte Carlo szimulációval")
print(" adatok száma: {:d}".format(nd))
print("kovariancia mátrix")
for i in range(nv):
    for j in range(nv):
        print("{0:2s}{1:2s}: {2:8.4e}".format(v[i],v[j],covmx[i,j]))
```

Kovariancia mátrix számítása

- számítási eredmények

```
python corr.py
Kovariancia mátrix Monte Carlo szimulációval
 adatok száma: 500000
kovariancia mátrix
x x : 1.5909e-04
x y : -9.9308e-05
y x : -9.9308e-05
y y : 2.6703e-04
```

Detrekői eredmények

Az $\mathbf{F}^*_{YL}$ és az $\mathbf{M}_{LL}$ mátrixokat a (4.67) összefüggésbe helyettesítve megkapjuk a koordináták $\mathbf{M}_{YY}$ kovarianciamátrixát:

$$\mathbf{M}_{YY} = \mathbf{F}^*_{YL}\mathbf{M}_{LL}\mathbf{F}_{YL} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0,8598 & -158,486 \\ 0,5106 & 266,902 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,01^2 & 0 \\ 0 & \left(\frac{12}{\varrho''}\right)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,8598 & 0,5106 \\ -158,486 & 266,902 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1,589 \cdot 10^{-4} & -0,993 \cdot 10^{-4} \\ -0,993 \cdot 10^{-4} & 2,671 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix} [\mathrm{m}^2].$$

Rendellenes hibaterjedés

- *Pontatlanabb mérések adhatnak-e pontosabb eredményeket?*

Rendellenes hibaterjedés

- *Pontatlanabb mérések adhatnak-e pontosabb eredményeket?*
- Igen!
  A bemeneti mennyiség bizonytalansága nő,
  mégis a számított mennyiség bizonytalansága
  csökken!
- számpélda P. Pernot et al. (2015) cikke alapján

Hibaterjedés: eredő bizonytalanság meghatározása

- A mérendő mennyiséget az egyes összetevők alapján számítással határozzuk meg. Az összetevők bizonytalanságai alapján a mérendő mennyiség eredő bizonytalanságát a standard bizonytalanságok terjedési törvényének segítségével határozzuk meg (hibaterjedés)
- Az X_i bemeneti mennyiségek (összetevők) és az Y mérendő, vagy kimeneti mennyiség kapcsolatát megadó függvény a fizikai törvényszerűségek alapján ismert:

$$Y = f\left(X_{1,} X_{2,} \dots , X_N\right)$$

- A mérési folyamat során az X_i bemeneti mennyiségek x_i becslőit határozzuk meg. A becslők értékét a függvénybe helyettesítve megkapjuk a kimeneti mennyiség y becslőjét:

$$y = f\left(x_{1,} x_{2,} \dots , x_N\right)$$

- A becsült kimeneti mennyiség standard bizonytalansága (négyzete):

$$u_e^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j)$$

- A kifejezés a standard bizonytalanságok terjedési törvénye, amelyben az $u(x_i, x_j)$ a becslők becsült kovarianciája, a $\partial f / \partial x_i$ számok az érzékenységi együtthatók

Ez a törvény azonos a geodéziában jól ismert hibaterjedés törvényével

Nem lineáris függvény hibaterjedése

- n független valószínűségi változó függvénye

$$Y = f\left(X_{1,} X_{2,} \dots, X_n\right)$$

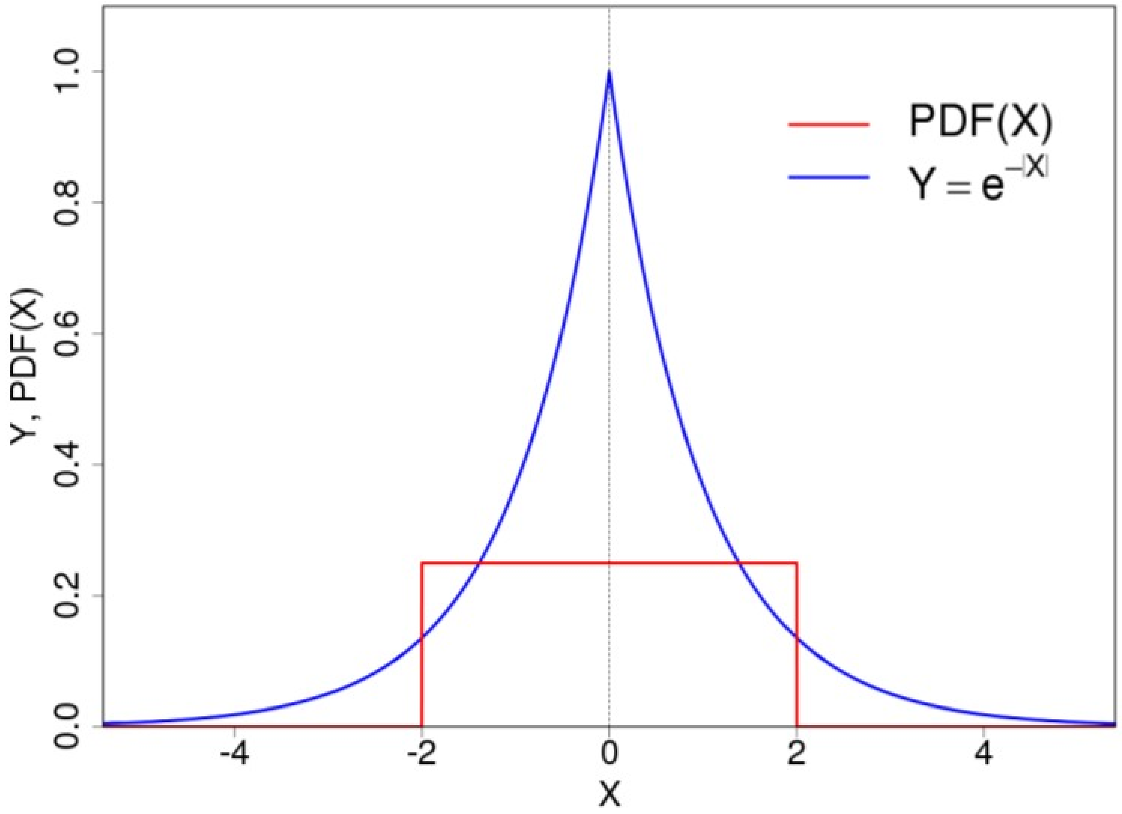
- variancia összetevők lineáris esetben (összegük 1)

$$G_{X_i} = \frac{1}{u_Y^2}\left(\frac{\partial Y}{\partial X_i}\right)^2 u_{X_i}^2 \qquad G_{X_i} = \frac{E\left[\left(Y - u_Y\right)\frac{\partial Y}{\partial X_i}\left(X_i - u_{X_i}\right)\right]}{u_Y^2}$$

- variancia összetevők (*variancia gradiensek*) nem lineáris esetben (összegük nem 1 és negatívak is lehetnek!)

Számpélda

- Bemeneti X mennyiség egyenletes eloszlású az
  $[-a, a]$ intervallumban
  (pl. a kvantálási zaj ilyen)
- A mérési függvény $Y = \exp(-|X|)$
- Monte Carlo szimuláció



Analitikus variancia gradiensek

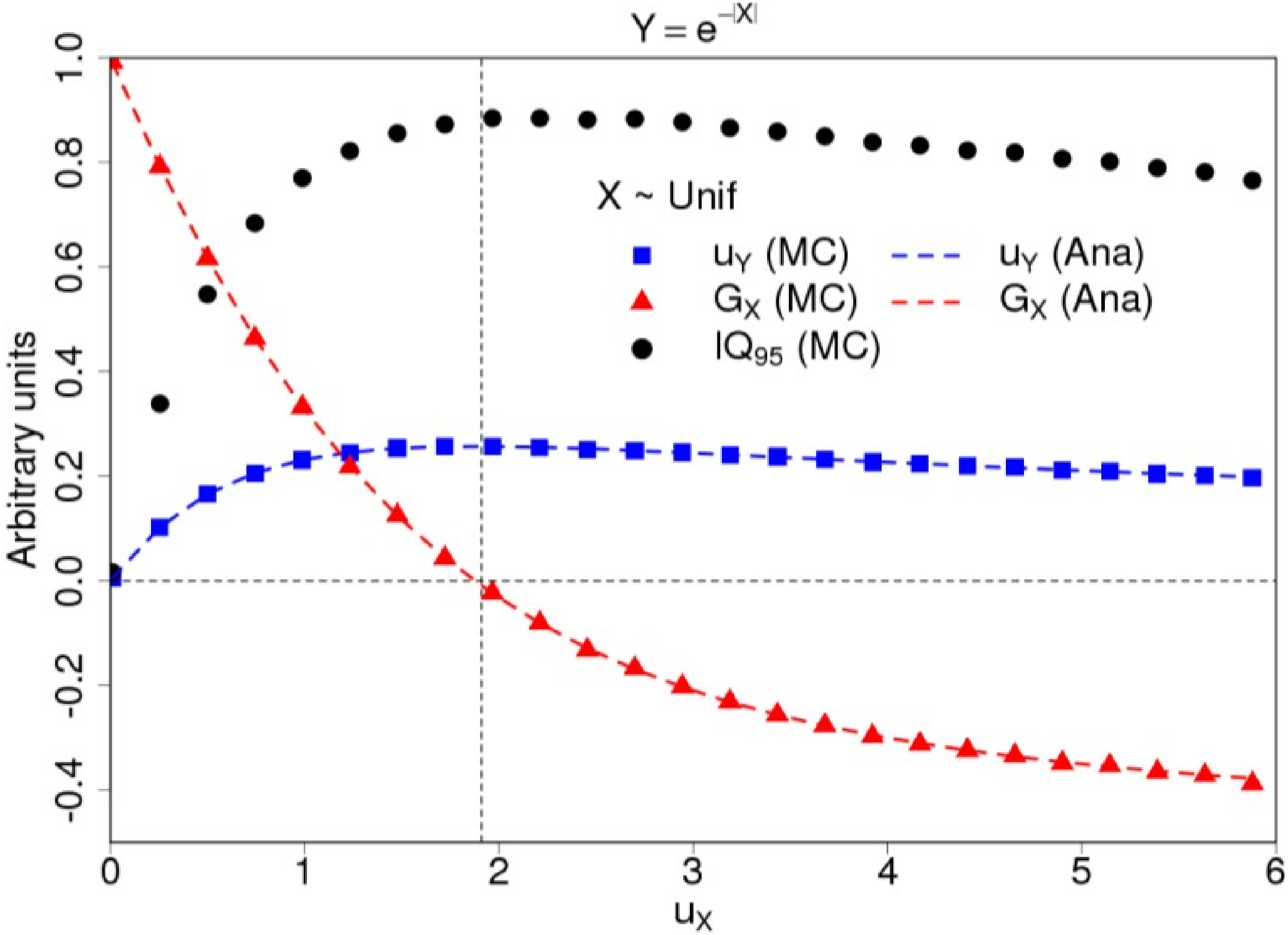
- Pernot et al. cikkében analitikus képletek találhatók:

$$\bar{y} = \frac{1 - e^{-a}}{a} \qquad (6)$$

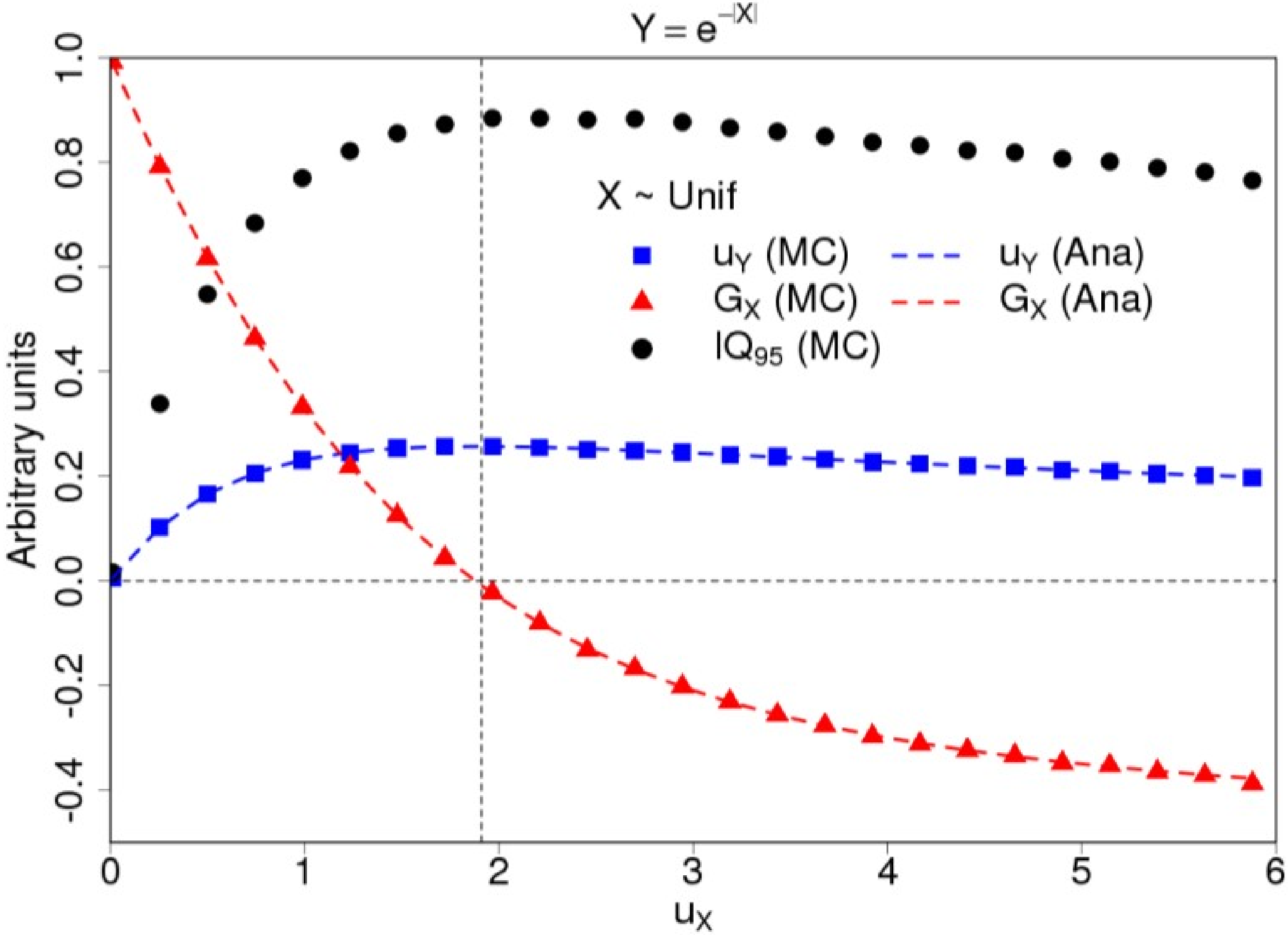
$$u_Y^2 = \frac{1 - e^{-2a}}{2a} - \bar{y}^2 \qquad (7)$$

$$G_X = \frac{1}{2au_Y^2} \times \left[\frac{2a + 1}{2} e^{-2a} - 2\bar{y}\left((a + 1)e^{-a} - 1\right) - \frac{1}{2} \right] \qquad (8)$$

Kimeneti érték bizonytalansága



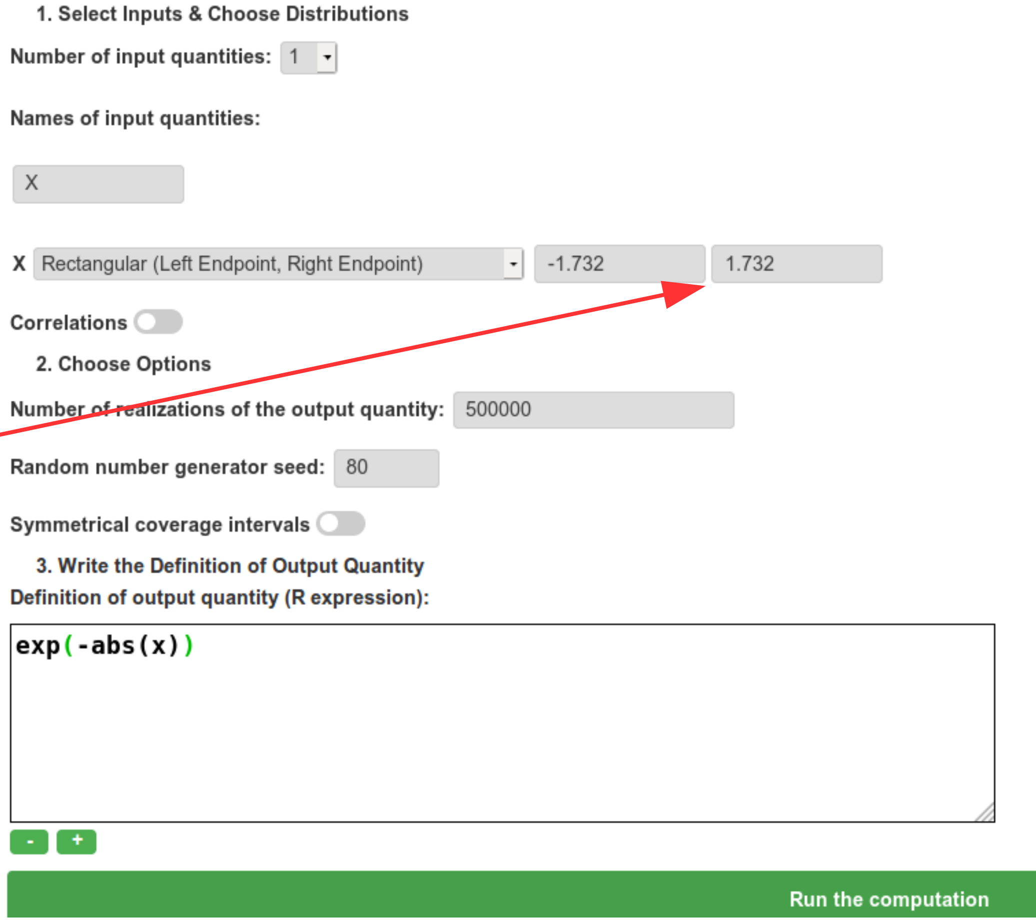
Kimeneti érték bizonytalansága



NIST Uncertainty Machine

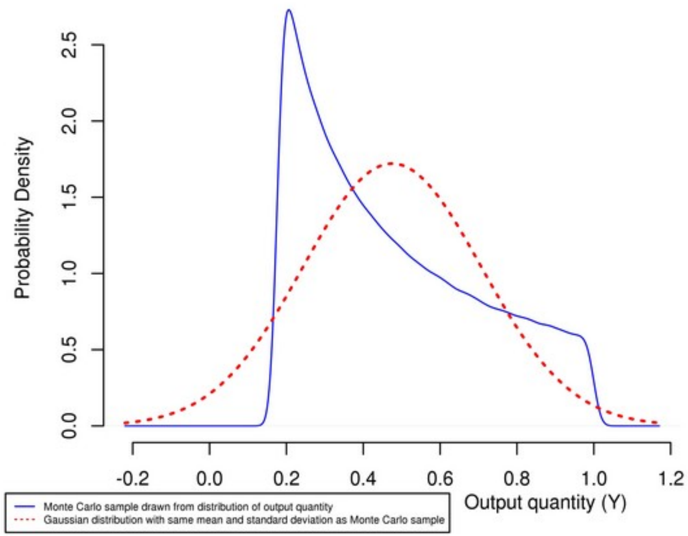
- Az a fél szélességű egyenletes eloszláshoz tartozó mérési bizonytalanság:

$$u_X = \frac{a}{\sqrt{3}}$$



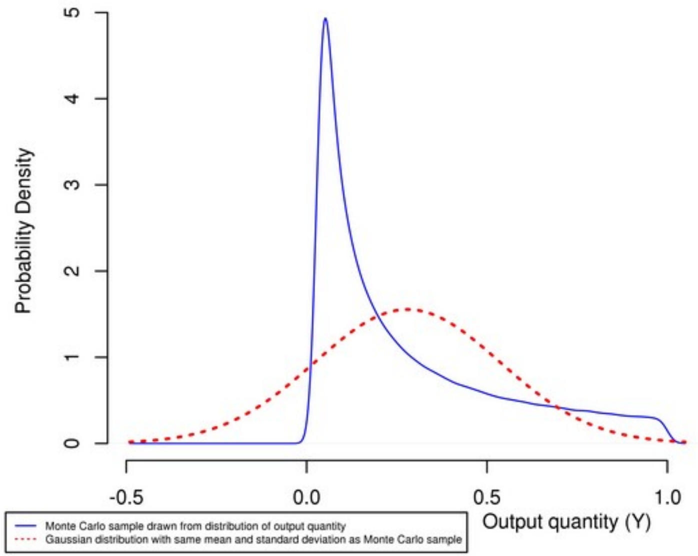
Eredmények

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 500000

ave      = 0.48
sd       = 0.232
median   = 0.42
mad      = 0.25

Coverage intervals

99% (    0.178,     0.991)        k =      1.8
95% (    0.185,     0.957)        k =      1.7
90% (    0.193,     0.916)        k =      1.6
68% (     0.23,      0.76)        k =      1.1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
X                      100           0
Residual                NA         100

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y  = 1
      u(y) = 0

             SensitivityCoeffs Percent.u2
X                            0         NA
Correlations                NA         NA
============================================
```



Download binary R data file with Monte Carlo values of output quantity
Download a text file with Monte Carlo values of output quantity
Download text file with numerical results shown on this page
Download JPEG file with plot shown on this page
Download configuration file

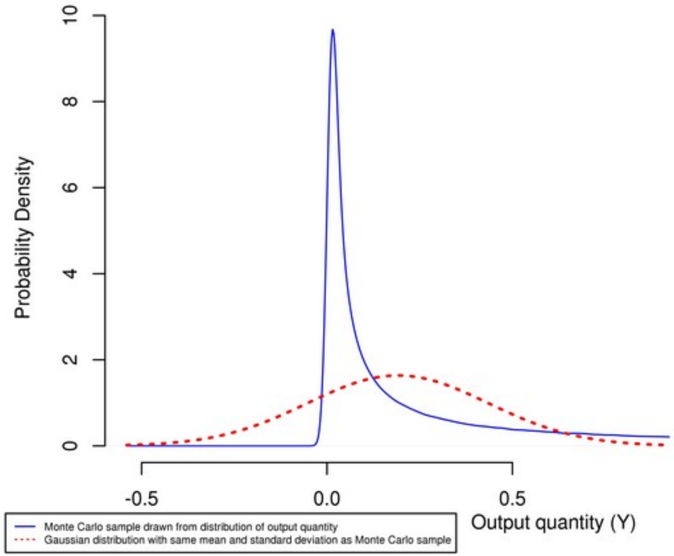
```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 500000

ave      = 0.28
sd       = 0.26
median   = 0.18
mad      = 0.18

Coverage intervals

99% (  0.0319,     0.983)        k =       1.9
95% (   0.034,      0.92)        k =       1.7
90% (   0.037,      0.84)        k =       1.6
68% (   0.054,      0.58)        k =         1

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
X                      100           0
Residual                NA         100

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 1
      u(y) = 0

             SensitivityCoeffs Percent.u2
X                            0         NA
Correlations                NA         NA
============================================
```



Download binary R data file with Monte Carlo values of output quantity
Download a text file with Monte Carlo values of output quantity
Download text file with numerical results shown on this page
Download JPEG file with plot shown on this page
Download configuration file

Eredmények (2u_x)

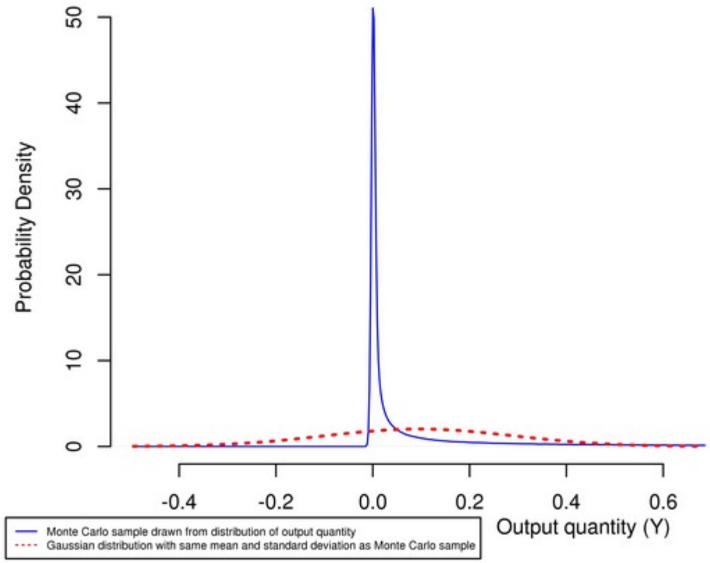
```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 500000

ave      = 0.19
sd       = 0.24
median   = 0.075
mad      = 0.095

Coverage intervals

99% ( 0.00569,    0.974)       k =        2
95% (  0.0063,     0.88)       k =      1.8
90% (  0.0072,     0.77)       k =      1.6
68% (   0.013,     0.44)       k =     0.88

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
X                      100           0
Residual                NA         100

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y  = 1
      u(y) = 0

             SensitivityCoeffs Percent.u2
X                            0         NA
Correlations                NA         NA
============================================
```



Download binary R data file with Monte Carlo values of output quantity
Download a text file with Monte Carlo values of output quantity
Download text file with numerical results shown on this page
Download JPEG file with plot shown on this page
Download configuration file

Eredmények ($3u_x$)

```
===== RESULTS ==============================

Monte Carlo Method

Summary statistics for sample of size 500000

ave      = 0.096
sd       = 0.2
median   = 0.006
mad      = 0.008

Coverage intervals

99% ( 3.2e-05,     0.95)        k =      2.4
95% (   4e-05,     0.77)        k =        2
90% ( 5.2e-05,     0.59)        k =      1.5
68% ( 0.00016,     0.19)        k =     0.48

ANOVA (% Contributions)

            w/out Residual w/ Residual
X                      100           0
Residual                NA         100

--------------------------------------------

Gauss's Formula (GUM's Linear Approximation)

        y   = 1
      u(y) = 0

             SensitivityCoeffs Percent.u2
X                            0         NA
Correlations                NA         NA
============================================
```

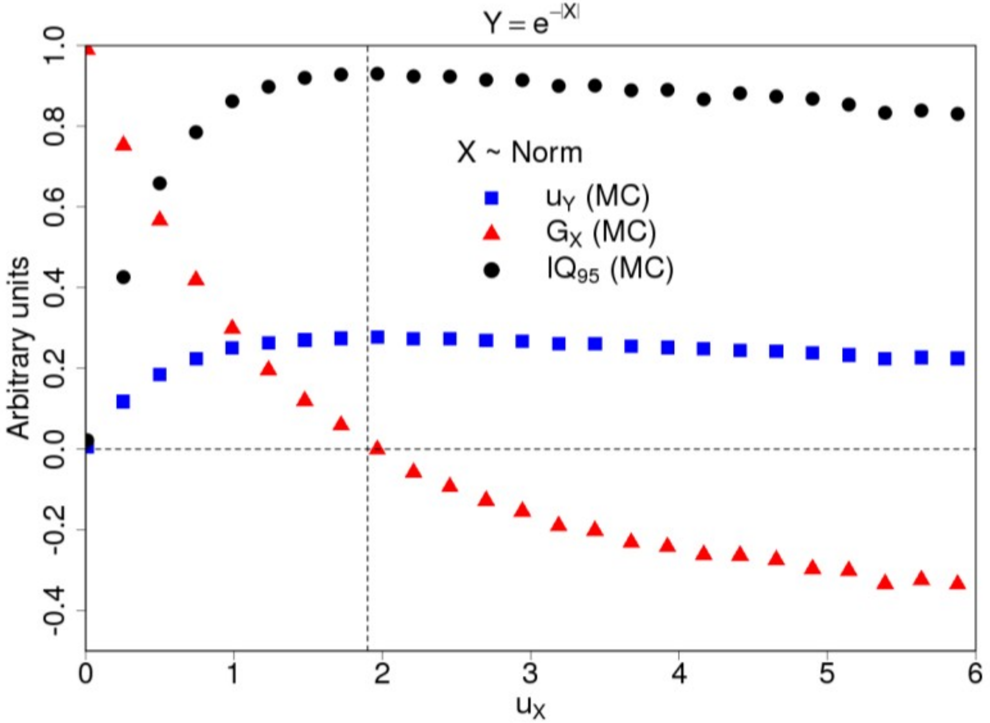


Download binary R data file with Monte Carlo values of output quantity
Download a text file with Monte Carlo values of output quantity
Download text file with numerical results shown on this page
Download JPEG file with plot shown on this page
Download configuration file

Eredmények ($6u_x$)

Más mérési függvény, más eloszlással

- A mérési függvény $Y = \exp(-X^2)$
  - Hasonló paradox eredményeket kapunk
- Más az X eloszlás függvénye, pl. Gauss
  - Hasonló paradox eredményeket kapunk



Tanulságok

- Negatív variancia gradiensek (csökkenő kimeneti variancia növekvő bemeneti varianciára) sokféle modellben jelentkeznek
- Óvatosan kell bánni a szórással (középhiba) illetve a megbízhatósági intervallumokkal mint a mérési bizonytalanság jellemzőivel
- Fontos megvizsgálni a számított mennyiségek valódi eloszlását is, pl. Monte Carlo eljárással
  - Erre a célra már jó eszközökkel rendelkezünk (pl. NIST Uncertainty Machine)

Hivatkozás

- Pernot P, Désenfant M, Hennebelle F (2015): Model's output variance can increase when input variance decreases: a sensitivity analysis paradox? 17th Int. Congr. of Metrology

17th International Congress of Metrology, 02004 (2015)
DOI: 10.1051/metrology/201502004

Model's output variance can increase when input variance decreases : a sensitivity analysis paradox ?

Pascal Pernot[1,4,a], Michèle Désenfant[2,4], et François Hennebelle[3,4]

[1] *Laboratoire de Chimie Physique, UMR8000 CNRS/Univ. Paris-Sud, Orsay, France*
[2] *Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE), 1 rue Gaston Boissier, 75724 Paris Cedex 15, France*
[3] *Laboratoire Electronique, Informatique et Image, UMR6306 CNRS/Université de Bourgogne, Avenue des Plaines de l'Yonne, 89000 Auxerre, France*
[4] *Réseau "Mesures, Modèles et Incertitudes", Mission pour l'Intersciplinarité - CNRS*