

PRISE EN COMPTE DES ASPECTS MUSCULAIRES DANS UN MODÈLE BIOMÉCANIQUE DU CORPS HUMAIN : MOBIUS, PREMIÈRE APPROCHE STATIQUE

RUISSEAU JEAN YVES

Délégation Générale pour l'Armement – DCE / Division Facteurs Humains - BP 36
F - 49460 - Montreuil Juigné – France

TRAMECON ALAIN, ALLAIN JEAN CHRISTOPHE, HAUG EBERARDT

(2) ESI Group - Silic 270
F - 94578 - Rungis Cedex – France

Résumé

Mobius est un modèle numérique qui permet de prendre en compte la contrainte musculaire (efforts, forces développées, durée d'application, etc.) de manière précise dans le processus de conception d'un équipement individuel porté par un opérateur.

Mots Clés : modèle - biomécanique - muscle - ergonomie

CONSIDERATION OF MUSCULAR ASPECTS IN A BIOMECHANICAL MODEL ON THE HUMAN BODY: MOBIUS, FIRST STATIC APPROACH

Abstract

MOBIUS is a digital model which allows taking into account muscular stress (efforts, forces developed, duration of exertion, etc.) as accurate as possible during the design process of an individual equipment used by an operator.

1 Besoin initial

L'objectif de cette étude est de présenter MOBIUS, logiciel de modélisation permettant de rendre compte de manière réaliste de la contrainte musculaire lors du maintien d'une charge ou d'un objet dans une posture déterminée.

Dans le cadre du développement de plus en plus rapide des équipements utilisés par les opérateurs, il devient nécessaire d'utiliser des moyens de plus en plus performants pour leur conception. En ergonomie, la modélisation est un outil qui permet d'évaluer de nombreuses solutions a priori. La modélisation du corps humain est souvent un problème complexe qui présente différents problèmes suivant les aspects abordés (anthropométrie, biomécanique, mouvements réalistes, etc.). Pour certaines applications liées au dimensionnement d'un espace de travail, un modèle numérique géométrique plus ou moins détaillé peut être suffisant. Pour d'autres, plus complexes et faisant intervenir, par exemple, des contraintes biomécaniques liées aux efforts engendrés par la manipulation d'un objet dans l'espace de travail, il est souvent nécessaire, voire indispensable d'accéder à des données telles que les efforts internes que doit développer l'opérateur, afin de connaître ou estimer :

- quelle peut être la durée de maintien de la posture envisagée,
- quels sont les groupes musculaires mis en jeu, et leur niveau d'activation,
- dans quel ordre sont-ils mis en jeu,

pour d'être en mesure d'optimiser l'objet en conception, entre autres en ce qui concerne la répartition de sa masse, les centres et les moments d'inertie, etc.

2 Domaine d'emploi du modèle numérique

Le domaine d'emploi de MOBIUS est celui du combattant isolé (fantassin), porteur ou non de tout ou partie de ses équipements de combat, utilisant une arme individuelle tenue au moins par une main. Dans la définition actuelle du modèle, seule la position debout est accessible directement et permet de comparer les contraintes générées par différents types d'armements ou d'équipements individuels pour des conditions d'emploi déterminées.

D'autres postures – à genoux, couché – peuvent être dérivées de la posture précédente, mais ne prennent pas en compte à ce jour les contraintes musculaires internes liées au maintien postural.

3 Structure et fonctionnement de MOBIUS

La base du modèle MOBIUS comporte une géométrie maillée définie sur le modèle rigide articulé ROBBY2, obtenue à partir d'éléments de la bibliothèque Viewpoint Datalabs. Elle correspond à un individu standard, représentatif du 50^{ème} percentile des populations issues des études liées à la sécurité automobile.

Le modèle est segmenté en neuf parties distinctes, reliées par des joints (articulations), et permet de représenter la majorité des postures adoptées par le combattant isolé lors de son activité.

Articulation	Position	Nombre de joints
Cou	C1 – Crâne	1 joint
	T1 - C7	1 joint
Lombaire	L1- T12	1 joint
	Sacrum - C7	1 joint
Sterno claviculaire		1 joint
Scapulo claviculaire		1 joint
Scapulo thoracique		1 joint
Scapulo humérale		1 joint
Coude	humerus – ulna	1 joint cylindrique
	ulna – radius	1 joint sphérique
Poignet	radius – main	1 joint cylindrique
	ulna – main	1 joint sphérique
Au total	24 joints	Représentant 14 articulations différentes

Le système musculaire est représenté sous forme d'éléments unidirectionnels, matérialisés par des barres rigides, dont les caractéristiques de force sont cohérentes avec le modèle de muscle de Hill. L'ensemble des muscles représentés est listé dans le tableau ci-dessous. L'insertion osseuse de chaque groupe musculaire est en accord avec la réalité.

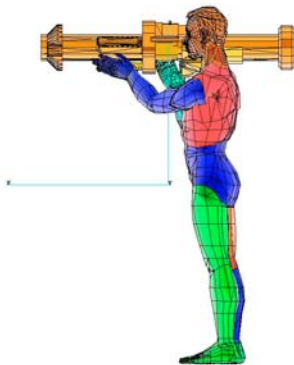
Segment	Muscle	Nombre de faisceaux représentés	
Tronc	Trapezius	6 faisceaux	
	Serratus anterior	9 faisceaux	
	Levator anguli scapulae	5 faisceaux	
	Rhomboideus minor	2 faisceaux	
	Rhomboideus major	1 faisceau	
	Pectoralis	7 en 2 groupes	
	Latissimus dorsi	5 faisceaux	
	Subclavius	1 faisceau	
	Sterno cleido mastoideus	2 faisceaux	
	Lumped hyoid	1 faisceau	
	Bras	Deltoidus	3 faisceaux
		Subscapularis	3 faisceaux
		Teres major	1 faisceau
Infraspinatus		3 faisceaux	
Teres minor		1 faisceau	
Supraspinatus		3 faisceaux	
Triceps brachii		3 faisceaux	
Biceps brachii		2 faisceaux	
Brachialis		1 faisceau	
Brachoradialis		1 faisceau	
Coracobrachialis		1 faisceau	
Supinator		1 faisceau	
Pronator teres		1 faisceau	
Square pronator		1 faisceau	
Anconeus		1 faisceau	
Flexor digitorum sublimis		1 faisceau	
Flexor pollicis longus		1 faisceau	
Flexor carpi radialis		1 faisceau	
Flexor carpi ulnaris		1 faisceau	
Extensor carpi radialis longus		1 faisceau	
Extensor carpi radialis brevis		1 faisceau	
Extensor carpi ulnaris		1 faisceau	
Extensor digitorum commis		1 faisceau	
Soit	33 muscles par côté	représentant 73 faisceaux différents	
Au total	66 muscles	répartis en 146 faisceaux musculaires	

MOBIUS autorise la représentation de l'évolution de la contraction musculaire lors du maintien d'une charge, par la mise en jeu des membres supérieurs, avec ou sans appui sur le tronc, et l'estimation du taux de contraction des différents muscles impliqués dans cet effort. Les muscles sont mis en jeu séquentiellement en fonction de l'effort à déployer, en tenant compte des effets agoniste / antagoniste lors du développement de l'effort. De même l'équilibre entre les côtés droit et gauche est optimisé afin d'éviter la « chute » du mannequin du côté où l'effort est appliqué majoritairement.

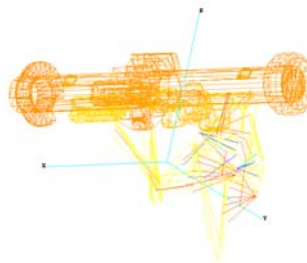
A ce jour les contraintes sont appréciées :

- de manière statique dans le modèle développé : les aspects dynamiques éventuels liés au déplacement de l'objet porté, quelle que soit l'origine de ce déplacement ne sont pas pris en compte,
- à partir de la connaissance des caractéristiques physiologiques des muscles mis en œuvre, chaque muscle ou groupe de muscle étant représenté avec ses points d'insertion sur le squelette et les directions d'application des efforts qui y transitent,
- en fonction des types de liaison existant entre l'opérateur et la charge (l'arme, dans notre cas), définies comme dans les codes de calcul usuels, en termes de glissement, frottement, etc.

Elles pourraient être étendues ultérieurement aux aspects dynamiques. Les résultats fournis par MOBIUS comportent des données relatives à la contraction musculaire (i.e. de taux d'activation, ou de force totale développée par les muscles en fonction des efforts externes auxquels ils sont soumis).



Représentation globale du mannequin



Détail des barres schématisant l'ensemble des muscles pris en considération

Détail des barres schématisant l'ensemble des Tests de validation réalisés

Afin d'optimiser les caractéristiques du modèle, différents tests ont été réalisés. Ils ont permis de valider les algorithmes développés et les hypothèses retenues initialement. Deux articulations ont été choisies : coude et épaule.

3.1 flexion du coude

Ces tests ont été effectués afin :

- de déterminer la méthode de recueil des informations pertinentes : choix entre recueil externe, par accélérométrie et imagerie rapide (solution retenue), ou recueil « interne », par électromyographie de surface, afin de savoir comment accéder au degré d'activation d'un muscle ou groupe de muscles,
- de préciser les contraintes expérimentales concernant les étendues de mesures permettant de couvrir l'ensemble des amplitudes des mouvements possibles dans le cadre de la manipulation d'une arme (limites fonctionnelles dans les différents degrés de liberté des articulations mises en jeu).

L'objectif principal est de mesurer l'influence du degré de contraction musculaire global sur la cinématique de l'avant-bras après perturbation de l'équilibre initial. Ceci implique de faire l'hypothèse qu'au moment de l'application de la perturbation, l'individu n'a pas le temps de modifier son état musculaire, le temps de réaction volontaire étant estimé à plus de 200 millisecondes.

Dans ces conditions, le test donne accès à la raideur instantanée de l'articulation considérée, qui est due aux forces de tension entre le bras et l'avant-bras. Vingt six cas différents ont été testés, les paramètres ayant fait l'objet de variations étant :

- la précharge (2 ou 4 kg),
- le degré de contraction volontaire au départ (0, 50 ou 100%),
- le sujet d'expérience (deux hommes, une femme)

3.2 rétropulsion, antépulsion, abduction et adduction de l'épaule

La différence fondamentale de ces tests par rapport aux précédents concerne le type de perturbation. Dans ce cas, il s'agit de perturber l'équilibre établi non pas par un apport de masse, mais par un retrait de masse de type « Quick release ». L'essai consiste à demander au sujet de maintenir une position donnée avec un certain niveau de chargement et un niveau de contraction volontaire donné. Lorsque l'équilibre statique est atteint, l'expérimentateur relâche le chargement générant ainsi le mouvement souhaité. La réponse obtenue est conditionnée par la raideur articulaire du sujet.

3.3 Résultats obtenus sur un cas concret

Une simulation complète a été effectuée sur un cas concret, afin de :

- valider les principes retenus dans le développement du logiciel,
- vérifier que les données obtenues soient cohérentes avec les données réelles.

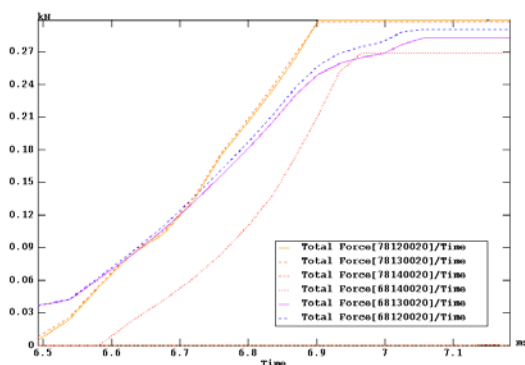
L'armement retenu pour cette phase est un matériel de type Anti Char de 112 mm, portable à deux mains avec un appui au niveau de l'épaule de l'opérateur. Ce cas présentait les avantages suivants :

- mise en jeu d'un joint au niveau de chacune des mains,
- mise en jeu d'un appui au niveau de l'épaule,
- accélération au départ du coup pouvant être considérée comme nulle.

3.4 Simulation effectuée

La position de tir a été extrapolée de celle pratiquée par les experts de la manipulation de cette arme, afin de compenser les contraintes liées à la position debout (qui n'est pas, pour ce type de matériel, une position canonique).

Toutefois, cette position est suffisamment proche de la position de tir « à genoux » pour lui être assimilable, au moins en première approche. L'arme modélisée est composée de 13 éléments différents, dont la masse a été déterminée en fonction de critères liés au matériau la composant et au volume de celui-ci. Cette méthode a été employée dans la mesure où aucun découpage précis en terme de masses et d'inerties n'était disponible lors de la simulation. Il est clair qu'en théorie ces données devraient être fournies préalablement à toute simulation. Différentes variations ont été effectuées sur les masses de certains composants afin d'apprécier les modifications induites sur la contrainte musculaire de l'opérateur. Un exemple de résultats est présenté ci-après.



La figure ci-contre montre en fonction du temps, les pourcentages de contraction des différents groupes musculaires des membres supérieurs droit (781xxxxxx) et gauche (681xxxxxx) représentant les trois faisceaux de chaque triceps. Les résultats obtenus sont conformes aux résultats escomptés : contraction plus importante du côté droit et précédant la contraction côté gauche.

4 Applications possibles du modèle

Les applications de ce type de modèle sont nombreuses dans tous les domaines où les problèmes de conception d'outils de travail par exemple peuvent faire appel à des données chiffrées sur les contraintes musculaires induites par le port ou la manipulation d'objets pesants qu'il est impératif d'optimiser lors des phases de conception.

Les évolutions souhaitables, au regard de l'expérience acquise avec MOBIUS depuis sa mise en service, concernent deux aspects principaux :

- dans une première étape, mettre en œuvre des outils numériques d'"optimisation", l'objectif étant que le logiciel détermine lui-même une position d'équilibre voisine de celle imposée, en minimisant des paramètres tels que la dépense énergétique, l'écart par rapport à la position idéale, l'effort, etc.
- dans une deuxième étape, simuler un mouvement simple (par exemple le geste de porter une arme d'une position basse à une position de visée), en définissant le mouvement par une succession d'états intermédiaires suffisamment proches les uns des autres et prédéterminés expérimentalement.

Ultérieurement, le passage à un modèle complet de corps humain pourrait être envisagé, mais cela nécessite de contrôler non seulement les postures locales, mais aussi la stabilité globale du mannequin en fonction de la gravité. Une autre voie d'amélioration concernerait le couplage de MOBIUS avec un mannequin numérique existant, afin de faciliter sa mise en posture, en tirant partie des potentialités de ce mannequin, tant en ce qui concerne l'anthropométrie (actuellement MOBIUS ne peut représenter qu'un seul type d'individu), que la cinématique posturale.

Références

- [1] Kapandji, I.A. (1994) Physiologie articulaire, Vol. 1-3
- [2] Gray's Anatomy, Eds : Williams, P.L. ; Warwick, R. ; Dyson, M. ;Bannister, L. (1989)
- [3] Seireg, A. Biomechanical analysis of the musculoskeletal structure for medicine and sports, 1989.