

「牌」山倒海— 骨牌的力與速率之研究

研究者：梁芷瑜、鍾定橙、林昱辰、洪柏為、邱奕叡
指導老師：詹珮琪老師

摘要

本研究欲探討骨牌排列方式會如何影響倒下力量與速率。本研究自製可在教室操作的測量工具，最後自製儀器探討骨牌間距、橫向錯位距離與轉彎角度對骨牌倒下的影響。發現間距越大、錯位距離越寬、轉彎角度越大，骨牌倒下時傳輸的力量越不穩定，力量越小、倒下耗費時間越長。未來建議速率儀器要數值精準，可找更精密的儀器確認。

壹、研究動機

我們之前在網路上看過骨牌倒下的影片，覺得骨牌倒下時有一種紓壓的感覺，並且以前我們看過一本書，名字叫做《科學實驗王 34-重心與平衡》，故事裡面玩了一場骨牌賽，勝利條件是撞倒目標骨牌。比賽過程中，他們有用到階梯來爬上講台、建造天橋來越過對手的骨牌，還有利用分岔來推倒對手的骨牌，就連骨牌間距也都是影響勝利的關鍵。我們想要驗證：如何確保**必定能推倒目標骨牌**，因此我們想了解影響骨牌倒下力量的因素，像是改變間距、排列方式等對骨牌倒下的力量有何影響。

貳、研究目的

- 一、比較不同骨牌間距對骨牌倒下力量與速率的影響
- 二、比較不同錯位距離對骨牌倒下力量與速率的影響
- 三、比較不同轉彎角度對骨牌倒下力量與速率的影響

參、文獻探討

一、名詞定義

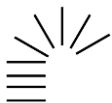
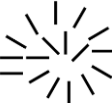
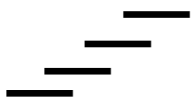
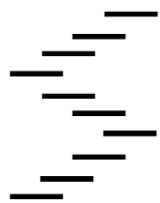
(一)骨牌尺寸定義

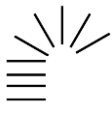
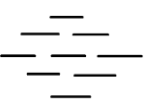
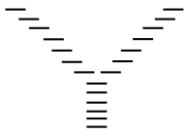
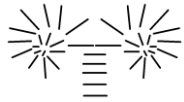
不同文獻對骨牌尺寸的命名並不一致（長／寬／厚高度不統一），因此在本研究中，依照骨牌實際可觀察方向，統一定義如下：

名詞	定義
骨牌高度 (H)	立起來時上下方向
底部長邊 (L)	骨牌底部最長邊（本研究用來計算錯位比例）
底部短邊 (W)	骨牌底部較短邊
間距 (D)	兩塊骨牌底部中心的水平距離

(二)骨牌排列方式彙整

參考文獻，我們彙整以下排列方式：

方式	俯視圖	說明
轉彎		骨牌的最佳間距為骨牌本身的1/2，轉彎時要注意弧度，並要有直線來提供所需的加速力道。轉彎的角度不超過180度。
迴轉		迴轉可以用在空間較小的地方，也可以讓路線轉彎，作法是把兩條直線以弧度連接 迴轉的角度剛好180度。
迴旋		迴旋式骨牌由外逐步形成層層圓周，推倒骨牌時會感覺骨牌快速往內轉動，造成奇妙的視覺感
錯位		將直線排列的向長邊平行位移，但位移時必須讓後片骨牌有重疊。錯位距離建議為骨牌的1/2。
Z字 行進法		結合錯位，如此一來骨牌雖然沒有轉彎，卻會出現類似彎曲弧線的圖樣。

方式	俯視圖	說明
轉彎		骨牌的最佳間距為骨牌本身的1/2，轉彎時要注意弧度，並要有直線來提供所需的加速力道。轉彎的角度不超過180度。
迴轉		迴轉可以用在空間較小的地方，也可以讓路線轉彎，作法是把兩條直線以弧度連接。迴轉的角度剛好180度。
方陣		是Z字行進法與擴散的結合，每排增加或減少一個骨牌。
分岔		以Z字行進法為基礎，分岔會往左右展開，這個結合了轉彎以及直線的概念，將路線延伸到下一個分段點。
擴散		擴散的用途是要進入圖案前的動作，排法是由一個骨牌推到兩個再推到三個以此類推會沿生呈扇形，會常常出現在線條圖形上。
公羊角		公羊角是結合分岔與迴旋，這個是花式骨牌線圖的起手式，如果一直增加分岔與迴旋的次數，線圖就會有驚人的變化和層次。

由於Z字形進法、方陣、分岔、擴散與公羊角的排列方式，很難界定哪些因素影響骨牌的力量與速率，因此我們只選擇「轉彎和迴轉」、「錯位」進行實驗。

二、骨牌物理特性的文獻參考

(一)材質與尺寸

許多研究文獻中骨牌常見材質包括木頭、塑膠（ABS、PS 等）、金屬、玻璃等，其中 ABS(丙烯腈丁二烯苯乙烯)塑膠因**質量一致、密度穩定、耐摔**，最常被用於競賽與教學（參考文獻 01、03、05）。

文獻中使用的骨牌尺寸與材質並不一致，以下為主要參考文獻中所使用的材質與尺寸：

文獻編號	文獻名稱	材質	高度 H (cm)	長邊 L (cm)	短邊 W (cm)
01	葉力維、黃耀仟（2003）。極速骨牌：骨牌終端速度及連鎖反應機制之探討。	塑膠	4.4	2.2	0.7
02	蘇庭庭、曾子芸、林庭揚（2011）。Domino & Taguchi－骨牌效應與極速最佳因子研究。	塑膠	5.3	2.6	0.8
03	許逸群、潘辰瑜、陳奕臻、曾英澤、林蔚典(2013)。骨牌玄機-骨牌倒下的原理與影響因素之探討。	木質	9	2.75	1.3
04	無作者。（2013）。大隊接力：骨牌傳遞速度之探討。	木質	5.3	2.6	0.8
05	梁鎮堃、陳玟馨、林若臻、陳昱帆（2014）。東引卡踮骨牌風景。	塑膠/ 木質	5.4/ 4.41	2.7/ 2.16	0.9/ 0.7

文獻中亦出現不同尺寸的木牌與塑膠牌，其倒下速度與質量、間距皆有交互影響。

許多標準骨牌採用 1：3：6 的尺寸比例，原因是：

1. 寬度足以站立
2. 高度可提供足夠的「慣性力矩」
3. 厚度提供穩定碰撞面

因此本文獻使用骨牌材質為 ABS 塑膠，尺寸為長邊 2.64 × 短邊 0.9 × 高度 5.3 cm。

（二）骨牌數量

六篇文獻的骨牌數量差異很大，其中蘇庭庭、曾子芸、林庭揚（2011）（文獻 02）在骨牌數量與速率的對應上最為完整。

文獻編號	數量(個)	用途
01	10、15、20、25、30、40、50、60	終端速度分析：速度在 30~50 個逐漸趨於穩定
02	6 的倍數~102，共 17 組	速率曲線：6~24 個為速度不穩定期、30~102 個為穩定週期區（速度先升後降，42 塊最高）
03	10	錯位、間距實驗

04	不固定 (因為固定距離 96 cm, 數量 依間距而變)	間距比較、平台材質、排列方式(直 立、橫立)比較
05	30	錯位、彎道研究

(三)骨牌間距

文獻 04 從重心線與力矩分析推論「理論上最佳間距大約接近骨牌高度的一半 ($H/2$)」, 但以下文獻 01、02、03、05 中顯示「**骨牌間距增加時, 倒下所需時間會變長、速率會變慢**」, 不管是否接近骨牌高度的一半。

文獻編號	骨牌高度(cm)	骨牌間距(cm)	文獻結果
01	4.4	1、1.25、1.5、 1.75、2、2.5、3	1cm 最快、3cm 最慢, 間距越小速度越快
02	5.3	2、2.5、3、3.5、4、 4.5、5	2cm 時最快、5cm 時最慢, 間距越小速度愈快
03	9	1、3、5、8	1cm 時最快、8cm 時最慢, 間距越小速度愈快
04	5.3	1.2、2.2、3.2	速率: 2.2cm>1.2cm>3.2cm
05	4.41	1.3、2.3、3.3	1.3cm 時最快、3.3cm 時最慢, 間距越小速度愈快

其中, 文獻 04 在實驗設計中寫到, 採用「固定距離 96 公分」排列不同變項的骨牌, 若如此間距會隨骨牌總數改變。推測這是造成與其他骨牌間距與速率關係不同的原因。藉此推論, 「理論上最佳間距大約接近骨牌高度的一半 ($H/2$)」可能建立在相同距離、骨牌數量不同的情況下。

(四)骨牌排列方式

我們預計做「轉彎」與「錯位」兩種排列方式的速率與力道測量。

1. 骨牌轉彎

文獻編號	排列方式	文獻結果
05	貼合圓形排列, 轉彎半徑 6、 12.1cm(固定間距, 總數量不同)	轉彎半徑固定時, 骨牌間距越大, 越不容易傾倒

2. 骨牌錯位

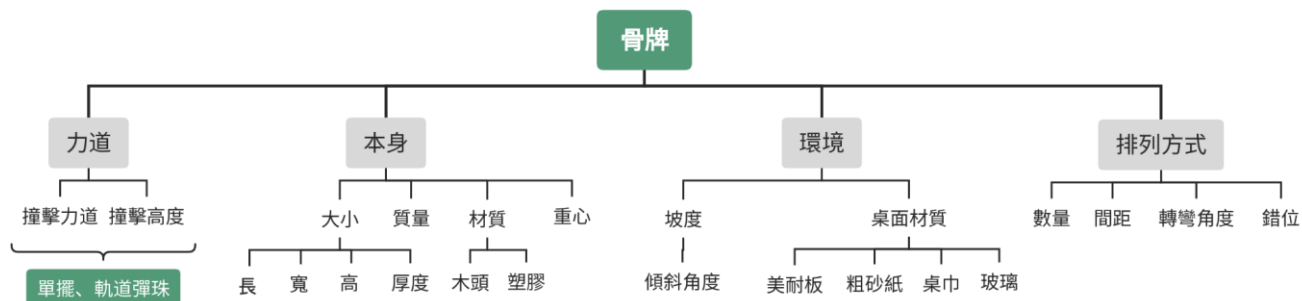
骨牌錯位方式會與長邊平行，因此我們推測它可依照錯位距離佔長邊比例去估算。

文獻編號	排列方式(cm)	佔底邊長邊比例	文獻結果
03	0.4 、 1.0 、 1.6 、2.2、2.8	底邊 2.75 cm 約 14%、36%、58%、 80%、102%	● 錯位越大、傳遞速率下降、倒下速度變慢 ● 大於 70% (約 2 cm 以上)成功率開始下降 ● 大於等於 100% (偏移等於底邊長度) 必定打不到下一片。
05	0.5、1.0、1.5	底邊 2.16 cm 約 23%、46%、69%	● 錯位越大，所需時間越長 ● 15 mm (69%) 速度明顯變慢。

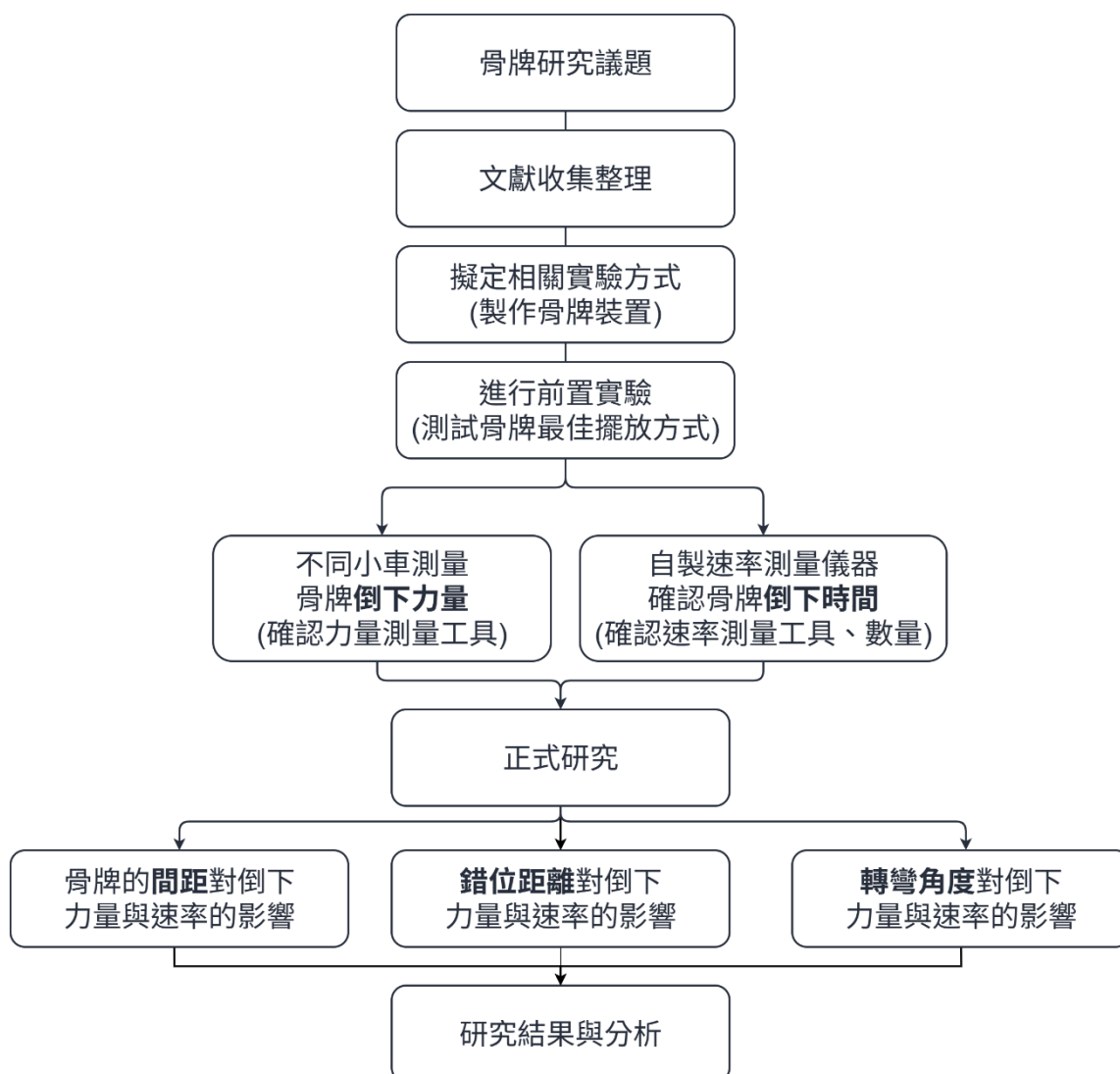
肆、研究架構與方法

一、研究架構

從文獻中整理可知，影響骨牌的因素有：



二、研究流程



二、研究器材與材料

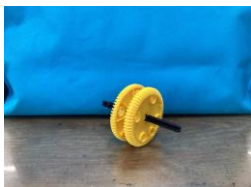
編號	器材	編號	器材
1	塑膠骨牌(高 5.3cm，長 2.64cm 加減 0.1，寬 0.9cm)	2	軌道與小車(撞擊骨牌)
3	平板(拍攝紀錄)	4	長尺(100cm)
5	測量力道機器(小車)	6	兩個紅外線感測器
7	圓規	8	LinkIt7697
9	墊板(控制力量測量的一致性)	10	筆電(編譯程式)

(一)量測力量工具的改良歷程

使用軌道＋小車撞擊骨牌，讓「物品被骨牌撞出的距離」作為力量大小的比較。撞擊骨牌的工具我們參考了智高積木組中的軌道與小車，讓小車從軌道上自然滑下，以固定撞擊力道。

鑒於穩定性與易操作性，最後我們決定使用改良後的軌道 2 和力道測量方法 2 作為測量力道的工具。

用途	器材	問題發現	改良措施
撞擊骨牌工具	 軌道 1	1. 車會卡在軌道間隙 2. 輪子在軌道中左右搖晃，影響前進方向 3. 軌道底部懸空，造成車子前進方向偏移 4. 所有積木都由車子撞擊，而非撞擊第一塊骨牌 5. 車子撞擊點較低，撞不到骨牌最佳位置，讓骨牌無法向前倒下 6. 每次排骨牌都要對齊很久	1. 把中間的空隙全部用積木填滿 2. 底下加裝輪子可順利滑下的積木 3. 用紙板做一個斜坡 4. 軌道前端加裝停止器 5. 把車上的撞擊點調高 6. 增加固定骨牌間距的輔助器
	 軌道 2	1. 抽棒子時，車子會跟著棒子被向上帶起	1. 抽棒子的方改為向下抽，避免起跑時的不穩定
比較力道工具	 力道測量方法 1	1. 車子被骨牌撞擊後，車の後輪會被彈起 2. 車輪是齒輪，較難滾動，可能是因為摩擦力較大	我們發現較難滾動也有好處，就是小車不會跑太遠。

具	 力道測量方法 2	1. 骨牌倒下壓住車子，有時會讓車子不能前進 2. 小車會持續向前衝，不容易停下，且容易衝出既定軌道	1. 測出可以讓車子順利前進的骨牌放置距離 2. 把底下兩側圍欄架高
	 力道測量方法 3	1. 輪子會偏移直線 2. 路面不平，會往回走，也會加速 3. 骨牌擊倒位置會歪斜	1. 裝置底下統一鋪設墊板 2. 嘗試加寬兩個輪子的間距，但卻容易受力不均勻

(二)量測速率工具的改良歷程

想辦法不要發出聲音

我們嘗試不同的測量軟體，包含「phyphox」、「Qblock 及 Quno 開發板」和「BlocklyDuino 及 LinkIt7697 開發板」。

其中，phyphox 我們試過聲學碼錶擺在骨牌陣列旁邊，設定門檻為 0.02arb. unit，最小延遲設為 0.001 秒。聲學碼錶會每 0.001 秒把門檻以上的聲音紀錄下來，並計算兩個時間的時差。也嘗試過動作碼錶，但骨牌倒下的震動太小，如果門檻太小，有一點細微的動作都會接收到，無法精準測量骨牌倒下的時差。

後來我們使用開發板和感測器，嘗試透過紅外線和光敏感測器測量骨牌倒下的具體時間。最後我們決定使用「BlocklyDuino 及 LinkIt7697 開發板」，因為其他的裝置皆無法測量出精確的數值。

後續實驗中，預計每組數據測量 7 次，去除最大與最小值後，取剩餘 5 次平均進行分析，以減少隨機誤差，使數據表現較穩定。

用途	器材	發現問題	解決嘗試/結論
測量速率的方式	軟體 phyphox ——聲學碼表	1. 骨牌聲音的開始與結束無法確認 2. 骨牌小的聲音偵測不到 3. phyphox 靈敏質太低，會把兩個聲音合而為一 4. 會錄到其他環境音、雜音	1. 嘗試用慢動作錄影來確認，但因為 phyphox 的紀錄會延遲，還是看不出來哪一個聲音是哪個骨牌的。 2. 調整骨牌底下的材質，找出最容易發出聲音且不會凹凸不平的材質。 3. 無法解決，因為骨牌碰撞的聲音太快，phyphox 無法感應。



4. 想辦法讓環境的聲音是固定的。

Qblock(編譯軟體)和 Quno(開發板)

感測器：光敏、紅外線
顯示器：LCD 顯示
固定材料：黏土



1. 骨牌打到光敏感測器會滑落。
2. 有時候感測器有感應到，LCD 的時間卻沒有顯示。
3. 在迴圈中加入等待 1 秒，避免程式跑太快而當機，卻造成結果的誤差。
4. 每次實驗時的天氣不一定一樣，導致環境亮度會有些許差異。
5. 感測器位置離車子有段距離，不易感測。
6. 開發板計時出來的時間每個都一樣，不精確

1. 在光敏版板上加上黏土，防止骨牌滑落。
2. 進行燒錄避免感應延遲。
3. 刪除等待 1 秒，但是時間跳太快，看不清楚就閃過去了。後來加入變數條件讓感測器只偵測一次，發現所有時間差都是 0.02 秒。
4. 保持教室光源一致。
5. 在小車前端加裝一顆小豆豆，讓紅外線感測器更容易感測到。
6. 我們發現這個開發板的計時精確度太低，加上結果差距相近，不容易看出變因造成的區別。

BlocklyDuino 和 LinkIt 7697(昱辰)

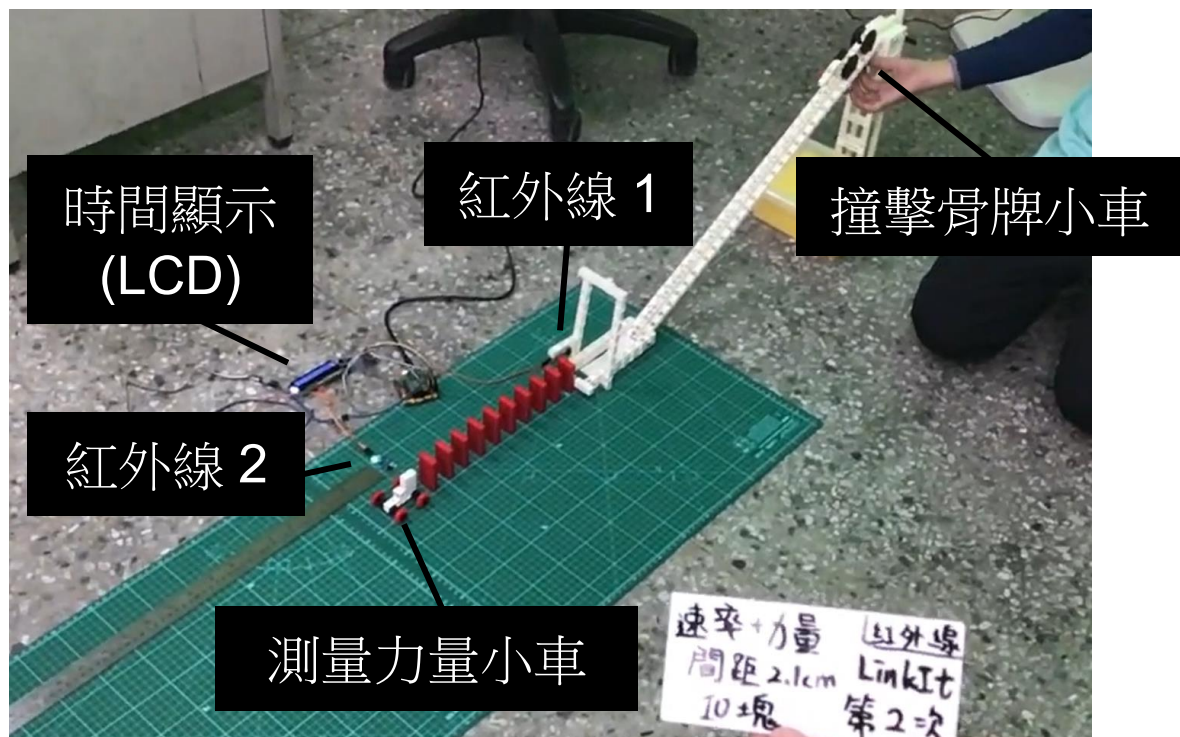
感測器：紅外線 x2
顯示器：LCD 顯示
固定材料：黏土



1. 程式編譯的邏輯不同
2. 紅外線與光敏的感測時間會有差距
3. 無法直接線上嘗試程式邏輯與觀察感測器的狀態

1. 我們使用 AI 輔助修改邏輯不同程式
2. 將光敏感應器改成紅外線感應器
3. 一開始我們使用序列埠確認感測器狀態，後來只用紅燈和 LCD 觀察感測器狀態並開始到結束顯示秒數

伍、研究結果與分析



我們的實驗步驟為：

1. 固定好兩個紅外線感應器、軌道、小車滑行用的墊板，並把撞擊用小車在用棒子固定在軌道上。
2. 利用排骨牌的工具排好骨牌。
3. 將固定撞擊用小車的棒子抽掉，讓車子撞擊骨牌。
4. 紀錄兩個紅外線感應到的時間，再把數字較大的減掉數字較小的，再除以 1000000(測出來的數字是微秒)，就可以算出速率。
5. 紀錄小車跑的距離，並減掉 2.5cm(小車離起始線的距離)，就是骨牌給小車力量。
6. 力量與速率一起，總共測七次，並去掉極端值(最大和最小)，再取平均值。

前置實驗：確認測量工具

研究 1：利用不同自製小車測量骨牌倒下力量

(1) 實驗構想

我們利用智高製作了不同小車，想要測量這些小車能否有效傳達骨牌倒下時的力量，讓我們可以透過小車移動的距離，間接比較骨牌倒下時力量的差異。因此本實驗先比較不同小車的穩定性與可測性，選擇適合後續測量的工具。

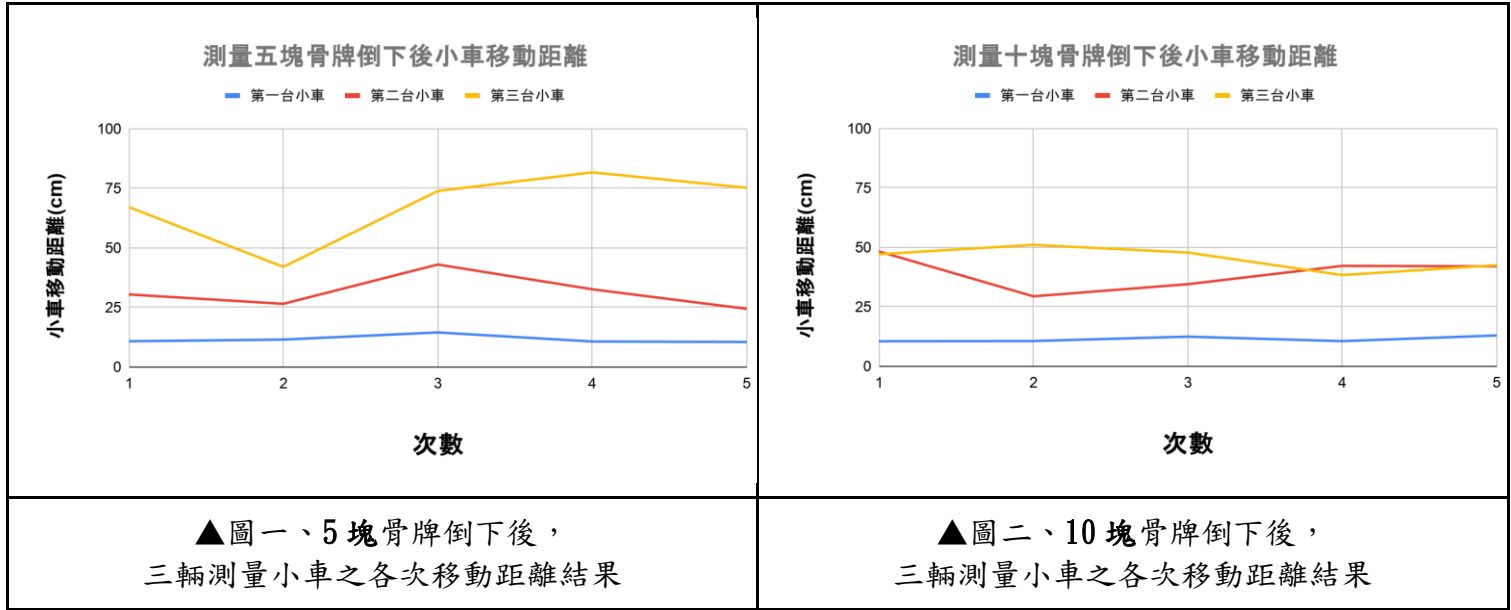
不同小車因結構不同，需搭配不同骨牌與小車之間的距離，因此在實際測量前，我們有先找出骨牌和小車之間放置的適當距離，確認骨牌倒下後，小車不會跳起來且可以順利跑出去的距離，再進行接下來的實驗。

而選擇骨牌間距時，因為我們利用智高製作方便排骨牌的工具，最接近文獻最佳間距的為智高間隔 3 格，因此我們的骨牌間距選擇先固定為 3.1cm。

(2) 實驗紀錄

測量力量的小車	第一台車－骨牌和測量小車之距離(2.5cm)		第二台車－骨牌和測量小車之距離(5.5cm)		第三台車－骨牌和測量小車之距離(4.5cm)	
次數	5 個	10 個	5 個	10 個	5 個	10 個
1	10.8	10.5	30.45	48.3	67.1	47.1
2	11.5	10.6	26.5	29.4	42	51.05
3	14.5	12.45	43	34.5	73.85	47.8
4	10.7	10.55	32.6	42.2	81.65	38.35
5	10.5	12.95	24.4	42	75.2	42.5
小車平均移動距離 (cm)	11	11.2	29.85	39.56666667	72.05	45.8

(3) 實驗小結



1. 比較三台小車的平均移動距離可發現，第一台車在五塊與十塊骨牌下的平均距離分別為 11 cm 與 11.2 cm；第二台車分別為 29.85 cm 與 39.57 cm；第三台車分別為 72.05 cm 與 45.8 cm。
2. 由上兩張圖表可以知道，在五塊骨牌與十塊骨牌的情況下，第一台車的移動距離數值較為集中；第二台車與第三台車的數據變化範圍較大。
3. 綜合平均移動距離，因為第一台車的數據最穩定，所以我們未來的實驗都用第一台車作為測量骨牌倒下力量的工具；而骨牌數量造成的差異，則於後續實驗中透過增加骨牌數量差距進一步觀察。

研究 2：利用自製速率測量儀器比較不同數量的骨牌倒下時的速率

(1) 實驗構想

本研究主要目的為檢驗一塊骨牌倒下的時間差，想確認儀器是否能測出不同骨牌數量下的速率變化。自製速率測量儀器是否能測得合理的速率變化，並觀察不同骨牌數量下的倒下快慢趨勢。我們利用兩個紅外線感測器，紀錄骨牌開始倒下與最後

從參考文獻 02 中，發現骨牌數量不同時，速率可能出現變化，且當骨牌數量增加到較多時，速率會逐漸趨於穩定，因此我們選擇 10、20、30 塊骨牌測試看看儀器測出來的速率是否符合文獻所說。

因為我們利用智高製作方便排骨牌的工具，最接近文獻最佳間距的為智高間隔 3 格，因此我們的骨牌間距選擇 3.1cm。

骨牌速率的計算，由於骨牌間距相同，造成不同數量骨牌的總長度不同，為了比較不同骨牌數量時的速率差異，所以此研究的骨牌速率計算方式為「總時間除以骨牌數量」，表示平均每塊骨牌倒下所需的時間，單位是「秒/塊」(T/塊)。

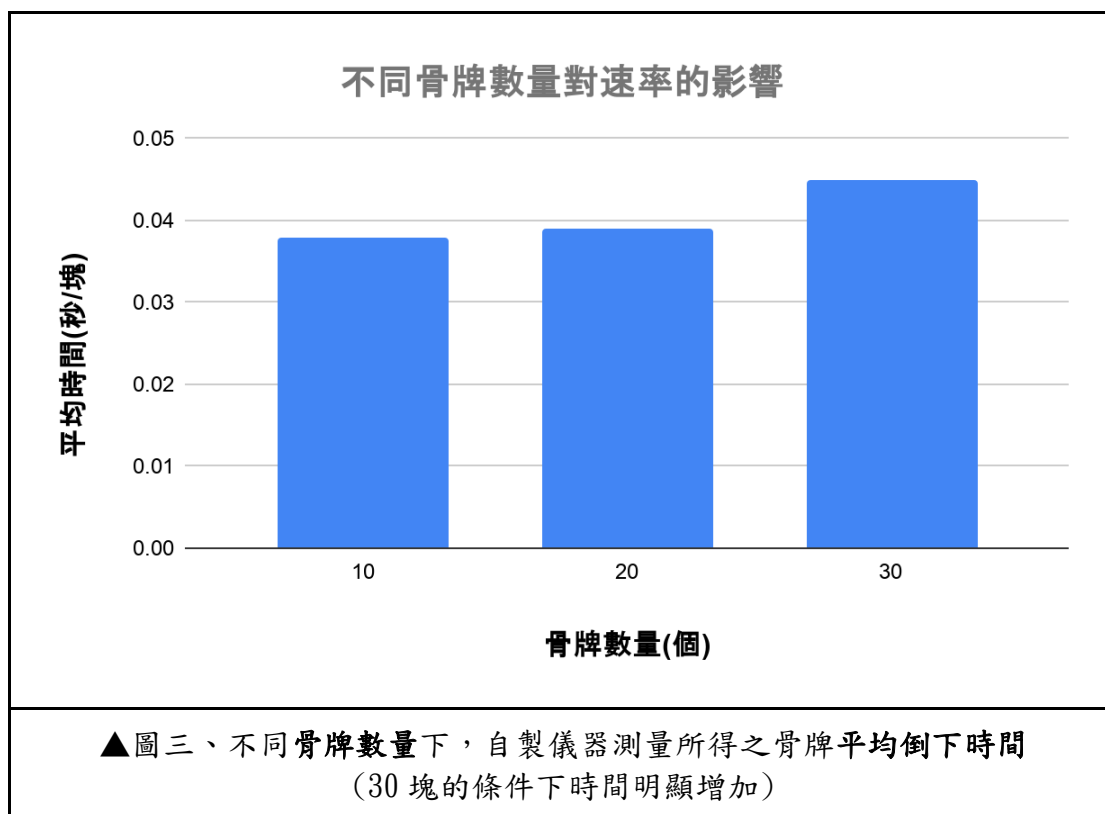
(2) 實驗紀錄

骨牌數量 (塊)	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次	去除極端值 後平均時間 (T/塊)
10	0.0228	0.0319	0.0369	0.0454	0.0347	0.0472	0.0424	0.0383
20	0.0420	0.0378	0.0429	0.0311	0.0363	0.0437	0.0397	0.0397
30	0.0462	0.0461	0.0456	0.0489	0.0444	0.0423	0.0435	0.0452

**本實驗共進行 7 次，去除最大與最小值後，取其餘 5 次平均進行分析。

**時間秒數取到小數點第四位

(3) 實驗小結



1. 由此實驗(圖三)可以發現，10 塊與 20 塊骨牌的平均每塊倒下時間相近（約為 0.038~0.040 秒/塊），差異不大，而 30 塊骨牌倒下時，平均每塊時間明顯較長（約為 0.045 秒/塊）。
2. 在本實驗中，由於 10 塊與 20 塊骨牌的結果相近，表示在此範圍內骨牌數量對結果影響不大，因此為了讓後續實驗操作更簡單且穩定，並減少操作時間與誤差來源，所以之後的實驗都會用 10 塊骨牌進行。

目的一：比較不同骨牌間距對骨牌倒下力量與速率的影響

研究 3：比較不同間距對骨牌速率與力量的影響

(1)實驗構想

我們想知道把骨牌間排得比較近、中等、比較遠，骨牌倒下的力量與速率會不會不一樣？我們利用智高製作便於排骨牌的工具，分別間隔 2 格、3 格和 4 格，對應骨牌間距 2.1 cm、3.1 cm、4.1 cm。我們也參考文獻中對骨牌間距與速率關係的說法，想檢驗間距改變是否會影響骨牌倒下的快慢，以及是否會影響力量的傳遞。

接續研究 2，本實驗固定骨牌數量(10 塊)與排列方式(直線)，以確保僅比較間距對結果的影響。我們骨牌數量使用 10 個骨牌做實驗，因為 10 個骨牌的所需時間比較穩定。

其中，速率以「平均每塊骨牌倒下所需時間（秒／塊）」表示；力量則以骨牌推動小車後，小車的移動距離（cm）作為判斷依據。

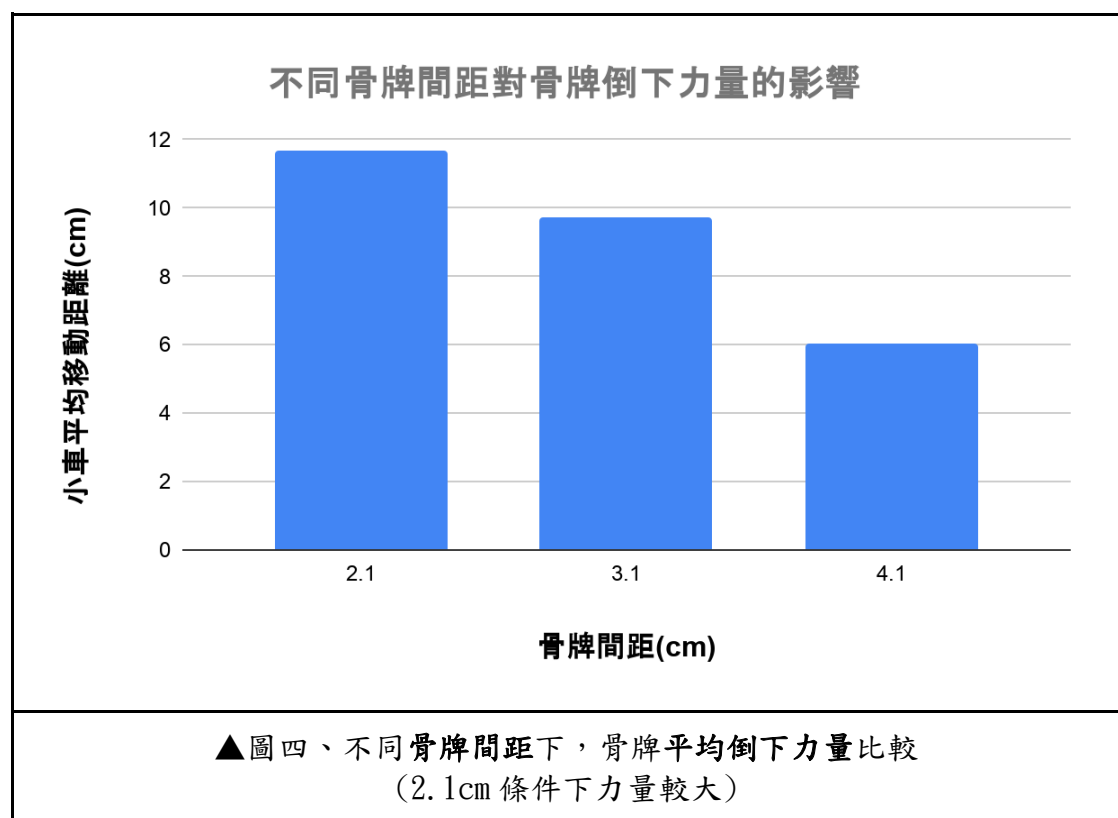
(2)實驗紀錄

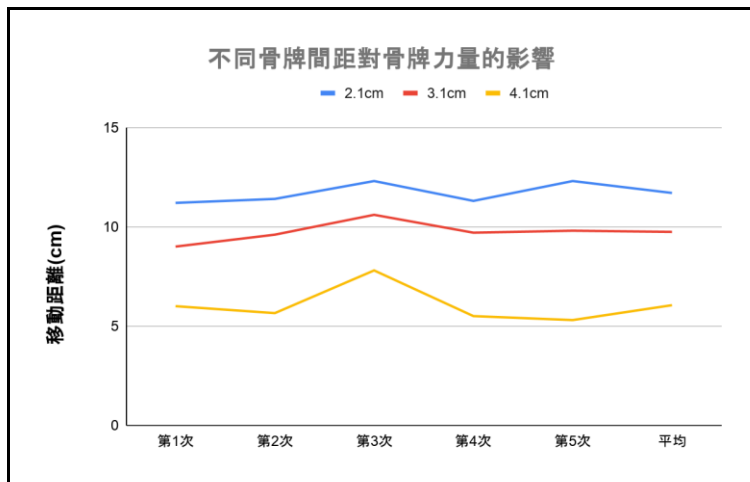
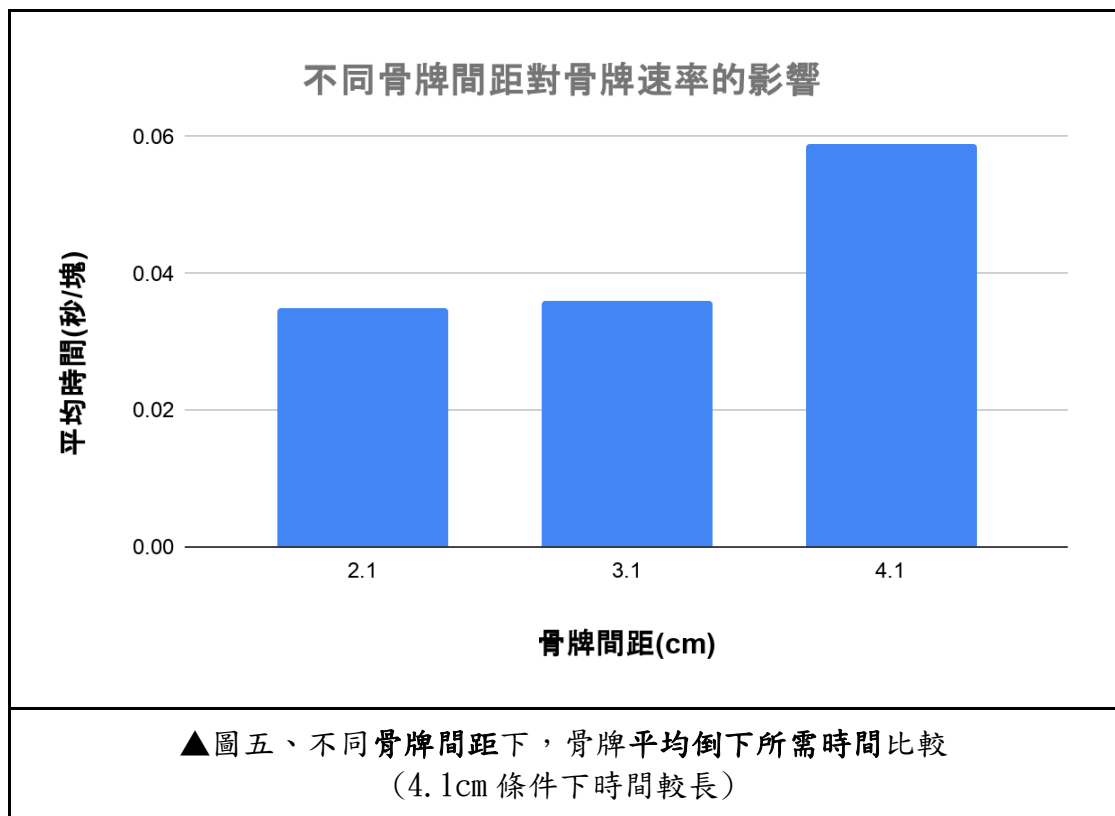
間距(cm)	2.1		3.1		4.1	
測量向度	倒下時間 (秒/塊)	力量(cm)	倒下時間 (秒/塊)	力量(cm)	倒下時間 (秒/塊)	力量(cm)
第 1 次	0.0270	11.2	0.0424	9	0.0775	6
第 2 次	0.0250	11.4	0.0397	7.9	0.0560	5.65
第 3 次	0.0328	12.3	0.0543	9.6	0.0667	7.8
第 4 次	0.0476	11.3	0.0353	10.6	0.0500	5.5
第 5 次	0.0355	11.1	0.0304	10.6	0.0545	4.3
第 6 次	0.0333	12.9	0.0332	9.7	0.0719	5.3
第 7 次	0.0511	12.3	0.0151	9.8	0.0464	9
平均	0.0352	11.7	0.0362	9.74	0.0598	6.05

**本實驗共進行 7 次，去除最大與最小值後，取其餘 5 次平均進行分析。

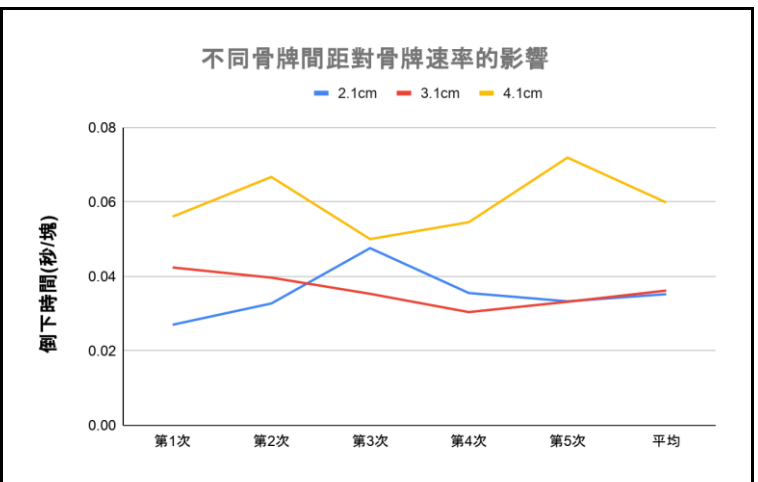
**時間秒數取到小數點第四位

(3)實驗小結





▲圖六、不同骨牌間距下，骨牌倒下力量之各次測量與平均值



▲圖七、不同骨牌間距下，骨牌倒下時間之各次測量與平均值

1. 去極端值後，骨牌倒下力量在間距 2.1、3.1、4.1(cm)的平均值，分別為 11.7、9.74、6.05(公分)。
2. 去極端值後，骨牌倒下時間在間距 2.1、3.1、4.1(cm)的平均值，分別為 0.0352、0.0362、0.0598(時間/骨牌個數)。
3. 由此平均數據可知(圖四、圖五)，當骨牌間距增加較大時，時間變長且力量減少。
4. 從圖六和圖七可以看出，雖然 2.1cm 條件下力量較大、時間較短，但其各次數據起伏較明顯；3.1cm 條件下數據較集中、變動較小，穩定性較

佳。，所以接下來的實驗都會用骨牌間距 3.1 公分來做實驗。

目的二：比較不同錯位距離對骨牌倒下力量與速率的影響

研究 4：比較不同錯位距離對骨牌速率和力量的影響

(1)實驗構想

我們想比較不同排列方式下，骨牌倒下的力量與速率是否會改變，並在固定骨牌間距（3.1 公分）與骨牌數量（10 塊）的條件下進行比較。

參考文獻 03 中提到，只要有錯位，錯位越大、力量傳遞效率越差、時間就會增加越多。其中參考文獻 03，在錯位距離與底面積長邊的比例為 14 - 60% 為穩定且可觀察速度差，比例 > 70%，可能出現不穩或倒下失敗的情形。而參考文獻 03 中，最小偏離比例為 23.1% (約 1/4)，倒下時間還是明顯長於直線。

因此我們選擇偏離底面積長邊比例約 0%、25%、50% 作為這次實驗的項度，分別是錯位 0 公分、0.66 公分和 1.32 公分。

其中，速率以「平均每塊骨牌倒下所需時間（秒／塊）」表示；力量則以骨牌推動小車後，小車的移動距離（cm）作為判斷依據。

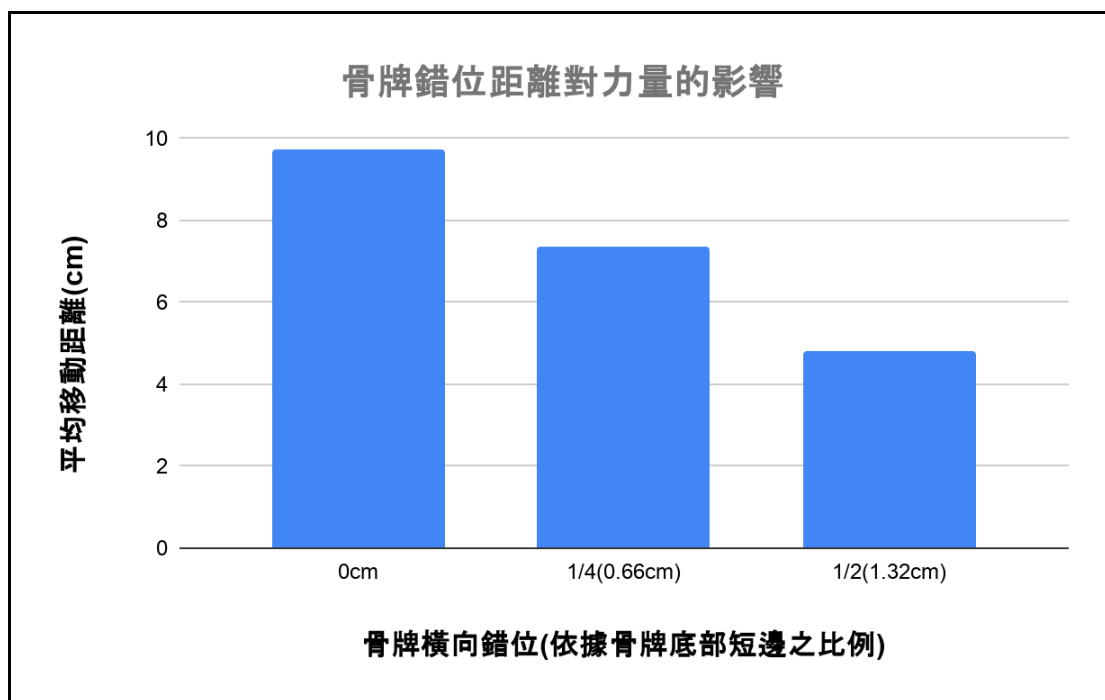
(2)實驗紀錄

錯位比例	0cm		1/4(0.66cm)		1/2(1.32cm)	
測量向度	倒下時間 (秒/塊)	力量 (cm)	倒下時間 (秒/塊)	力量 (cm)	倒下時間 (秒/塊)	力量 (cm)
第 1 次	0.0424	9	0.0452	7.5	0.0496	5.7
第 2 次	0.0397	7.9	0.0363	6.25	0.0571	6.15
第 3 次	0.0543	9.6	0.0440	6.1	0.0471	2.9
第 4 次	0.0353	10.6	0.0443	7.5	0.0517	4.35
第 5 次	0.0304	10.6	0.0471	7.75	0.0600	6.65
第 6 次	0.0332	9.7	0.0373	9.3	0.0414	6.05
第 7 次	0.0151	9.8	0.0418	7.8	0.0518	6.9
平均	0.0362	9.74	0.0425	7.36	0.0483	4.8167

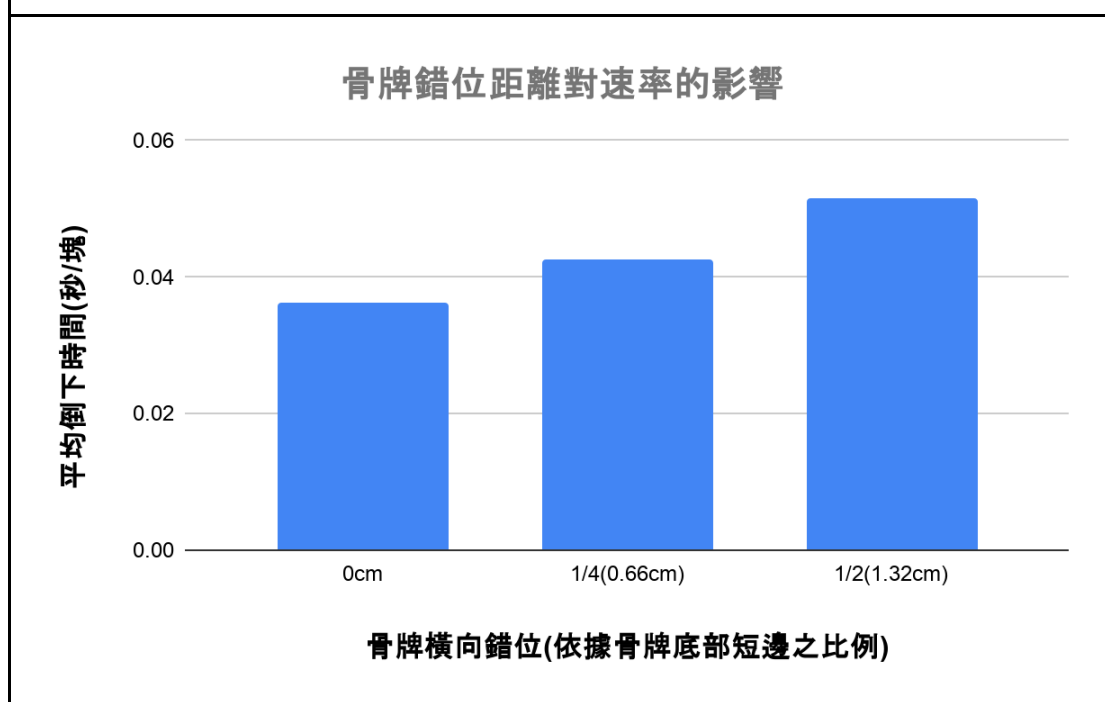
**本實驗共進行 7 次，去除最大與最小值後，取其餘 5 次平均進行分析。

**時間秒數取到小數點第四位

(3)實驗小結



▲圖八、不同骨牌錯位距離下，骨牌平均倒下力量比較
(錯位 1.32cm 條件下力量較小)



▲圖九、不同骨牌錯位距離下，骨牌平均倒下所需時間比較
(錯位 1.32cm 條件下時間較長)

1. 去除極端值後，骨牌錯位距離 0cm、1/4(0.66cm)、1/2(1.32cm)的平均力量分別為 9.74、7.36、4.82(cm)。
2. 去除極端值後，骨牌錯位距離 0cm、1/4(0.66cm)、1/2(1.32cm)的平均倒下時間分別為 0.0362、0.0425、0.0551(秒/塊)。

3. 由此實驗可知，當錯位距離增加時，力量有下降趨勢，而每塊骨牌倒下所需時間則略有增加，與文獻 03 所提出「錯位增加會降低傳遞效率」的趨勢相符。

目的三：比較不同轉彎角度對骨牌倒下力量與速率的影響

研究 5：比較不同轉彎角度對骨牌速率和力量的影響

(1) 實驗構想

我們想比較不同轉彎角度下，骨牌倒下的力量與速率是否會改變。參考文獻 01、03 中提到，直線排列的骨牌較穩定，且速率較快。參考文獻 03 指出彎道超過 60 度骨牌傳遞的成功率會下降，而轉彎 180 度的骨牌方向會完全反轉，因此我們挑選 0 度、90 度、180 度作為代表。

本研究在固定骨牌間距（3.1 公分）與骨牌數量（10 塊）的條件下，比較不同轉彎角度對骨牌倒下速率與力量影響。

其中，速率以「平均每塊骨牌倒下所需時間（秒／塊）」表示；力量則以骨牌推動小車後，小車的移動距離（cm）作為判斷依據。

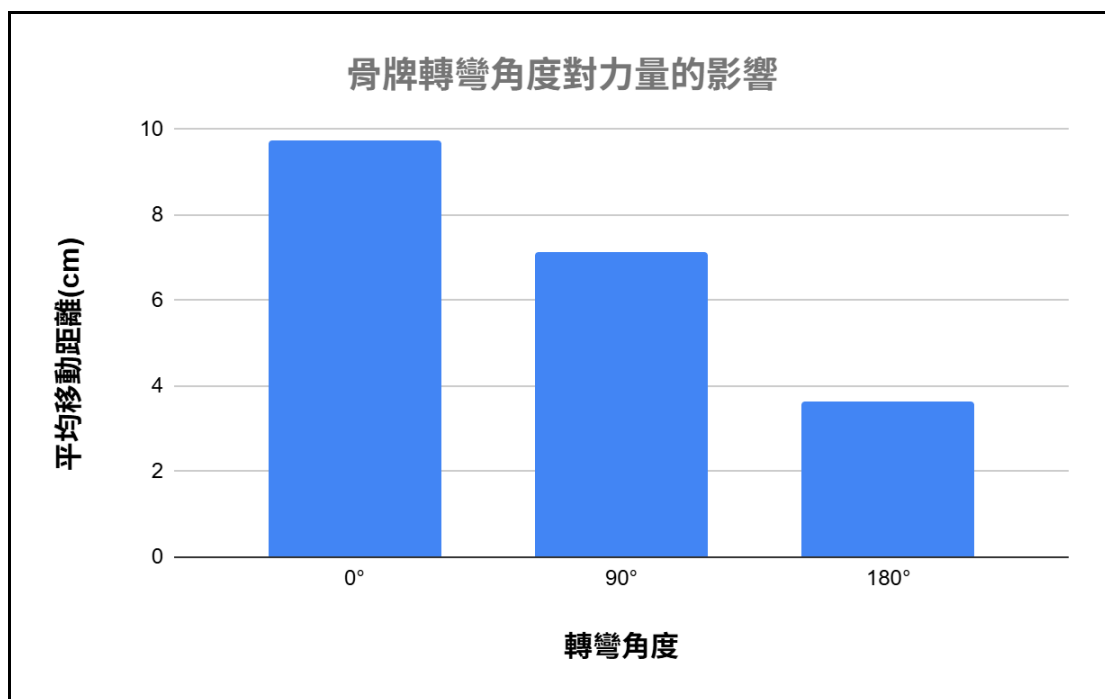
(2) 實驗紀錄

角度(°)	0		90		180	
測量向度	倒下時間 (秒/塊)	力量 (cm)	倒下時間 (秒/塊)	力量 (cm)	倒下時間 (秒/塊)	力量 (cm)
第 1 次	0.0424	9	0.0497	5.9	0.0378	3.8
第 2 次	0.0397	7.9	0.0439	8.6	0.0482	3.8
第 3 次	0.0543	9.6	0.0390	6.8	0.0441	4
第 4 次	0.0353	10.6	0.0376	7.6	0.0439	3.9
第 5 次	0.0304	10.6	0.0507	6.7	0.0513	3.95
第 6 次	0.0331	9.7	0.0418	5.8	0.0187	2.7
第 7 次	0.0150	9.8	0.0335	10.2	0.0597	1.9
平均	0.0362	9.74	0.0424	7.12	0.0450	3.63

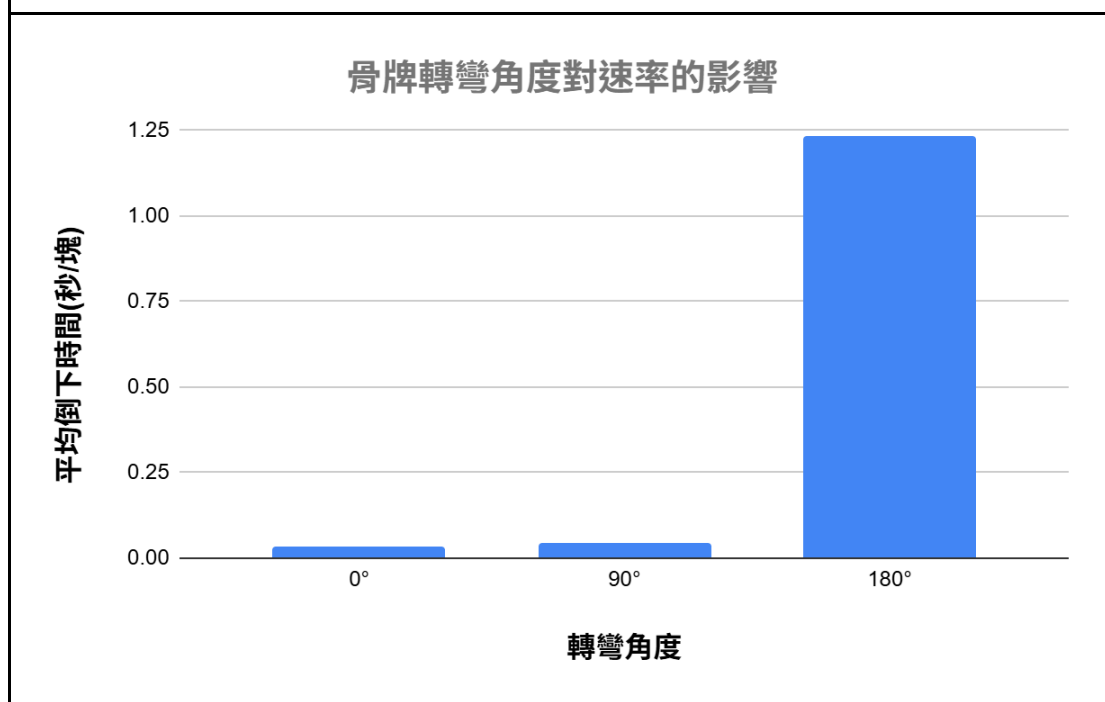
**本實驗共進行 7 次，去除最大與最小值後，取其餘 5 次平均進行分析。

**時間秒數取到小數點第四位

(3)實驗小結



▲圖十、不同骨牌轉彎角度下，骨牌平均倒下力量比較
(轉彎 180° 條件下力量較小)



▲圖十一、不同骨牌轉彎角度下，骨牌平均倒下所需時間比較
(轉彎 180° 條件下時間明顯較長)

1. 總結五次紀錄，轉彎角度 0 度、90 度、180 度平均倒下的時間分別為：0.0362、0.0424、0.0450 (秒/塊)。

2. 總結五次實驗，0 度、90 度、180 度的平均力量分別為：9.74、7.12、3.63（公分）
3. 在轉彎處觀察到倒下速度明顯減慢，甚至出現骨牌傳遞不順或中斷的情形，造成實驗結果差異較大，可能與轉彎時能量傳遞較不穩定有關，這也與參考文獻 03、05 所提到轉彎會降低傳遞效率的趨勢相符。，平均每塊骨牌倒下所需的時間略有增加，力量有下降的趨勢。

陸、結論與建議

一、比不同小車測量骨牌倒下力量(前置實驗)

- (一)比較三台小車的平均移動距離可發現，在五塊骨牌與十塊骨牌的情況下，第一台車的移動距離數值較為集中；第二台車與第三台車的數據變化範圍較大，因此我們未來的實驗都用第一台車作為測量骨牌倒下力量的工具。

二、利用自製速率測量儀器比較不同數量的骨牌倒下時的時間(前置實驗)

- (一)我們一開始用 phyphax 聲學碼表，但是從龐大的數據中無法得知哪些是骨牌倒下所發出的聲音。後來我們改用 Quno 跟 Qblock 進行時間測量，雖然能紀錄數據，但是因為它的數據不夠精準，導致無法觀察出數據的細微差距。最後我們用 LinkIt7697，較能看出不同變因下數據間的差距了。

三、比較不同間距對骨牌速率與力量的影響

- (一)我們發現，在骨牌高度為 5.3cm，間距 2.1、3.1、4.1 公分的條件下，間距較小時骨牌傳遞較快且力量較大，而間距增加時，傳遞時間增加、力量減小，並非最佳間距為骨牌高度的一半。
- (二)此實驗的數據與參考文獻 01、02、03、05 的趨勢大致相符，不符合文獻 04，顯示實驗設計（如骨牌數量或排列方式）也會影響實驗結果。

四、比較不同錯位距離對骨牌速率和力量的影響

- (一)由實驗可發現骨牌的錯位距離越大，所傳遞的力量會越來越小，速率也會越來越慢
- (二)錯位距離越大，力量和速率會越弱和越小，與文獻 03 提到的「錯位增加會降低傳遞效率」趨勢相符。

五、比較不同轉彎角度對骨牌速率和力量的影響

- (一)以 0 度、90 度、180 度實驗，發現當轉彎角度越大，其速率越慢；當轉彎角度越小，其力量越大。
- (二)實驗結果觀察到轉彎處的骨牌倒下速度明顯減慢，與參考文獻 03、05 所提到轉彎會降低傳遞效率的趨勢相符

六、未來研究建議

- (一)研究數據多做幾次，可能較能測得穩定的結果
- (二)設計自動的排骨牌機器，在實驗進行時，會較為順利與穩定
- (三)自製測量速率儀器時，要注意程式的延遲與不穩定，可更進一步用較精密的儀器確認自製儀器的準確度
- (四)這次利用開發板與程式設計來測量骨牌倒下速度，未來也可以應用在其他科學實驗中。

參考資料

1. 葉力維、黃耀仟（2003）。**極速骨牌：骨牌終端速度及連鎖反應機制之探討**。國立新竹高級中學。臺灣二〇〇三年國際科學展覽會。
2. 蘇庭庭、曾子芸、林庭揚（2011）。**Domino & Taguchi－骨牌效應與極速最佳因子研究**。高雄市立英明國民中學。中華民國第 51 屆中小學科學展覽會。
3. 許逸群、潘辰瑜、陳奕臻、曾英澤、林蔚典(2013)。**骨牌玄機-骨牌倒下的原理與影響因素之探討**。高雄市三民區東光國民小學。中華民國第 53 屆中小學科學展覽會。
4. 無作者。（2013）。**大隊接力：骨牌傳遞速度之探討**。嘉義縣國民中小學科學展覽會。
5. 梁鎮堃、陳玟馨、林若臻、陳昱帆（2014）。**東引卡蹺骨牌風景**。連江縣立東引國民小學。中華民國第 54 屆中小學科學展覽會。
6. **塑膠材料知識：ABS/PS 的性質**。LC Plastic。取自：
<https://www.lcpf.com.tw/tw/knowledge/plastic-material/005?page=1&rtnKind=list>
7. 骨牌的學習與知識。Domino 骨牌網。
取自：<https://domino.net.tw/learning/>
8. 骨牌教學(domino teaching)。(2020-2021)。UDN 部落格。
取自：https://blog.udn.com/200power/article?f_ART_CATE=1193650