

TECHNOSUP

Les FILIÈRES TECHNOLOGIQUES des ENSEIGNEMENTS SUPÉRIEURS

ROBOTIQUE

Traité de robotique 3 La partie commande

Gestuelle, commandes, précision,
vibrations, sécurité

Charles BOP

ANNOSSADRE UITEFO STANP...
& INF. SMOSS...
A... ..



La côte de l'ouvrage : 2-629-131

TABLE DES MATIERES

I – LA GESTUELLE	11
1. MOUVEMENTS ET DONNEES BIOMETRIQUES	11
1.1. Divers types de mouvements	11
1.2. Données biométriques	11
2. GESTES ELEMENTAIRES - POSTURES - ACTIVITES - L'ATTENTION.....	15
2.1. Application des gestes élémentaires à la robotique	15
2.2. Les activités	16
2.3. L'attention	16
3. POSTURES - MOUVEMENTS - TRANSPOSITION AU ROBOT.....	17
3.1. Localisation et estimation des distances	17
3.2. Pré positionnement - Positionnement du bras d'un manipulateur	18
3.3. Suivi de trajectoires du préhenseur, d'un outil	19
3.4. Minimisation du geste	22
4. AIRES ET VOLUMES ENGENDRES	24
4.1. Aires, volumes accessibles et de sécurité d'un manipulateur	24
4.2. Aires et volumes de travail	25
5. CONSTRUCTION DES MOUVEMENTS	25
5.1. Mode simplifié d'une commande en supervision - Robot adaptatif	26
5.2. Critères de construction des mouvements	26
5.3. Mesure des aires - Aires élémentaires	27
6. LA TRAJECTOIRE.....	27
6.1. Construction d'une trajectoire	27
6.2. Notions sur la synchronisation des axes	28
7. APPLICATION - BRAS MONTE SUR FAUTEUIL ROULANT	31
7.1. Les évolutions du bras	32
7.2. Gestion des vitesses - Approche - Dégagement - Grandes amplitudes	35
8. PLANIFICATION DES TRAJECTOIRES	39
8.1. Les mouvements	39
8.2. Approche - Saisie - Dégagement	39
9. PROBLEMES LIES AU MODELE GEOMETRIQUE - INVERSIONS - CRITERES.....	41
9.1. Trajectoire - Instrumentation du bras	41
9.2. Application - Inversion d'un modèle géométrique - Critères	42
II – TRAJECTOIRES - VOLUMES - COURBES DE BEZIER – B-SPLINES	51
1. CONSTRUCTION DE COURBES ET D'OBJETS - VISUALISATION.....	51
1.1. Construction et approximation des courbes, des surfaces et des objets	51
1.2. Représentation des excursions des segments d'un robot manipulateur	53
1.3. Méthodes usuelles	54
1.4. Visualisation dans l'espace à trois dimensions - Perspectives	55
1.5. Entrées - Sorties graphiques - Variations des distances et des orientations	56

2. POLYNOME ET COURBES DE BEZIER.....	57
2.1. Le polynôme de Bézier - Définition par une équation vectorielle	57
2.2. Application à une représentation plane	58
2.3. Propriétés des courbes de Bézier	60
2.4. Multiplicité des points de contrôle et attractions	60
2.5. Caractéristiques et utilisations des courbes de Bézier	61
3. LES COURBES B-SPLINES	62
3.1. Courbes B-splines	62
3.2. Les fonctions de mélange ou de pondération	63
3.3. Propriétés des courbes B-splines	64
4. POLYNOMES D'INTERPOLATION	65
4.1. Polynôme d'interpolation de Lagrange	65
4.2. Interpolation par splines cubiques	67
III – COMMANDES D'AXES.....	70
1. LOIS DE CONSIGNES	70
1.1. Nombre et dépendance des axes	70
1.2. Loi de conduite	71
1.3. Maintien de la précision	73
1.4. Gain et précision d'un servomécanisme	73
2. PERFORMANCES DYNAMIQUES.....	75
2.1. Exigences de l'utilisateur	75
2.2. Réponses à apporter par le concepteur	76
3. LA STABILITE	77
3.1. Exigences de l'utilisateur	77
3.2. Réponses à apporter par le concepteur	78
3.3. Stabilité des systèmes de commande en boucle fermée	80
4. ORDRE DES SYSTEMES - SCHEMAS - FONCTIONS DE TRANSFERT.....	80
4.1. Système du premier ordre - Constante de temps	80
4.2. Système du second ordre	82
4.3. Intégration et précision	83
4.4. Fonction de transfert F - T	85
4.5. Chaînes de commandes - Fonctions de transfert - Performances	86
4.6. Compléments sur la précision et la stabilité	88
4.7. Corrections dans les commandes	93
4.8. Les retours dérivés d'une commande en position	93
4.9. Commandes optimales d'un axe	94
4.10. Schémas de montages d'axes	96
4.11. Les fonctions de commandes d'axes - Conduite multiaxes	98
5. ELEMENTS DE TRAJECTOIRES - CORRECTIONS - INTERPOLATIONS.....	98
5.1. Trajectoires élémentaires et corrections	98
5.2. Interpolations	99
5.3. Analyseurs différentiels numériques	102

IV – LES COMMANDES DES ROBOTS	108
1. SCHEMA STRUCTUREL D'UNE COMMANDE DE ROBOT.....	108
2. STRUCTURES GENERALES.....	113
2.1. Etapes préliminaires à la commande d'axe	113
2.2. Développement d'une application	114
2.3. Programmation hétérogène de plusieurs machines et robots	114
2.4. Commande multiaxiale avec boucles de contrôles	115
2.5. Télémanipulation - Implication de l'opérateur dans la boucle de commande	115
V – COMMANDE GEOMETRIQUE.....	116
1. ARCHITECTURES USUELLES.....	116
1.1. Anthropomorphe - Gestuelle - Accès - Equations pour la commande	116
1.2. Agrandissement de l'évolution du porteur anthropomorphe par une glissière	122
1.3. Architecture Scara	122
2. ROBOTS MOBILES	124
2.1. Robot à huit pattes ou jambes	124
2.2. Robot de type araignée à six pattes, chaque patte est conçue avec trois pivots	127
3. COOPERATION - GESTES - ACCES - SAISIE	128
3.1. Coopération entre robots et machines	128
3.2. Comportement d'un robot mobile vis-à-vis d'une tâche	130
4. ALGORITHMES ET SCHEMAS DE COMMANDES GEOMETRIQUES	131
4.1. Algorithme	131
4.2. Commande du modèle géométrique	132
5. COMMANDE STOCHASTIQUE	134
5.1. Génération stochastique des trajectoires - Environnement sans contrainte	134
5.2. Génération stochastique avec contraintes - Gestion de la vitesse	137
VI – COMMANDE CINEMATIQUE.....	141
1. LES MODELES DIRECTS.....	141
1.1. Modèle variationnel - Matrice Jacobienne	141
1.2. Modèle cinématique - Utilisation des torseurs cinématiques	142
1.3. Application à une architecture	144
2. MODELES POUR LA COMMANDE - METHODE ANALYTIQUE	145
2.1. Analyse des singularités	146
2.2. Contournement des singularités	146
3. MODELES POUR LA COMMANDE - METHODES NUMERIQUES	147
3.1. Inversion d'une matrice carrée - Méthode de calcul	148
3.2. Méthode de Gauss - Méthode des variables principales	148
3.3. Inverse généralisée	149
3.4. Pseudo - inverse appliquée à la commande cinématique	151
3.5. Algorithme de Greville - Méthode itérative de calcul de la pseudo - inverse	153
3.6. Détermination du vecteur Z - Prise en compte d'un second critère	155

4. SCHEMAS DE COMMANDES CINEMATQUES.....	156
4.1. Commande Proportionnelle - Dérivée - PD	156
4.2. Commande avec anticipation de vitesse ou prédictive	158
4.3. Caractéristiques des commandes PD et PID	158
4.4. Commande en accélération	160
5. ACCESSIBILITES D'UNE STRUCTURE A N DEGRES DE LIBERTE	160
VII – COMMANDE EN FORCE	164
1. DIAGRAMMES FONCTIONNELS DE COMMANDES	164
1.1. Diagrammes selon les technologies	164
1.2. Adaptabilité active	165
1.3. Commandes dans l'espace opérationnel	165
VIII – COMMANDE DYNAMIQUE.....	167
1. FORMULATION DE LA COMMANDE DYNAMIQUE	167
1.1. Expressions de la commande dynamique	167
1.2. Les contraintes pénalisantes	168
2. COMMANDES DANS L'ESPACE GENERALISE OU ARTICULAIRE	169
2.1. Equations de commandes - Approximations - Erreurs d'estimations - Schémas	169
2.2. Etude comportementale des régulateurs PD et PID	170
2.3. Commandes par régulateurs dans l'espace généralisé	171
3. COMMANDES DANS L'ESPACE OPERATIONNEL.....	172
3.1. Conversion des variables opérationnelles en variables généralisées	172
3.2. Schéma général de commande dans l'espace opérationnel	173
3.3. Recherche d'un modèle exact	173
4. AMELIORATION DE LA RAPIDITE DE LA COMMANDE DYNAMIQUE.....	174
4.1. Commandes analogiques et numériques	174
4.2. Approximations	175
4.3. Commandes adaptatives	176
5. COMMANDES PAR DECOUPLAGE NON LINEAIRE DANS LES DEUX ESPACES.....	177
5.1. Commande dans l'espace articulaire ou généralisé	177
5.2. Commande prédictive dans l'espace généralisé	178
5.3. Robustesse d'une commande vis-à-vis des erreurs de la modélisation	179
5.4. Commande dans l'espace opérationnel - Deux méthodes	179
5.5. Commande dans l'espace opérationnel : forces/couples - position	181
5.6. Commande des robots flexibles	181
IX – COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE - FUZZY LOGIC.....	183
1. ELEMENTS THEORIQUES	183
1.1. Les variables linguistiques	184
1.2. Les fonctions d'appartenance	184
1.3. Définitions - Caractéristiques d'un ensemble flou	187
1.4. Les opérations sur les ensembles flous	189
1.5. Comparaison entre les régulations classiques et floues	190

2. COMMANDE FLOUE - FUZZIFICATION - INFERENCE - DEFUZZIFICATION	191
2.1. Structures de commandes floues	191
2.2. Fuzzification	193
2.3. L'inférence floue	195
2.4. Défuzzification	198
2.5. Les défuzzifications [som-prod], [max-min], [max-prod]	199
2.6. Opérations dans les régulateurs	202
2.7. Avantages et inconvénients de la commande floue	206
3. APPLICATIONS	206
3.1. Régulateur à une entrée, une vitesse, une température...	206
3.2. Régulation par correcteur flou à deux entrées	207
3.3. Reconnaissance des couleurs par logique floue	212
3.4. Commandes de la gestuelle et des robots mobiles	214
X – LA PRECISION	221
1. LES DEFAUTS	221
1.1. Origines des défauts	221
1.2. Erreurs de déformations d'un segment - Modélisations - Mises en équations	222
1.3. Erreurs locales - Modélisations - Equations	227
1.4. Matrices des erreurs d'un segment et d'une chaîne articulée	231
1.5. Déformations d'une chaîne articulée	232
1.6. Application à une structure à trois axes - Les trois modélisations	235
2. PROTOCOLES DE MESURES	236
2.1. Précision statique d'une chaîne articulée	236
2.2. Précisions cinématique et dynamique -Performances -Estimations -Répétitivité	237
2.3. Les méthodes de mesures usuelles - Qualités des mesures	239
2.4. Machines à mesurer planes et tridimensionnelles	240
3. AMPLIFICATION DES ERREURS D'UNE ARCHITECTURE	243
3.1. Amplification des erreurs par la longueur de la chaîne	243
3.2. Paramétrage d'une architecture réelle - Erreurs primaires	244
4. SOLLICITATIONS - QUANTIFICATIONS - DEFORMATIONS D'UN ELEMENT	246
4.1. Les déformations d'un élément - Flexion déviée	247
4.2. Calcul des contraintes et des déformations d'un élément <i>i</i>	248
5. SYSTEMES ISOSTATIQUES SOUS CHARGES - ENERGIES DE DEFORMATIONS	253
5.1. Energie potentielle de déformation dans un segment	253
5.2. Principe de Clapeyron appliqué à la flexion des segments et des architectures	256
5.3. Principe de superposition des petits déplacements ou d'indépendance effet/force	258
5.4. Matrice des coefficients d'influence	258
5.5. Théorèmes de réciprocité des travaux et des déplacements - Betti et Maxwell	259
5.6. Energie interne élastique	262
5.7. Théorème de Castigliano	262
5.8. Utilisation d'une charge fictive	265
5.9. Application des charges fictives à une chaîne ouverte - Intégrale de Mohr	267
5.10. Calculs et diagrammes des sollicitations d'une structure	268
5.11. Sollicitations simples et composées	270
5.12. Forces et déplacements généralisés - Applications aux structures	272

6. SYSTEMES HYPERSTATIQUES	274
6.1. Théorème de Ménabréa - Résolution de structures hyperstatiques	274
6.2. Hyperstatismes extérieurs	274
6.3. Hyperstatismes intérieurs des chaînes fermées	279
6.4. Robots parallèles - Flambement des barres et des actionneurs linéaires	282
XI – LES VIBRATIONS.....	285
1. ELEMENTS UTILES	286
1.1. Mouvement sinusoïdal résultant de même période et de même direction	286
1.2. Mouvements rectangulaires de mêmes pulsations à périodes égales	287
1.3. Théorème de Fourier	287
2. ANALYSE DES VIBRATIONS.....	288
2.1. Aspect expérimental - Systèmes à n degrés de liberté	288
2.2. Analyse mathématique des mouvements à un et n ddl - Pulsations - Fréquences	289
3. MOUVEMENTS VIBRATOIRES A UN DEGRE DE LIBERTE	289
3.1. Les différents types	289
3.2. Système à 1 ddl - Mouvement conservatif - Oscillations libres - Fût élastique	291
3.3. Applications et recherche des caractéristiques	292
3.4. Oscillations forcées d'un fût à 1 degré de liberté sans amortissement	298
3.5. Système à 1 degré de liberté - Amortissement visqueux - Mouvement libre	300
3.6. Système à 1 degré de liberté - Amortissement visqueux - Mouvement forcé	306
3.7. Amortissement par frottement sec - Système à 1 degré de liberté	310
XII – VIBRATIONS DES STRUCTURES A N DEGRES DE LIBERTE	313
1. CARACTERISTIQUES ET ELEMENTS DE MECANIQUE	313
1.1. Caractéristiques des mouvements	313
1.2. Eléments de mécanique	313
1.3. Coefficients énergétiques associés à des efforts	315
1.4. Equations de Lagrange et coefficients énergétiques	317
1.5. Théorème de l'énergie cinétique pour un ensemble fini de solides	318
1.6. Applications - Calcul des coefficients énergétiques	318
2. MISES EN EQUATIONS - PULSATIONS - NŒUDS DE VIBRATIONS.....	320
2.1. Expressions matricielles des équations de Lagrange pour n degrés de liberté	320
2.2. Résolution - Systèmes conservatifs à n degrés de liberté	322
2.3. Valeurs et directions propres - Procédé numérique - Fréquence propres - Modes	323
2.4. Résolution - Systèmes non conservatifs, dissipatifs à n degrés de liberté	325
2.5. Résolution - Systèmes non conservatifs à mouvements forcés - Impéd. complexe	327
2.6. Oscillations forcées - Régime transitoire - Matrice d'impédance opérationnelle	327
3. APPLICATIONS - SYSTEMES COUPLES.....	328
3.1. Système conservatif à 2 masses, 2 paramètres de position - Libre aux extrémités	328
3.2. Chaîne oscillante liée à une extrémité, libre à l'autre - Système conservatif	329
3.3. Vibrations longitudinales d'une transmission liée au bras - Système conservatif	330
3.4. Etouffeur de vibrations à 2 degrés de liberté et à mouvement forcé	336
3.5. Couplage de rigidité et amortissement d'un segment - Equations de Lagrange	340
3.6. Couplage de rigidité avec amortissement et mouvement forcé	341
3.7. Chaînes élastiques	342

3.8. Fréquences d'oscillations propres d'une structure de forme quelconque	345
3.9. Bras monté sur chariot mobile - Système couplé - Pendule d'Euler	350
3.10. Vibrations de trois bras articulés - Calcul des pulsations et des modes	354
XIII – VIBRATIONS DANS LES TRANSMISSIONS	355
1. SYSTEMES DE TRANSMISSIONS - SOLLICITATIONS ET VIBRATIONS.....	355
1.1. Chaîne : moteur - réducteur - transmission - récepteur	355
1.2. Arbre de transmission à 1 degré de liberté - Module de Coulomb - Raideur	356
1.3. Détermination du module de Coulomb et de la raideur d'une structure	357
1.4. Détermination précise d'un moment d'inertie d'une structure complexe	357
1.5. Fût d'inertie non négligeable et volant suspendu - Système conservatif	357
1.6. Familles de systèmes adaptables aux segments de robots	359
2. APPLICATIONS	361
2.1. Deux volants libres reliés par un arbre de transmission de rigidité k	361
2.2. Système conservatif à 3 degrés de liberté - Moto réducteur bloqué	363
2.3. Transmission à 2 degrés de liberté - Système conservatif - Frein bloqué	365
2.4. Transmission à 1 degré de liberté - Système non conservatif - Frein bloqué	366
2.5. Arbre bloqué aux deux extrémités - 2 degrés de liberté - Système conservatif	367
2.6. Qualités des couplages - Lâche - Serré	370
2.7. Les mouvements forcés	370
2.8. Poignet à 2 axes avec raideur - Amortissement et actions extérieures	370
2.9. Couplage gyroscopique d'un poignet 3 axes - Préhenseur - Objet ou outil	372
2.10. Linéarisation des équations des mouvements	373
3. ACCOUPLEMENTS TEMPORAIRES - ETOUFFEURS DE VIBRATIONS.....	373
3.1. Accouplement dynamique de deux volants ou systèmes	374
3.2. Entraînement d'un volant et d'un récepteur	375
3.3. Régulation couple/vitesse	375
3.4. Etouffeurs de vibrations sur des systèmes en mouvement	376
3.5. Elasticité et amortissements dans les paliers	378
3.6. Les élasticités dans les chaînes fermées planes	379
XIV – LA SECURITE	380
1. PREVENTION ET SECURITE.....	380
1.1. Les différentes sécurités	381
1.2. Principes et techniques d'obtention	381
1.3. Les fonctions des systèmes de sécurité	382
1.4. La sécurité est l'affaire de tous	382
1.5. Taux de sécurité	382
2. LES DEFAILLANCES	383
3. LES CAUSES QUI CONDUISENT A L'ACCIDENT	383
ANNEXE - RESOLUTION NUMERIQUES D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES	390
INDEX.....	395
BIBLIOGRAPHIE	400