

DIN EN 16603-60-10

ICS 49.140

**Raumfahrttechnik –
Steuerungsleistung;
Englische Fassung EN 16603-60-10:2014**

Space engineering –
Control performances;
English version EN 16603-60-10:2014

Ingénierie spatiale –
Performance de systèmes de contrôle;
Version anglaise EN 16603-60-10:2014

Gesamtumfang 64 Seiten

DIN-Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 16603-60-10:2014) wurde vom Technischen Komitee CEN/CLC/TC 5 „Raumfahrt“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 131-10-01 AA „Interoperabilität von Informations-, Kommunikations- und Navigationssystemen“ im DIN-Normenausschuss Luft- und Raumfahrt (NL).

Dieses Dokument (EN 16603-60-10:2014) basiert auf ECSS-E-ST-60-10C.

Dieses Dokument enthält unter Berücksichtigung des DIN-Präsidialbeschlusses 1/2004 nur die englische Originalfassung von EN 16603-60-10:2014.

Dieses Dokument wurde speziell zur Behandlung von Raumfahrtsystemen erarbeitet und hat daher Vorrang vor jeglicher Europäischer Norm, da es denselben Anwendungsbereich hat, jedoch über einen größeren Geltungsbereich (z. B. Luft- und Raumfahrt) verfügt.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3 Begriffe, Symbole und Abkürzungen

3.1 Begriffe aus anderen Normen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe der ECSS-S-ST-00-01, insbesondere folgende Begriffe:

- Fehler
- Leistung
- Unsicherheit

3.2 Für diese Norm spezifische Begriffe¹⁾

3.2.1

absoluter Wissensfehler (AKE)

Schwankungswert des Wissensfehlers zu einer bestimmten Zeit

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$AKE(t) = e_K(t)$$

ANMERKUNG 2 Siehe Anhang A.1.3 zur Festlegung von Anforderungen an Wissensfehler.

3.2.2

absoluter Leistungsfehler (APE)

Schwankungswert des Leistungsfehlers zu einer bestimmten Zeit

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$APE(t) = e_P(t)$$

3.2.3

Fehlerindex

Parameter, der einen speziellen Aspekt der Zeitschwankung eines **Leistungs-** oder **Wissensfehlers** isoliert

ANMERKUNG 1 Ein Leistungsfehlerindex wird auf die Abweichung der (gewünschten) Ausgabe des Systems von der tatsächlichen Systemausgabe angewandt.

ANMERKUNG 2 Ein Wissensfehler wird auf die Abweichung der tatsächlichen Ausgabe des Systems von der bekannten (geschätzten) Systemausgabe angewandt.

ANMERKUNG 3 Die gebräuchlichsten Indizes werden in diesem Abschnitt festgelegt (APE, RPE, AKE usw.). Die Liste ist nicht einschränkend.

¹⁾ Vorbemerkung: Die in 3.2 eingeführten Fehlersignale sind sehr allgemein gehalten. Sie stellen jede physikalische Größe dar (z. B. Fluglage, Temperatur, Druck, Position usw.). Je nach Situation und Art des Steuerungssystems sind sie skalar oder mehrdimensional.

3.2.4

einzelne Fehlerquelle

elementare physikalische Eigenschaft oder Prozess, erzeugt durch eine eindeutigen Quelle, die einen **Leistungs-** oder **Wissensfehler** verursacht

ANMERKUNG 1 Beispielsweise Rauschen des Sensors, systematischer Fehler (Bias) des Sensors, Rauschen des Bedienelementes, systematischer Fehler (Bias) des Bedienelementes, Störkräfte und -drehmomente (z. B. Mikrovibrationen, Rangieren, externe oder interne Bewegung des Teilsystems), Reibungskräfte und Drehmomente, Versatz, Wärmeverzug, digitale Quantisierung, Regelgüte-Algorithmus (bleibende Regelabweichung), Jitter usw.

3.2.5

Wissensfehler

Abweichung der bekannten (geschätzten) Systemausgabe von der tatsächlich erreichten Ausgabe

ANMERKUNG 1 Wird abgekürzt durch e_K .

ANMERKUNG 2 Normalerweise ist dies zeitabhängig.

ANMERKUNG 3 Manchmal auch irritierend als „Messfehler“ bezeichnet, obwohl die Benennung tatsächlich allgemeiner gefasst ist, als bei einer direkten Messung.

ANMERKUNG 4 Für die Parameterdarstellung des Wissensfehlers sind abhängig vom System verschiedene Quantitäten relevant. Das Gleiche gilt für den Leistungsfehler. Die Entscheidung für die geeignetste bedarf eines guten Urteilsvermögens.

ANMERKUNG 5 Beispiel: Der Unterschied zwischen der tatsächlichen und der bekannten Ausrichtung eines Bezugssystems kann durch Verwendung der Eulerschen Winkel zur Transformation des Bezugssystems oder dem Winkel zwischen der tatsächlichen und der bekannten Ausrichtung eines bestimmten Vektors innerhalb dieses Bezugssystems parametrisiert werden.

3.2.6

mittlerer Wissensfehler (MKE)

mittlerer Wert des Wissensfehlers über ein festgelegtes Zeitintervall

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$MKE(\Delta t) = \overline{e_K}(\Delta t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_K(t) dt$$

ANMERKUNG 2 Siehe A.1.4 zur Festlegung des Intervalls Δt und A.1.3 zur Festlegung der Anforderungen an den Wissensfehler.

3.2.7

mittlerer Leistungsfehler (MPE)

mittlerer Wert des Leistungsfehlers über ein festgelegtes Zeitintervall

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$MPE(\Delta t) = \overline{e_P}(\Delta t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_P(t) dt$$

ANMERKUNG 2 Siehe A.1.4 zur Festlegung des Intervalls Δt .

3.2.8

Fehler der Leistungsabweichung (PDE)

Differenz der Mittelwerte des Leistungsfehlers, die über zwei Zeitintervalle innerhalb eines Beobachtungszeitraums gemessen werden

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$PDE(\Delta t_1, \Delta t_2) = \overline{e_P}(\Delta t_2) - \overline{e_P}(\Delta t_1) = \frac{1}{\Delta t_2} \int_{\Delta t_2} e_P(t) dt - \frac{1}{\Delta t_1} \int_{\Delta t_1} e_P(t) dt$$

ANMERKUNG 2 Dabei sind die Zeitintervalle Δt_1 und Δt_2 durch ein Zeitintervall ungleich Null Δt_{PDE} getrennt.

ANMERKUNG 3 Die Dauer von Δt_1 und Δt_2 ist ausreichend lang, um kurzfristige Beiträge zu mitteln. Im Idealfall haben sie die gleiche Dauer. Siehe A.1.4 zur weiteren Erörterung der Wahl von Δt_1 , Δt_2 , Δt_{PDE} .

ANMERKUNG 4 Die zwei Intervalle Δt_1 und Δt_2 liegen innerhalb eines Beobachtungszeitraumes.

3.2.9

Leistungsfehler

Unterschied zwischen der (gewünschten) Ausgabe des Systems und der tatsächlich erreichten Ausgabe

ANMERKUNG 1 Wird gekennzeichnet durch e_P .

ANMERKUNG 2 Normalerweise ist dies zeitabhängig.

ANMERKUNG 3 Für die Parameterdarstellung des Leistungsfehlers sind abhängig vom System verschiedene Quantitäten relevant. Die Entscheidung für die geeignetste bedarf eines guten Urteilsvermögens.

ANMERKUNG 4 Beispiel: Der Unterschied zwischen der gewünschten und der tatsächlichen Ausrichtung eines Bezugssystems kann anhand der Eulerschen Winkel zur Transformation des Bezugssystems oder dem Winkel zwischen der gewünschten und der tatsächlichen Ausrichtung eines bestimmten Vektors innerhalb dieses Bezugssystems parametrisiert werden.

3.2.10

Fehler der Leistungsreproduzierbarkeit (PRE)

Differenz aus den Mittelwerten des Leistungsfehlers, die über zwei Zeitintervalle innerhalb verschiedener Beobachtungszeiträume gemessen werden

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$PRE(\Delta t_1, \Delta t_2) = \overline{e_P}(\Delta t_2) - \overline{e_P}(\Delta t_1) = \frac{1}{\Delta t_2} \int_{\Delta t_2} e_P(t) dt - \frac{1}{\Delta t_1} \int_{\Delta t_1} e_P(t) dt$$

ANMERKUNG 2 Dabei sind die Zeitintervalle Δt_1 und Δt_2 durch ein Zeitintervall Δt_{PRE} getrennt.

ANMERKUNG 3 Die Dauer von Δt_1 und Δt_2 ist ausreichend lang, um kurzfristige Beiträge zu mitteln. Im Idealfall haben sie die gleiche Dauer. Siehe A.1.4 zur weiteren Erörterung der Wahl von Δt_1 , Δt_2 und Δt_{PRE} .

ANMERKUNG 4 Die zwei Intervalle Δt_1 und Δt_2 liegen innerhalb verschiedener Beobachtungszeiträume.

ANMERKUNG 5 Die mathematischen Definitionen der Indizes von PDE und PRE sind identisch. Der Unterschied liegt in der Verwendung: PDE wird verwendet um die Abweichung des Leistungsfehlers während eines langen Beobachtungszeitraums zu quantifizieren, während PRE verwendet wird, um die Genauigkeit mit der eine Beobachtung zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden kann, zu quantifizieren.

3.2.11

relativer Wissensfehler (RKE)

Differenz aus dem momentanen Wissensfehler zu einem bestimmten Zeitpunkt und seinem Mittelwert über ein Zeitintervall, das diesen Zeitpunkt enthält

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$RKE(t, \Delta t) = e_K(t) - \overline{e_K}(\Delta t) = e_K(t) - \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_K(t) dt \quad t \in \Delta t$$

ANMERKUNG 2 Wie hier angegeben ist die genaue Beziehung zwischen t und Δt nicht klar definiert. Je nach System, kann es geeignet sein diese genauer zu spezifizieren: z. B. wird t zufällig innerhalb Δt gewählt, oder t befindet sich am Ende von Δt . Siehe A.1.4 zur Festlegung des Intervalls Δt und A.1.3 zur Festlegung der Anforderungen an den Wissensfehler.

3.2.12

relativer Leistungsfehler (RPE)

Differenz aus dem momentanen Leistungsfehler zu einem bestimmten Zeitpunkt und seinem Mittelwert über ein Zeitintervall, das diesen Zeitpunkt enthält

ANMERKUNG 1 Dies wird ausgedrückt durch:

$$RPE(t, \Delta t) = e_P(t) - \overline{e_P}(\Delta t) = e_P(t) - \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_P(t) dt \quad t \in \Delta t$$

ANMERKUNG 2 Wie hier angegeben ist die genaue Beziehung zwischen t und Δt nicht klar definiert. Je nach System, kann es geeignet sein diese genauer zu spezifizieren: z. B. wird t zufällig innerhalb Δt gewählt, oder t befindet sich am Ende von Δt . Siehe A.1.4 zur weiteren Erörterung.

3.2.13

Robustheit

Fähigkeit eines gesteuerten Systems manche Leistungs- oder Stabilitätseigenschaften in einer Anlage, in Sensoren, Bedienelementen und/oder umgebungsbedingten Unsicherheiten aufrechtzuerhalten

ANMERKUNG 1 Die Robustheit der Leistung ist die Fähigkeit die Leistung in Anwesenheit von festgelegten begrenzten Unsicherheiten zu erhalten.

ANMERKUNG 2 Die Robustheit der Stabilität ist die Fähigkeit die Stabilität in Anwesenheit von festgelegten begrenzten Unsicherheiten zu erhalten.

3.2.14

Stabilität

Fähigkeit eines Systems, das begrenzten externen Störgrößen unterliegt, auf unbestimmte Zeit in einem begrenzten Bereich um eine Gleichgewichtslage oder in einer Gleichgewichtsbahn zu verbleiben

3.2.15

Stabilitätsreserve

maximale Abweichung einiger Parameter, die ein gegebenes Steuerungssystem beschreiben, bei der das System stabil bleibt

ANMERKUNG 1 Die in der klassischen Steuerungstechnik am häufigsten definierten Stabilitätsreserven sind die Amplitudenreserve, die Phasenreserve, die Modulreserve und — weniger häufig — die Totzeitreserve (siehe Abschnitt 5 dieser Norm).

3.2.16**statistische Gruppe**

Reihe aller physikalisch möglichen Kombinationen von Parameterwerten, die ein Steuerungssystem beschreiben

ANMERKUNG 1 Zum Beispiel: Bei Betrachtung der Lagedynamik eines Raumflugkörpers, schließen diese Parameter Masse, Trägheiten, modale Koppelfaktoren, Eigenfrequenzen und Dämpfungsgrade des Anhängermodus, die Standardabweichung des Sensorrauschens usw. mit ein. Dies bedeutet, dass alle physikalischen Parameter sich potenziell auf die Leistung des Systems auswirken können.

4 Abkürzungen

Die folgenden Abkürzungen sind festgelegt und werden in diesem Dokument verwendet:

Abkürzung	Bedeutung
AKE	absoluter Wissensfehler (en: absolute knowledge error)
APE	absoluter Leistungsfehler (en: absolute performance error)
LTI	lineares zeitinvariantes System (en: linear time invariant)
MIMO	Mehrgrößensystem (en: multiple input – multiple output)
MKE	mittlerer Wissensfehler (en: mean knowledge error)
MPE	mittlerer Leistungsfehler (en: mean performance error)
PDE	Fehler der Leistungsabweichung (en: performance drift error)
PDF	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (en: probability density function)
PRE	Fehler der Leistungsreproduzierbarkeit (en: performance reproducibility error)
RKE	relativer Wissensfehler (en: relative knowledge error)
RMS	quadratischer Mittelwert (en: root mean square)
RPE	relativer Leistungsfehler (en: relative performance error)
RSS	geometrische Summe (en: root sum of squares)
SISO	Eingrößensystem (en: single input – single output)

— Leerseite —

English version

Space engineering - Control performances

Ingénierie spatiale - Performance de systèmes de contrôle

Raumfahrttechnik - Steuerungsleistung

This European Standard was approved by CEN on 1 March 2014.

CEN and CENELEC members are bound to comply with the CEN/CENELEC Internal Regulations which stipulate the conditions for giving this European Standard the status of a national standard without any alteration. Up-to-date lists and bibliographical references concerning such national standards may be obtained on application to the CEN-CENELEC Management Centre or to any CEN and CENELEC member.

This European Standard exists in three official versions (English, French, German). A version in any other language made by translation under the responsibility of a CEN and CENELEC member into its own language and notified to the CEN-CENELEC Management Centre has the same status as the official versions.

CEN and CENELEC members are the national standards bodies and national electrotechnical committees of Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Former Yugoslav Republic of Macedonia, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and United Kingdom.



**CEN-CENELEC Management Centre:
Avenue Marnix 17, B-1000 Brussels**

Table of contents

Foreword	5
Introduction.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	8
3 Terms, definitions and abbreviated terms.....	9
3.1 Terms from other standards.....	9
3.2 Terms specific to the present standard	9
3.3 Abbreviated terms.....	14
4 Performance requirements and budgeting	15
4.1 Specifying a performance requirement	15
4.1.1 Overview	15
4.1.2 Elements of a performance requirement	16
4.1.3 Elements of a knowledge requirement	16
4.1.4 Probabilities and statistical interpretations.....	17
4.2 Use of error budgeting to assess compliance	17
4.2.1 Scope and limitations	17
4.2.2 Identification and characterisation of contributors.....	18
4.2.3 Combination of contributors	19
4.2.4 Comparison with requirement	21
5 Stability and robustness specification and verification for linear systems	23
5.1 Overview	23
5.2 Stability and robustness specification	24
5.2.1 Uncertainty domains	24
5.2.2 Stability requirement	26
5.2.3 Identification of checkpoints	26
5.2.4 Selection and justification of stability margin indicators	27
5.2.5 Stability margins requirements	27
5.2.6 Verification of stability margins with a single uncertainty domain.....	28

5.2.7	Verification of stability margins with reduced and extended uncertainty domains	28
Annex A (informative)	Use of performance error indices	29
A.1	Formulating error requirements.....	29
A.1.1	More about error indices	29
A.1.2	Statistical interpretation of requirements	30
A.1.3	Knowledge requirements.....	32
A.1.4	Specifying the timescales for requirements	32
A.2	More about performance error budgets.....	34
A.2.1	When to use an error budget.....	34
A.2.2	Identifying and quantifying the contributing errors	35
A.2.3	Combining the errors.....	36
A.2.4	Comparison with requirements.....	38
Annex B (informative)	Inputs to an error budget.....	40
B.1	Overview	40
B.2	Bias errors	41
B.3	Random errors.....	42
B.4	Periodic errors (short period)	44
B.5	Periodic errors (long period)	44
B.6	Distributions of ensemble parameters.....	45
B.7	Using the mixed statistical distribution	48
Annex C (informative)	Worked example	49
C.1	Scenario and requirements.....	49
C.2	Assessing the contributing errors.....	50
C.3	Compiling the pointing budgets.....	52
Annex D (informative)	Correspondence with the pointing error handbook	54
References		55
Bibliography		56
 Figures		
Figure A-1	: Example showing the APE, MPE and RPE error indices.....	30
Figure A-2	: Example showing the PDE and PRE error indices	30
Figure A-3	: Example of a statistical ensemble of errors.	31
Figure A-4	: The different ways in which a requirement for $P(\varepsilon < 1^\circ) > 0,9$ can be met	32
Figure A-5	: Illustration of how the statistics of the pointing errors differ depending on which statistical interpretation is used	32

Figure C-1 : Scenario example	50
-------------------------------------	----

Tables

Table B-1 : Parameters whose distributions are assessed for the different pointing error indices (knowledge error indices are similar).....	41
Table B-2 : Budget contributions from bias errors, where B represents the bias	42
Table B-3 : Budget contributions from zero mean Gaussian random errors.....	43
Table B-4 : Uniform Random Errors (range 0-C)	43
Table B-5 : Budget contributions for periodic errors (low period sinusoidal).....	44
Table B-6 : Budget contributions for periodic errors (long period sinusoidal)	45
Table B-7 : Some common distributions of ensemble parameters and their properties.....	47
Table C-1 : Example of contributing errors, and their relevant properties	51
Table C-2 : Example of distribution of the ensemble parameters	52
Table C-3 : Example of pointing budget for the APE index	53
Table C-4 : Example of pointing budget for the RPE index	53
Table D-1 : Correspondence between Pointing error handbook and ECSS-E-ST-60-10 indicators.....	54

Foreword

This document (EN 16603-60-10:2014) has been prepared by Technical Committee CEN/CLC/TC 5 "Space", the secretariat of which is held by DIN.

This standard (EN 16603-60-10:2014) originates from ECSS-E-ST-60-10C.

This European Standard shall be given the status of a national standard, either by publication of an identical text or by endorsement, at the latest by March 2015, and conflicting national standards shall be withdrawn at the latest by March 2015.

Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this document may be the subject of patent rights. CEN [and/or CENELEC] shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

This document has been developed to cover specifically space systems and has therefore precedence over any EN covering the same scope but with a wider domain of applicability (e.g. : aerospace).

According to the CEN-CENELEC Internal Regulations, the national standards organizations of the following countries are bound to implement this European Standard: Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, Former Yugoslav Republic of Macedonia, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey and the United Kingdom.

Introduction

This standard focuses on the specific issues raised by managing performance aspects of control systems in the frame of space projects. It provides a set of normative definitions, budget rules, and specification templates applicable when developing general control systems.

The standard is split up in two main clauses, respectively dealing with:

- Performance error indices and analysis methods.
- Stability and robustness specification and verification for linear systems.

This document constitutes the normative substance of the more general and informative handbook on control performance, issued in the frame of the E-60-10 ECSS working group. If clarifications are necessary (on the concepts, the technical background, the rationales for the rules for example) the readers should refer to the handbook.

NOTE It is not intended to substitute to textbook material on automatic control theory, neither in this standard nor in the associated handbook. The readers and the users are assumed to possess general knowledge of control system engineering and its applications to space missions.

1

Scope

This standard deals with control systems developed as part of a space project. It is applicable to all the elements of a space system, including the space segment, the ground segment and the launch service segment.

It addresses the issue of control performance, in terms of definition, specification, verification and validation methods and processes.

The standard defines a general framework for handling performance indicators, which applies to all disciplines involving control engineering, and which can be applied as well at different levels ranging from equipment to system level. It also focuses on the specific performance indicators applicable to the case of closed-loop control systems – mainly stability and robustness.

Rules are provided for combining different error sources in order to build up a performance error budget and use this to assess the compliance with a requirement.

NOTE 1 Although designed to be general, one of the major application field for this Standard is spacecraft pointing. This justifies why most of the examples and illustrations are related to AOCS problems.

NOTE 2 Indeed the definitions and the normative clauses of this Standard apply to pointing performance; nevertheless fully specific pointing issues are not addressed here in detail (spinning spacecraft cases for example). Complementary material for pointing error budgets can be found in ECSS-E-HB-60-10.

NOTE 3 For their own specific purpose, each entity (ESA, national agencies, primes) can further elaborate internal documents, deriving appropriate guidelines and summation rules based on the top level clauses gathered in this ECSS-E-ST-60-10 standard.

This standard may be tailored for the specific characteristic and constraints of a space project in conformance with ECSS-S-ST-00.

2

Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this ECSS Standard. For dated references, subsequent amendments to, or revision of any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this ECSS Standard are encouraged to investigate the possibility of applying the more recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the publication referred to applies.

EN reference	Reference in text	Title
EN 16601-00-01	ECSS-S-ST-00-01	ECSS System – Glossary of terms

Terms, definitions and abbreviated terms

3.1 Terms from other standards

For the purpose of this Standard, the terms and definitions from ECSS-S-ST-00-01 apply, in particular for the following terms:

error

performance

uncertainty

3.2 Terms specific to the present standard ¹

3.2.1 absolute knowledge error (AKE)

instantaneous value of the knowledge error at any given time

NOTE 1 This is expressed by:

$$AKE(t) = e_k(t)$$

NOTE 2 See annex A.1.3 for defining requirements on the knowledge error.

3.2.2 absolute performance error (APE)

instantaneous value of the performance error at any given time

NOTE This is expressed by:

$$APE(t) = e_p(t)$$

3.2.3 error index

parameter isolating a particular aspect of the time variation of a **performance error** or **knowledge error**

NOTE 1 A performance error index is applied to the difference between the target (desired) output of the system and the actual system output.

¹ As a preliminary note, the error signals introduced in clause 3.2 are very general. They represent any type of physical quantity (e.g. attitude, temperature, pressure, position). According to the situation and to the nature of the control system, they are scalar or multi-dimensional.

NOTE 2 A knowledge error index is applied to the difference between the actual output of the system and the known (estimated) system output.

NOTE 3 The most commonly used indices are defined in this chapter (APE, RPE, AKE etc.). The list is not limitative.

3.2.4 individual error source

elementary physical characteristic or process originating from a well-defined source which contributes to a **performance error** or a performance **knowledge error**

NOTE For example sensor noise, sensor bias, actuator noise, actuator bias, disturbance forces and torques (e.g. microvibrations, manoeuvres, external or internal subsystem motions), friction forces and torques, misalignments, thermal distortions, assembly distortions, digital quantization, control law performance (steady state error), jitter, etc.

3.2.5 knowledge error

difference between the known (estimated) output of the system and the actual achieved output

NOTE 1 It is denoted by e_K .

NOTE 2 Usually this is time dependent.

NOTE 3 Sometimes confusingly referred to as “measurement error”, though in fact the concept is more general than direct measurement.

NOTE 4 Depending upon the system, different quantities can be relevant for parameterising the knowledge error, in the same way as for the performance error. A degree of judgement is used to decide which is most appropriate.

NOTE 5 For example: the difference between the actual and the known orientation of a frame can be parameterised using the Euler angles for the frame transformation or the angle between the actual and known orientation of a particular vector within that frame.

3.2.6 mean knowledge error (MKE)

mean value of the knowledge error over a specified time interval

NOTE 1 This is expressed by:

$$\begin{aligned} MKE(\Delta t) &= \overline{e_K}(\Delta t) \\ &= \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_K(t) dt \end{aligned}$$

NOTE 2 See annex A.1.4 for discussion of how to specify the interval Δt , and annex A.1.3 for defining requirements on the knowledge error.

3.2.7 mean performance error (MPE)

mean value of the performance error over a specified time interval

NOTE 1 This is expressed by:

$$MPE(\Delta t) = \overline{e_p}(\Delta t) \\ = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_p(t) dt$$

NOTE 2 See annex A.1.4 for discussion of how to specify the interval Δt .

3.2.8 performance drift error (PDE)

difference between the means of the performance error taken over two time intervals within a single observation period

NOTE 1 This is expressed by:

$$PDE(\Delta t_1, \Delta t_2) = \overline{e_p}(\Delta t_2) - \overline{e_p}(\Delta t_1) \\ = \frac{1}{\Delta t_2} \int_{\Delta t_2} e_p(t) dt - \frac{1}{\Delta t_1} \int_{\Delta t_1} e_p(t) dt$$

NOTE 2 Where the time intervals Δt_1 and Δt_2 are separated by a non-zero time interval Δt_{PDE} .

NOTE 3 The durations of Δt_1 and Δt_2 are sufficiently long to average out short term contributions. Ideally they have the same duration. See annex A.1.4 for further discussion of the choice of Δt_1 , Δt_2 , Δt_{PDE} .

NOTE 4 The two intervals Δt_1 and Δt_2 are within a single observation period

3.2.9 performance error

difference between the target (desired) output of the system and the actual achieved output

NOTE 1 It is denoted by e_p .

NOTE 2 Usually this is time dependent.

NOTE 3 Depending upon the system, different quantities can be relevant for parameterising the performance error. A degree of judgement is used to decide which is most appropriate.

NOTE 4 For example: The difference between the target and actual orientation of a frame can be parameterised using the Euler angles for the frame transformation or the angle between the target and actual orientation of a particular vector within that frame.

3.2.10 performance reproducibility error (PRE)

difference between the means of the performance error taken over two time intervals within different observation periods

NOTE 1 This is expressed by:

$$\begin{aligned} PRE(\Delta t_1, \Delta t_2) &= \overline{e_p}(\Delta t_2) - \overline{e_p}(\Delta t_1) \\ &= \frac{1}{\Delta t_2} \int_{\Delta t_2} e_p(t) dt - \frac{1}{\Delta t_1} \int_{\Delta t_1} e_p(t) dt \end{aligned}$$

NOTE 2 Where the time intervals Δt_1 and Δt_2 are separated by a time interval Δt_{PRE} .

NOTE 3 The durations of Δt_1 and Δt_2 are sufficiently long to average out short term contributions. Ideally they have the same duration. See annex A.1.4 for further discussion of the choice of Δt_1 , Δt_2 , Δt_{PRE} .

NOTE 4 The two intervals Δt_1 and Δt_2 are within different observation periods

NOTE 5 The mathematical definitions of the PDE and PRE indices are identical. The difference is in the use: PDE is used to quantify the drift in the performance error during a long observation, while PRE is used to quantify the accuracy to which it is possible to repeat an observation at a later time.

3.2.11 relative knowledge error (RKE)

difference between the instantaneous knowledge error at a given time, and its mean value over a time interval containing that time

NOTE 1 This is expressed by:

$$\begin{aligned} RKE(t, \Delta t) &= e_k(t) - \overline{e_k}(\Delta t) \\ &= e_k(t) - \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_k(t) dt \quad t \in \Delta t \end{aligned}$$

NOTE 2 As stated here the exact relationship between t and Δt is not well defined. Depending on the system it can be appropriate to specify it more precisely: e.g. t is randomly chosen within Δt , or t is at the end of Δt . See annex A.1.4 for discussion of how to specify the interval Δt , and annex A.1.3 for defining requirements on the knowledge error.

3.2.12 relative performance error (RPE)

difference between the instantaneous performance error at a given time, and its mean value over a time interval containing that time

NOTE 1 This is expressed by:

$$\begin{aligned} RPE(t, \Delta t) &= e_p(t) - \overline{e_p}(\Delta t) \\ &= e_p(t) - \frac{1}{\Delta t} \int_{\Delta t} e_p(t) dt \quad t \in \Delta t \end{aligned}$$