

齊次變換人體結構數學模式在抬舉動作之研究

The Study on The Lifting Task by The Mathematical Model of Human Skeleton with Homogeneous Transformation

宋立民

輔英科技大學職業安全衛生系，大寮鄉永芳村進學路 151 號，高雄縣，臺灣

pl032@mail.fy.edu.tw

摘要

人體結構為開放型多自由度的空間機構，人體任何作業活動皆可利用空間機構運動來模擬。本文以齊次變換人體結構數學模式以及生物力學為基礎，發展抬舉動作的生物力學分析模式。探討抬舉動作的重物抬舉過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝的生物力學分析。同時，結合人體計測資料庫，研究國人在抬舉動作的重物抬舉過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝承受的軸向力、徑向力與力矩。相關研究成果可以提供國人設計抬舉動作流程的參考，亦可做為從事人工物料處理者自我檢核肌肉骨骼傷害風險的依據。使國人在作業場所擁有安全的工作環境，降低肌肉骨骼傷害風險，避免造成肌肉骨骼的職業傷害。本文研究成果亦可應用於物理治療以及運動分析的研究範疇。

關鍵詞：齊次變換、人體結構、抬舉動作

Abstract

The human skeleton is the spatial mechanism of open loop type with multiple degrees of freedom. The human tasks are simulated by the kinematics of spatial mechanisms. In this paper, based on the biomechanics and mathematical model of human skeleton with homogeneous transformation, the biomechanical models of lifting tasks are developed. For the lifting tasks, the forces and torques acting on the wrists, elbows, shoulders, waist, coxae, knees and ankles are investigated. The anthropometric data is applied to analyze the axial, radial forces and torques acting on the joints during the lifting tasks. The results are useful to design the procedures for the lifting tasks, and to assess the risks of musculoskeletal hurt. The achievements presented in this paper are advantageous to prevent from the musculoskeletal hurt. The results are also applied to investigate the fields of physical therapy, and kinematic analysis.

Keywords: homogeneous transformation, human skeleton, lifting task

1.前言

在作業場所中，人工物料處理佔有非常重要

的比重，其中抬舉動作更具有高度的肌肉骨骼傷害風險。惟有讓作業場所主管、人工物料處理流

程設計員以及現場作業人員了解國人在重物抬舉過程中，抬舉動作在手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝的受力狀況，才能規劃適當的抬舉動作流程，採取合適的抬舉動作方式，有效降低肌肉骨骼傷害風險。在宋立民(2003)發展的齊次變換人體結構數學模式中，利用齊次變換與空間機構的理論，分析人體結構聯結關節的自由度，建立齊次變換人體結構座標系統包括頭頸、軀幹、上肢與下肢四部分，探討齊次變換參數與人體動作型態運動參數的關係。本文以宋立民(2003)建立齊次變換人體結構數學模式的研發成果為基礎，發展抬舉動作的生物力學分析模式。針對抬舉動作，探討在重物抬舉的過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝的生物力學分析。同時，結合王茂駿教授等多位學者(2002)完成的「台灣地區人體計測資料庫手冊」，研究國人在抬舉動作的重物抬舉過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝等關節承受的軸向力、徑向力與力矩。主要研究目的為提供國人從事抬舉動作相關工作的參考，使國人在作業場所擁有安全的工作環境，降低肌肉骨骼傷害的風險，避免造成肌肉骨骼的職業傷害。

國內外有關本文的研究情況，在人體作業姿勢部分，王茂駿教授(1993)評估手套與姿勢對工作最大施力的影響。Lee 和 Chiou(1995)探討護理人員作業姿勢的人因工程分析。Sue(1996)探討護理人員的作業姿勢。李開偉教授(1998)發展評估中文 Ovako 工作姿勢分析系統。宋立民(2003)建立齊次變換人體結構數學模式。宋立民(2004a)完成齊次變換人體上肢數學模式。在生物力學與肌肉骨骼傷害部分，Miller 等人(1986)探討大負荷的腰椎力學特性。Kurorinka 等人(1987)以標準北歐問卷分析肌肉骨骼症狀。Imrhan(1991)探討手腕姿勢對於不同形式捏握力的影響。李開偉教授等人(1997)調查半導體製造業的累積性工作傷害現況。宋立民(2004b, 2005)研究手部作業生物力學分析。在人體計測資料部分，Stoudt(1981)研究老年人的人體計測。杜壯教授(1988)調查台灣地區少年的人體計

測資料。Kroemer(1989)研究工程人體計測。邱魏津教授(1989)調查台灣地區十九歲至二十三歲女子人體計測資料。Culver 和 Viano(1990)研究懷孕婦女坐姿人體計測資料，防護胎兒以免受到壓迫。Kelly 和 Kroemer(1990)研究老年人的人體計測、狀態與建議。林榮泰教授等人(1993)以電腦輔助設計系統整合人體計測資料庫。Huang 和 You(1994)研究台灣地區女子的人體計測。王茂駿教授等多位學者(1997, 2000, 2002)建立本土化靜態與動態的人體計測資料庫、本土化中小學生的人體計測資料庫以及台灣地區人體計測資料庫。以上所述都是本文發展抬舉動作生物力學分析模式以及研究國人在抬舉動作受力狀況的主要參考文獻。

2. 研究方法

人體結構為開放型多自由度的空間機構，本文以宋立民(2003)建立的齊次變換人體結構數學模式以及生物力學為基礎，發展抬舉動作的生物力學分析模式。

圖 1 為基本空間機構連桿，包含二個具有旋轉或滑行功能的接頭。接頭 $n-1$ 與接頭 n 的旋轉軸或滑行線為二條歪斜軸（平行軸或交叉軸為歪斜軸的特例），分別為軸 $n-1$ 與軸 n 。在軸 $n-1$ 與軸 n 上，建立二個座標系統 $S_{n-1}(X_{n-1}, Y_{n-1}, Z_{n-1})$ 與 $S_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 。基本空間機構連桿 n 的四個齊

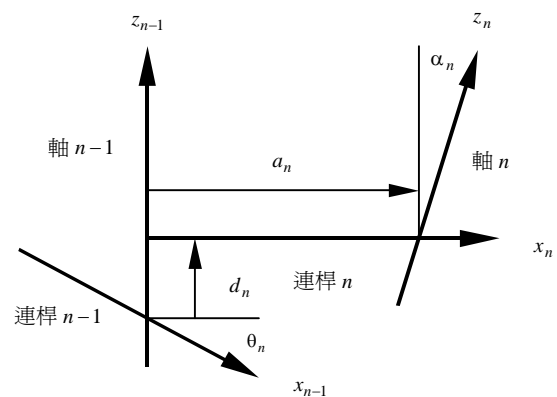


圖 1 基本空間機構連桿

次變換參數為連桿長度 a_n 、連桿扭角 α_n 、連桿間旋轉角 θ_n 、連桿間距離 d_n 。利用齊次變換理論，可敘述空間中任一點在座標系統 $S_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 的座標 (x_n, y_n, z_n) 與在座標系統 $S_{n-1}(X_{n-1}, Y_{n-1}, Z_{n-1})$ 的座標 $(x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1})$ 之間的變換，如式(1)。

$$\begin{bmatrix} x_{n-1} \\ y_{n-1} \\ z_{n-1} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{n-1}^n \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

於此

$$A_{n-1}^n = \begin{bmatrix} \cos\theta_n & -\sin\theta_n \cos\alpha_n & \sin\theta_n \sin\alpha_n & a_n \cos\theta_n \\ \sin\theta_n & \cos\theta_n \cos\alpha_n & -\cos\theta_n \sin\alpha_n & a_n \sin\theta_n \\ 0 & \sin\alpha_n & \cos\alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在宋立民(2003)建立的齊次變換人體結構數學模式中，將人體結構分為頭頸、軀幹、上肢以及下肢四部份。表1至表4分別為齊次變換頭頸、軀幹、上肢以及下肢座標系統的齊次變換參數。在表1至表4中，人體計測資料出現於連桿長度 a_n 與連桿間距離 d_n ，人體動作型態運動參數出現於連桿間旋轉角 θ_n ，連桿扭角 α_n 則決定於座標系統的相對位置。不論在齊次變換頭頸、軀幹、上肢或下肢座標系統中，空間中任一點在座標系統 $S_n(X_n, Y_n, Z_n)$ 的座標 (x_n, y_n, z_n) 與在座標系統 $S_{n-m}(X_{n-m}, Y_{n-m}, Z_{n-m})$ 的座標 $(x_{n-m}, y_{n-m}, z_{n-m})$ 之間的變換，如式(2)。

$$\begin{bmatrix} x_{n-m} \\ y_{n-m} \\ z_{n-m} \\ 1 \end{bmatrix} = A_{n-m}^{n-1} \dots A_{n-2}^{n-1} A_{n-1}^n \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

3.研究成果

由王茂駿教授等多位學者(2002)完成的「台灣地區人體計測資料庫手冊」、Dempster(1955)以及李開偉教授(2003)顯示的人體各部重心位置，依據抬舉動作過程中人體動作型態的變化，利用表1至表4中齊次變換頭頸、軀幹、上肢與下肢座標系統的齊次變換參數以及式(2)，可將人體各部重

表1 齊次變換頭頸座標系統的齊次變換參數

連桿編號 (n)	連桿長度 (a _n)	連桿扭角 (α _n)	連桿間旋轉角 (θ _n)	連桿間距離 (d _n)
1	頸根外側點至肩峰	0°	0°	0
2	0	90°	90° + 頸右側偏角度 或 90° - 頸左側偏角度	0
3	0	90°	90° - 頸右旋轉角度 或 90° + 頸左旋轉角度	0
4	下頰角至頸根外側點	0°	90° - 頸屈曲角度 或 90° + 頸伸展角度	0
5	0	-90°	-90° - 頸屈曲角度 或 -90° + 頸伸展角度	0
6	0	-90°	-90° - 頸右旋轉角度 或 -90° + 頸左旋轉角度	0
7	頭頂至下頰角	0°	-90° + 頸右側偏角度 或 -90° - 頸左側偏角度	0

表2 齊次變換軀幹座標系統的齊次變換參數

連桿編號 (n)	連桿長度 (a _n)	連桿扭角 (α _n)	連桿間旋轉角 (θ _n)	連桿間距離 (d _n)
1	0	0°	0°	肚臍至大轉子
2	0	90°	90° - 軀幹右旋轉角度 或 90° + 軀幹左旋轉角度	0
3	0	90°	90° - 軀幹屈曲角度 或 90° + 軀幹伸展角度	0
4	肩峰至肚臍	0°	軀幹右側偏角度 或 - 軀幹左側偏角度	0

表3 齊次變換上肢座標系統的齊次變換參數

連桿編號 (n)	連桿長度 (a _n)	連桿扭角 (α _n)	連桿間旋轉角 (θ _n)	連桿間距離 (d _n)
1	1/2 肩寬	0°	90°	0
2	0	-90°	手臂內收角度 或 - 手臂外展角度	0
3	0	-90°	-90° - 肩內旋角度 或 -90° + 肩外旋角度	0
4	肩峰至橈骨點	0°	-90° + 肩屈曲角度 或 -90° - 肩伸展角度	0
5	橈骨點至橈骨莖突	0°	肘屈曲角度 或 - 肘伸展角度	0
6	0	90°	90° + 橈偏角度 或 90° - 尺偏角度	0
7	0	90°	90° - 內轉角度 或 90° + 外轉角度	0
8	橈骨莖突至指尖點	0°	90° + 腕屈曲角度 或 90° - 腕伸展角度	0

表 4 齊次變換下肢座標系統的齊次變換參數

連桿編號 (n)	連桿長度 (a _n)	連桿扭角 (α _n)	連桿間旋轉角 (θ _n)	連桿間距離 (d _n)
1	大轉子間距 2	-90°	0°	0
2	0	-90°	臀內收角度 或 - 臀外展角度	0
3	0	-90°	-90° - 臀內旋角度 或 -90° + 臀外旋角度	0
4	大轉子至 臙骨上點	0°	-90° + 臀屈曲角度 或 -90° - 臀伸展角度	0
5	臙骨上點 至外踝	-90°	- 膝屈曲角度 或膝伸展角度	0
6	0	90°	腳內翻角度 或 - 腳外翻角度	0
7	0	90°	90° + 背屈角度 或 90° - 蹠屈角度	0
8	外踝至 腳尖點	-90°	- 腳內旋角度 或腳外旋角度	外踝至地

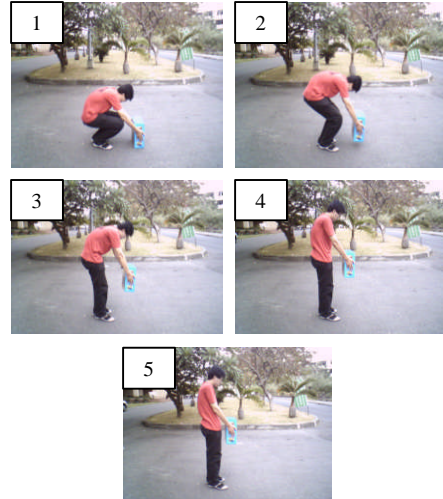


圖 2 抬舉動作過程的姿勢

心與關節進行在不同座標系統的座標變換。再經由 Webb Associates(1978)研究的人體各部重量佔體重百分比以及生物力學為基礎，發展抬舉動作的生物力學分析模式。探討國人在抬舉動作的重物抬舉過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝承受的軸向力、徑向力與力矩。

在本文中，以十八至二十四歲男子抬舉二十公斤的重物為分析對象。由「台灣地區人體計測資料庫手冊」，擷取十八至二十四歲男子的人體計測資料。分析國人在抬舉動作的重物抬舉過程中，各關節承受的軸向力、徑向力與力矩。

本文以照相方式將抬舉動作的重物抬舉過程分為五個姿勢，如圖 2 所示。圖 3 為抬舉動作過程中，改變的人體動作型態與角度。其餘的人體動作型態在抬舉動作過程中皆無變化。圖 4 為抬舉動作過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝承受的力矩。圖 5 為抬舉動作過程中，腰承受的軸向力以及徑向力。由圖 2 至圖 5 可以呈現抬舉動作過程中，不同姿勢各關節的角度與力矩變化情形，以及不同姿勢腰部承受軸向力與徑向力的變化。

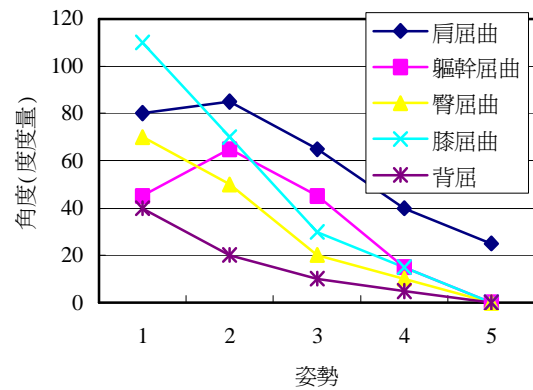


圖 3 抬舉動作過程改變的人體動作型態與角度

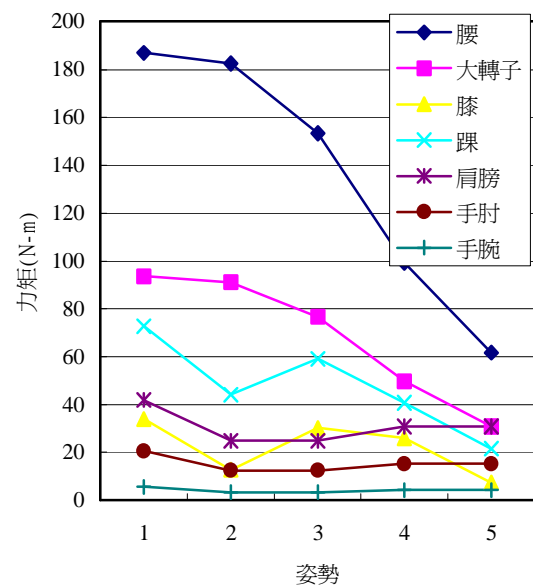


圖 4 抬舉動作過程各關節承受的力矩

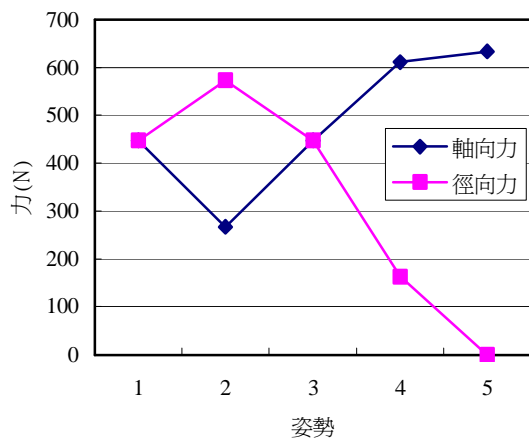


圖5 抬舉動作過程腰承受的軸向力與徑向力

4. 結論

本文以齊次變換人體結構數學模式以及生物力學為基礎，完成抬舉動作的研究，獲致成果如下所述：

- (1) 建立抬舉動作的生物力學分析模式。
- (2) 分析抬舉動作過程中，手腕、手肘、肩膀、腰、大轉子、膝與踝承受的力矩。
- (3) 分析抬舉動作過程中，腰承受的軸向力與徑向力。
- (4) 在抬舉動作過程中，若上肢各部位與垂直線的角度增加，則手腕、手肘、肩膀承受的力矩與徑向力增加，軸向力減少。
- (5) 在抬舉動作過程中，若軀幹屈曲角度增加，則腰承受的徑向力增加，軸向力減少。

本文的研究成果可以提供抬舉動作流程設計的參考，亦可做為作業人員自我檢核肌肉骨骼傷害風險的依據。使國人在作業場所擁有安全的工作環境，降低肌肉骨骼傷害的風險，避免肌肉骨骼職業傷害的發生。本文研究成果亦可應用於物理治療以及運動分析的研究範疇。

參考文獻

1. 杜壯(1988)，台灣地區少年人體計測調查研究，*技術學刊*，第3卷，第2期，頁165-173。
2. 邱魏津(1989)，台灣地區女子（19到23歲）

人體計測調查之研究，*技術學刊*，第4卷，第3期，頁291-300。

3. 王茂駿(1993)，*手套與姿勢對工作中最大施力影響之評估研究*，國科會。
4. 林榮泰、紀佳芬、張世鵬(1993)，整合人體計測資料庫與電腦輔助設計系統之研究，*工業工程學刊*，第10卷，第3期，頁195-202。
5. 王茂駿、王明揚、黃雪玲、何明泉、許勝雄、李永輝、紀佳芬、杜壯、沈葆聖、林雅俐、李開偉(1997)，*本土化靜態與動態人體計測資料庫之建立*，國科會工程處。
6. 李開偉、陳志勇、葉文裕、朱振群(1997)，半導體製造業累積性工作傷害現況調查，*勞工安全衛生季刊*，第5卷，第1期，頁1-14。
7. 李開偉(1998)，*中文 Ovako 工作姿勢分析系統的發展與評估*，國科會。
8. 王茂駿、王明揚、廖信銳、吳文言、林榮泰、黃啓梧、林雅俐(2000)，*本土化中小學生人體計測資料庫之建立*，國科會工程處。
9. 王茂駿、王明揚、林昱呈(2002)，*台灣地區人體計測資料庫手冊*，中華民國人因工程學會。
10. 宋立民(2003)，*齊次變換在人體結構數學模式與工作空間之研究*，國科會。
11. 李開偉(2003)，*實用人因工程學*，全華，台北，二版，頁3-29。
12. 宋立民(2004a)，*齊次變換在人體上肢數學模式之研究*，*中華民國人因工程學會第十一屆年會暨研討會*。
13. 宋立民(2004b)，*齊次變換人體結構數學模式在最佳化手部作業之研究*，國科會。
14. 宋立民(2005)，*齊次變換人體上肢數學模式在 手部作業之研究*，*中華民國人因工程學會第十二屆年會暨研討會*。
15. Culver, C. and Viano, D. C. (1990). Anthropometry of seated women during pregnancy: defining a fetal region for crush

- protection research. *Human Factors*, 32, pp. 625-636.
16. Huang, C. W. and You, M. L. (1994). Anthropometry of Taiwanese woman. *Applied Ergonomics*, 25, pp. 186-187.
 17. Imrhan, S. N. (1991). The influence of wrist position on different types of pinch strength. *Applied Ergonomics*, 22, pp. 379-384.
 18. Kelly, P. L. and Kroemer, K. (1990). Anthropometry of the elderly: status and recommendation. *Human Factors*, 32, pp. 571-595.
 19. Kroemer, K. (1989). Engineering anthropometry. *Ergonomics*, 32, pp. 767-784.
 20. Kurorinka, I., Johnson, B., Kilbom, A., Vinterberg, H., Biering-Sorenson, F., Anderson, G. and Jorgensen, K. (1987). Standardized Nordic Questionnaire for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics*, 18, pp. 233-237.
 21. Lee, Y. H. and Chiou, W. K. (1995). Ergonomic analysis of working posture in nursing personnel: example of modified Ovako working posture analysis system application. *Research in Nursing & Health*, 18, pp. 67-75.
 22. Miller, J. A. A., Schultz, A. B., Warwick, D. N. and Spencer, D. L. (1986). Mechanical properties of lumbar spine motion segments under large loads. *Journal of Biomechanics*, 19, pp. 79-84.
 23. Stoudt, H. W. (1981). The anthropometry of the elderly. *Human Factors*, 23, pp. 29-37.
 24. Sue, H. (1996). Postural analysis of nursing work. *Applied Ergonomics*, 27, pp. 171-176.
 25. Webb Associates (1978). *Anthropometric source book*. NASA 1024, Washington D. C.

致謝

本研究由國科會專題研究計畫 NSC 94-2213-E-242-001 補助支持，特此誌謝。

