

2024年【科學探究競賽-這樣教我就懂】

題目名稱：穿戴式裝置的彎曲運動能量收集

一、摘要

本研究在探討一種新型穿戴式裝置，能夠通過人體手臂的自然彎曲運動收集能量，進而轉化為電能。目標是透過齒輪組放大手臂擺動速度，帶動發電機發電收集電能。以人體手臂可舒適操作的齒輪比設定，延長穿戴時間，加大使用意願收集更多電能。此裝置重190公克，在6公里/小時的行走速度下，平均能產生功率0.16W。

二、探究題目與動機

在學習物理學時，我們發現能量具有多種形態，且能在這些形態間轉換。本研究探索一種方法，利用人類日常移動過程中的自然動作來收集能量，同時減少能量損耗。人體本身是一個豐富的能量源。通過設計一種機械能量收集器，能夠將人體運動時產生的動能轉化為電能，這樣不僅可以為日常生活中的電子產品提供能源，減少對傳統電池依賴，同時也能對環境產生正面影響。

三、探究目的與假設

本研究探討一利用人體上肢動能的能量收集方法。儘管先前研究大多集中於下肢能量的收集，但這些方法可能因為會干擾行走或帶來安全顧慮而未被廣泛應用於日常生活。透過提出一種新型的能量收集器，針對手臂的彎曲動能，轉化成動能。研究目的包括：

- (一) 探索不同運動模式中能有效發電的運動特性，以開發高效的能量收集裝置。
- (二) 藉由齒輪組來放大轉速，進而加倍驅動發電機發電，以期提升發電效率。
- (三) 尋找最佳電阻值以最大化發電功率，進而提高能量收集的效率。

四、探究方法與驗證步驟

探究方法與流程如圖1所示。

(一) 手臂擺動幅度實驗

本實驗先行探究人體在行走和跑步時，手臂的擺動特性，為穿戴式能量收集器的設計提供實驗數據基礎。實驗於健身房內進行，受試者在跑步機上以每小時4、5、6公里的速度走路和跑步，同時用手機拍攝手臂擺動的側面影片(1080p, 30fps)，利用圓點貼紙標記關節位置以便於軟體標註追蹤手臂彎曲角度。設備與材料：跑步機、手機相機、手機腳架、圓點貼紙、電腦、以及Kinovea軟體分析手臂彎曲角度。

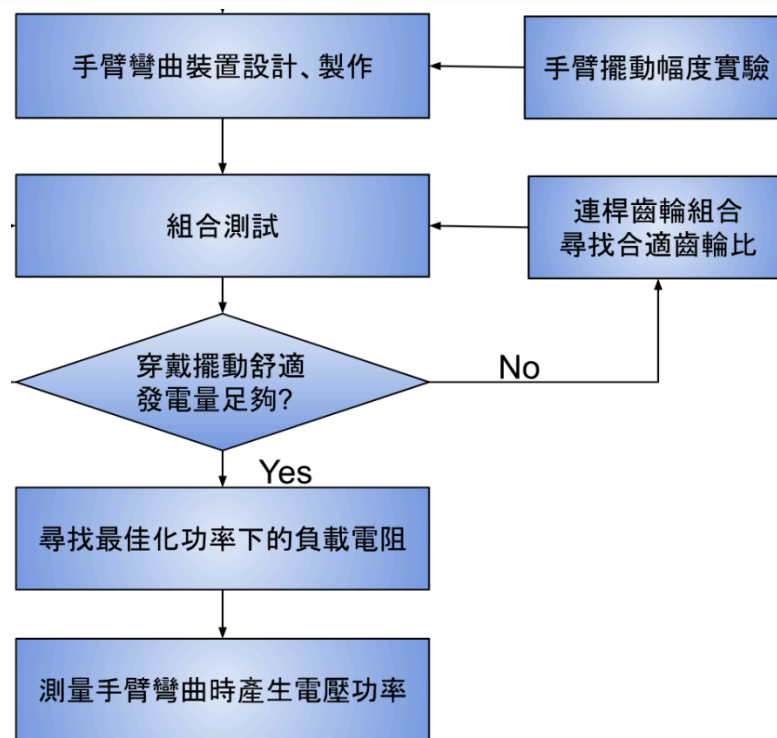


圖1, 研究流程

1. 走路時手臂彎曲角度的追蹤: 走路手臂擺動擺幅有30~60度的擺幅, 圖2顯示, 隨著走路時速愈快, 手臂彎曲角度變化範圍愈大、頻率加快, 手臂彎曲蘊藏的動能增加。

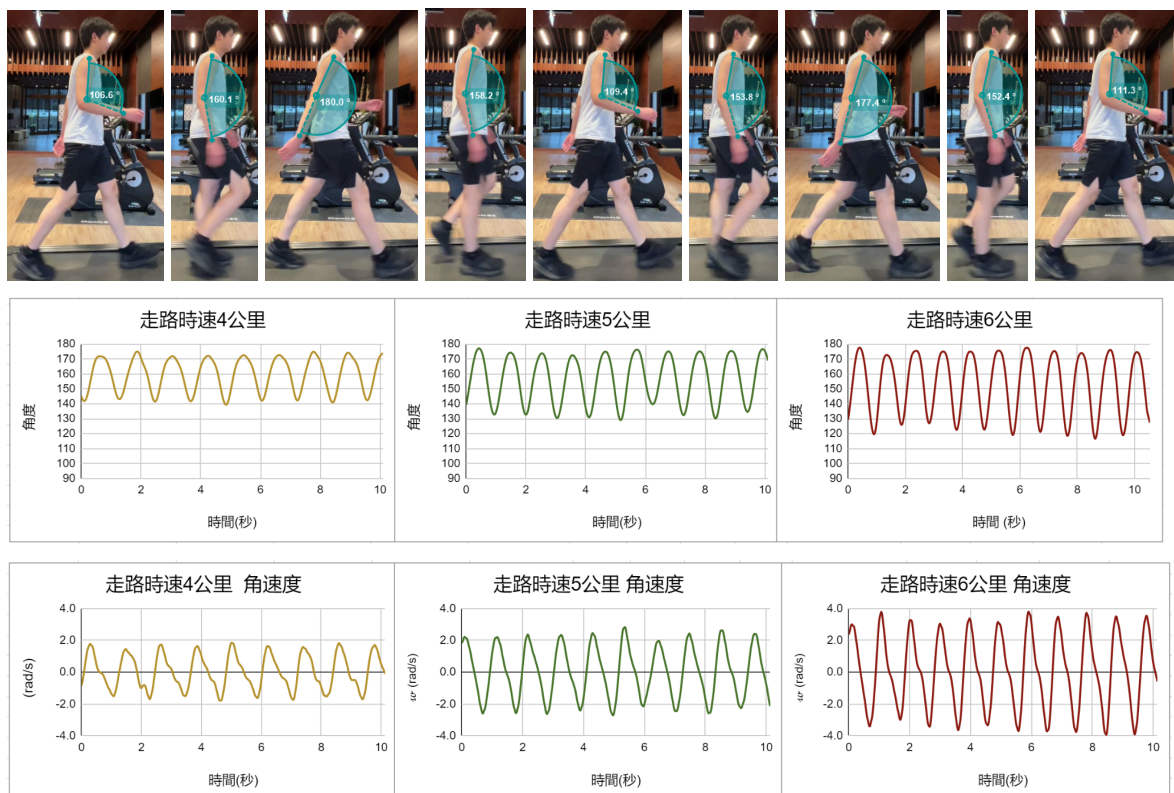


圖2, 走路時手臂彎曲角度與角速度圖

2. 跑步時手臂彎曲角度的追蹤:圖3顯示跑步時手臂彎曲角度變化較小,約10~30度。差異主要因為跑步時,手臂擺動集中上臂,手肘彎曲角度相對較小,隨上臂擺動時,手臂彎曲角度稍有變動。

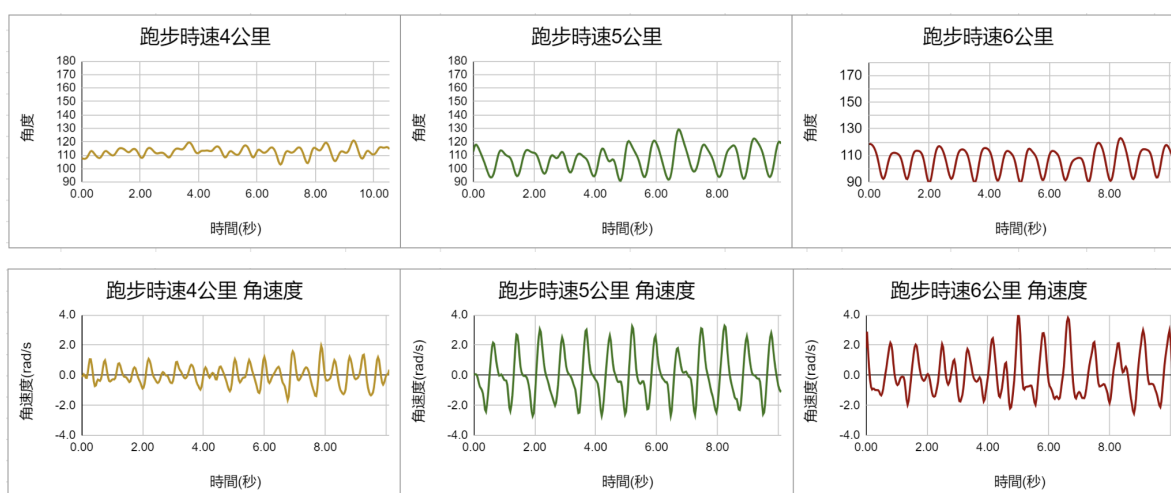
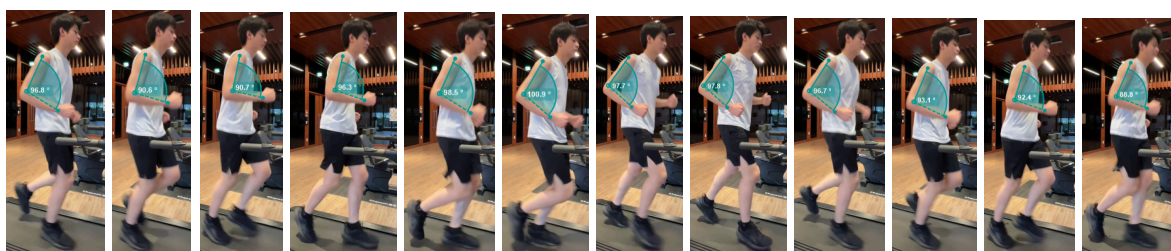


圖3, 跑步時手臂彎曲角度與角速度圖

3. 手臂彎曲能量收集的理論分析

圖4為走路時,手臂彎曲角度變化與角速度關係圖,一開始為手臂彎曲角度最小的位置,隨後下手臂開始往後伸展,彎曲角度變大,角速度為正值,角度和角速度都逐漸增大。當擺動到身體中線時,角速度來到最大值,之後繼續伸展並開始減速,角度繼續增,角速度減小直到彎曲角度來到最大接近完全伸展,此時角速度為0。接著是手肘開始往前彎曲階段(elbow forward flexion),角度逐漸變小,角速度為負值,擺動到身體中線時,角速度絕對值來到最大值,約-2.5(rad/s),接著開始減速,直到手臂彎曲擺動到最前方,此時角速度為零,手肘角度來到最小。在行走時,手臂擺動會呈現上述週期性擺動,角度和角速度呈現類似正弦波的波型。

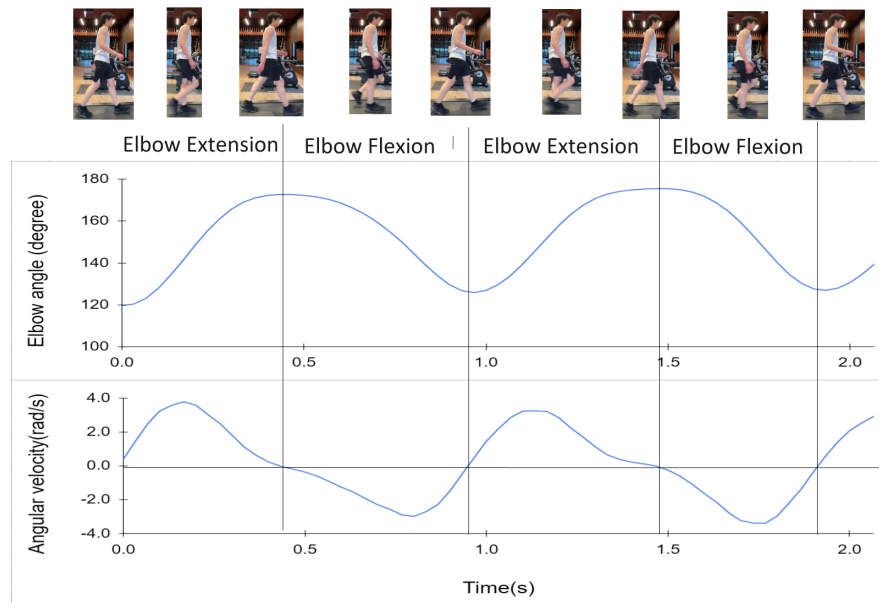


圖4, 走路手臂彎曲角度與角速度關係圖

因產手臂彎曲帶動發電機發電的產生功率可表示為：

$$P_o = \left(\frac{K_g \cdot r_t}{R_g + R_l} \cdot \omega_a \right)^2 \cdot R_l,$$

其中, K_g 為反電動勢常數; r_t 齒輪組齒輪比; R_g 發電機的電阻值;

R_l 外加負載電阻; ω_a 手臂的角速度。可知產生功率與角速度平方成正比, 也與外接負載電阻 R_l 有關。

4. 行走和跑步實驗數據的比較

因產生的功率與手臂彎曲角速度平方成正比, 透過比較走路與跑步在不同速度下的角速度均方根 (RMS) 值, 我們可以進一步比較可發電功率。實驗結果發現, 無論是走路還是跑步, 速度的提升均會導致角速度RMS的增加。然而, 在相同速度條件下, 走路產生的角速度RMS值顯著高於跑步。特別是當速度達到每小時6公里時, 跑步的速度增加對角速度RMS的提升不顯著, 從每小時5公里的1.4輕微增至1.5 rad/s。相較之下, 行走在每小時6公里的速度下, 角速度均方根自1.7rad/s顯著提高至2.4 rad/s。結果發現在相同速度下, 行走能產生更高的角速度均方根值, 從而生成更多電能, 同時也表明走路是利用手臂彎曲運動能量收集過程中, 更為有效的運動方式。

表1, 不同速度下, 走路和跑步時手臂彎曲角速度均方根

Angular Vellcity rms	4 km/hr	5 km/hr	6 km/hr
Walking	1.1	1.7	2.4
Running	0.6	1.4	1.5

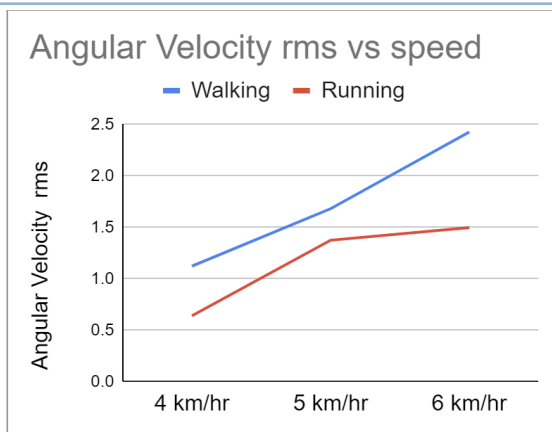


圖5, 不同速度下, 走路與跑步的角速度均方根

(二)設計和製作彎曲運動能量收集系統

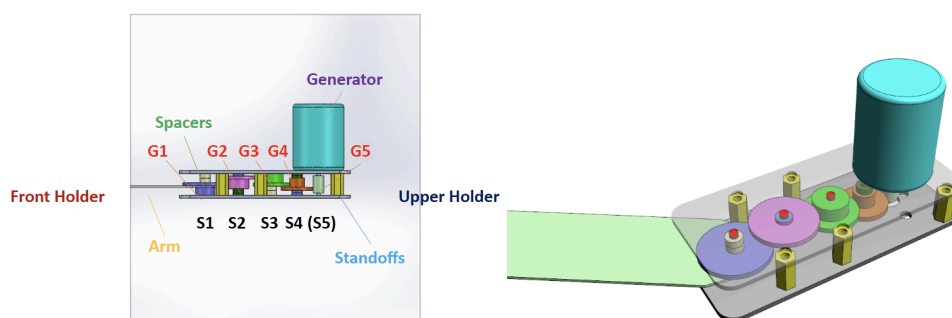


圖6, 手臂彎曲運動能量收集器設計概念

圖6為手臂彎曲運動能量收集器的設計概念圖, Front Holder為前臂固定套, Upper Holder為上臂固定套, 擺臂與前臂固定套相連。選用的gear1~gear4皆為正齒輪, 相同模數的雙層齒輪。當手臂彎曲時, 擺臂(arm)與雙層齒輪gear1相連, 帶動gear1轉動; gear1的大齒與gear2的小齒相連, 帶動gear2轉動; gear2的大齒與gear3的小齒相連, 帶動gear3轉動; gear3的大齒與gear4的小齒相連, 帶動gear4轉動; 最後gear4的大齒與馬達齒輪相連, 帶動馬達轉動發電。透過大齒輪帶動小齒輪, 可以放大轉速。齒輪比=輸入齒數/輸出齒數。

最終齒輪轉速比= $SR_{12} \times SR_{23} \times SR_{34} \times SR_{45} = 27.2$, 從手臂擺動的角速度, 透過齒輪組放大27.2倍帶動發電機轉動發電。

齒 輪	G1	G2	G3	G4	G5
模 數	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
齒數 (大)	42	40	34	30	10
齒數 (小)	18	20	22	14	

表2, 選用齒輪規格



圖7, 手臂彎曲運動能量收集器的製作

(三)尋找最佳化功率下的負載電阻實驗

在行走速度(6公里/小時)下, 受試者穿戴裝置, 連接示波器和不同電阻, 進行尋找最佳化功率電阻實驗, 記錄電阻值與所產生的功率之間的關係。表3為不同電阻下量到電壓均方根和發電功率。圖8顯示, 當電阻值從5歐姆增加到20歐姆時, 功率先是略微增加, 在9.1歐姆時, 達到峰值功率為0.16瓦, 隨後開始下降。實驗結果顯示9.1歐姆是最佳的電阻, 能夠在手臂彎曲運動能量收集中, 得到最大功率輸出。

Resister (ohm)	RMS (v)	Power (w)
5	0.72	0.10
6.8	0.85	0.11
8.2	1.01	0.12
9.1	1.2	0.16
10	1.2	0.14
14.3	1.35	0.13
20	1.6	0.13

表3, 不同電阻下產生功率

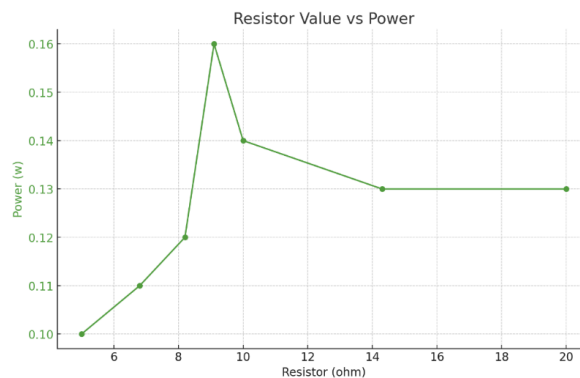


圖8, 電阻與功率圖

五、結論與生活應用

此穿戴式手臂彎曲動能收集器, 時速每小時六公里下行走, 平均可收集功率0.16瓦。連接鋰電池, 可儲存發電電能;加入USB連接器, 可為手機充電。透過此裝置, 可以輕鬆收集手臂彎曲動能, 轉化為電能。不但能減少對傳統能源的依賴, 也推動了環保理念的實踐。

參考資料

1. Chao Chen, Li Yin Chau and Wei-Hsin Liao (2017), A knee-mounted biomechanical energy harvester with enhanced efficiency and safety. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-665X/aa6cec/meta>
2. Shepertycky, M.; Li, Q.(2015) Generating electricity during walking with a lower limb-driven energy harvester: Targeting a minimum user effort. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0127635>