在这项研究中，我们引入一个基于稳态视觉诱发电位（SSVEP）的新型智力拼写系统，采用QWERTY风格布局键盘，30个LED闪烁频率不同。提出的基于脑电图（EEG）的智力拼写系统允许用户为每个目标选择拼写一个目标字符，而不需要传统的基于SSVEP的智力拼写系统采用多个步骤选择。通过初步的离线实验和在线实验，我们证实了频率分辨率为0.1Hz的视觉闪烁刺激引起的人SSVEP可以被分类到足够高的分类准确度以用于实际的脑机接口（BCI）系统。在五位参与者的初步离线实验中，我们优化了影响智能拼写系统性能的各种因素，如相邻键之间的距离，光源排列，刺激频率，记录电极和视角等。其他在线实验进行了六名参与者，以验证优化智力拼写系统的可行性。在线实验的结果是平均打字速度为9.39字/分（LPM），平均成功率为87.58％，对应于每分钟40.72比特的平均信息传输速率，表明发展中的智力拼写的高性能系统。事实上，本研究所获得的9.39LPM的平均打字速度是以前BCI文献中报道的最好的LPM结果之一。

到目前为止，大多数心理拼写系统都是基于P300实现的，P300是一种事件相关电位（ERP），由不频繁的，与任务有关的刺激引发。 在P300拼写系统中，字符一般呈矩阵排列，其中行列以伪随机序列加强。 当个体专注于目标角色时，无论何时包含目标角色的行或列都被强化，都会引发强烈的P300反应。 基于这个原理，P300拼写检测系统可以通过查找显示最强的P300响应的行和列的交集来检测目标字符。

最近，一些BCI研究表明，智力拼写系统也可以基于稳态视觉诱发电位（SSVEP）来实现，SSVEP是一种周期性的大脑反应，通过不断呈现视觉频率刺激。在P300拼写系统中，一个目标字符可以由一个命令拼写，因为矩阵数组的每个单元格都直接分配给一个字符。然而，迄今为止引入的SSVEP拼写系统需要产生两个或更多个连续的命令来拼写一个目标字符，因为传统的拼写系统使用的视觉刺激的数量少于目标字符的数量。

就我们所知，SSVEP智力拼写系统可以像P300拼写系统一样拼写每个目标字符，但尚未引入。为了实现这样的SSVEP智力拼写系统，刺激频率的数量应该至少大于显示的字符的数量。然而，在实际的BCI应用中，可用的刺激频率通常受到几个因素的限制。首先，不是所有的刺激频率总是引起高SSVEP响应。能够引起强烈的SSVEP反应的频率高度依赖于个体以及各种环境因素，例如视觉刺激的颜色，大小和对比度。其次，由于谐波SSVEP响应，如果F1是F2的倍数，反之亦然，则必须避免在同一个实验中使用两个频率F1和F2。最重要的是，在使用计算机监视器来呈现视觉刺激的情况下，如在最发达的SSVEP拼写系统中，必须将刺激频率设定为监视器刷新率的因数，以获得准确的SSVEP响应。由于这些原因，现有的SSVEP拼写系统仅用四个或五个刺激频率来实现，并采用“多步选择”策略拼写每个目标字符。

这项研究的最终目标是开发一个新的SSVEP拼写系统，能够为每个目标选择拼写一个目标角色，就像基于P300的智力拼写游戏一样。为此，我们使用30个不同频率闪烁的发光二极管（LED），实施了一个包含30个字符（26个英文字母和4个特殊符号）的修改的QWERTY布局拼写系统。选择5-9.9Hz的频带，并以0.1Hz的跨度均匀分割。使用5个参与者进行初步离线实验，以测试是否可以将具有该小频率跨度的人SSVEP响应用足够高的分类准确度进行分类以应用于BCI系统。在根据初步实验的结果对脑力拼写系统的参数进行优化之后，通过6名参与者进行了在线实验，以进一步证明我们的脑力拼写系统是否可以用于实际的脑机接口应用。

Method：

参与者和实验条件

十名健康参与者（八名男性和两名女性，21-27岁）参加了我们的研究。其中5人参加了初步的离线研究（名为参与者P1-P5），其中一人（参与者P5）也参加了第一版脑力推进器的试点在线实验。另外五名参与者（全部是24-27岁的男性，名为参与者P6-P10）被招募来评估第二版脑力拼写器的表现并且仅参与在线实验。所有参与者的视力正常或矫正到正常，没有曾经有神经病学，精神病学或其他严重疾病史，否则可能影响实验结果。实验过程的详细总结向每个参与者解释，所有参与者在实验前签署书面同意书。参与者在试验后收到货币报销。这项研究由韩国汉阳大学的机构审查委员会（IRB）审查和批准。

为记录由闪烁视觉刺激调制的脑电信号，根据国际10-20系统，将三个电极（Oz，O1和O2）安装在参与者头皮的枕部区域。 在脑电数据采集过程中，与会者坐在舒适的扶手椅上面对发达的智力拼写者，被要求不要移动身体，特别是颈部。当参与者关注不同频率的字符闪烁时，使用多通道EEG采集系统在昏暗的隔音室中记录EEG信号。 参比电极和接地电极分别放置在右耳和左耳后面。 脑电信号在512 Hz采样，灵敏度为7μV。 采样前应用截止频率为0.7 Hz和50 Hz的抗混叠带通滤波器。

精神拼写器的设计

改进的QWERTY键盘布局被设计来实现所提出的智力拼写系统。 如图1所示，将三十个键尽可能相似地放置到传统的QWERTY键盘布局。 将二十六个键分配给每个英文字母，其余四个键分配给BACKSPACE，ENTER，PUNCTUATION和SPACE。 除了ENTER和SPACE以外，每个键的面积都是相同的2厘米×2厘米。 相邻按键之间的距离水平和垂直均为1cm。

在参加初步离线实验的参与者意见的基础上，经过与5位参与者的初步离线和在线实验，稍微改变了脑分布的布局，以防止周边视觉引起的混淆。在我们的智力拼写器的第二个版本中，相邻键之间的距离被水平和垂直设置为2厘米。第二版智力拼写器的其他部分与第一个智力拼写器的版式相同。

精神键盘系统是由厚厚的白纸，透明薄膜，LED和LED控制器制成的。我们首先在白纸上打印出三十个键，然后切出字形，在其下方各有四个方形多芯片高通量LED（部件编号：DG-82A83C-001-5 / S-3）发光强度6000mcd（工作电流：20mA;视角：2θ= 60°;峰值波长：0.26 / 0.28nm;发光颜色：白色;镜片颜色：水）。为了将发射的光线仅准直到正面方向，LED阵列的每一侧都被黑纸覆盖。接着，在印刷纸张的前面贴上透明薄膜，使发出的光线漫射。为了控制LED，我们将一个使用TMS 320 F2812 DSP芯片（德州仪器公司）的LED控制器集成到智能拼写系统中。每个键的闪烁频率可以通过作者开发的内部软件很容易地调整（见图3预先检查集成系统）。

刺激频率的安排

按照经验选择5-9.9Hz的频带，并以0.1Hz的范围均匀分割。从而选择50个频率作为刺激频率的候选。由于引起最强SSVEP反应的特定刺激频率因个体而异，因此对于每个参与者使用不同的30个刺激频率的组合。为了选择刺激频率的最佳组合，我们记录了脑电信号，同时参与者观看了50个闪烁的LED中的每一个10秒。在初步记录之后，对每个候选刺激频率评估频谱功率，然后选择显示相对较强频谱功率的30个频率。对于一些参与者（参与者P6-P10），他们对所有五十个刺激频率做出了相当好的反应，使用了前三十个频率（5-7.9 Hz，跨度为0.1 Hz）。最后，将选定的30个刺激频率分配给每个按键，此时每个频率按照尽可能远离分配给其相邻LED的顺序被分配，以便最小化由周边视觉引起的混乱。 相邻键之间的最小频率差被设定为0.7Hz。 图2显示了假设30个频率范围从5Hz到7.9Hz，跨度为0.1Hz的刺激频率排列的一个例子。

实验步骤

初步离线实验是由五名参与者使用第一版脑力拼写器进行的，目的是验证是否可以对具有如此小的频率跨度的SSVEP响应进行分类，从而用于实际的基于SSVEP的BCI系统。在我们的初步离线实验中，要求参与者根据实验负责人的口头指示，以随机顺序将每个人物聚焦10秒。这个过程重复了两次以获得两组三十个SSVEP时期。为了调查视角的影响，表示被观察对象对眼睛的角度对拼写系统的表现的影响，在参与者的鼻子和心理之间的两个不同距离（44和60厘米）处获取脑电信号拼写。 由于第一版智力拼写器的总宽度为32厘米，因此对于40的视角，44厘米是最适当的，对于30°的视角，66厘米的距离是适当的。

其中五名参与者之一（P5）也在预备实验的第二天参加了使用第一版智力拼写器的试点在线实验。参加初步离线实验的另外四名参与者（P1-P4）拒绝参加在线实验，因为我们的实验室在本研究期间移动到了远离原来地点的另一个城市。根据离线分析的结果，在线实验中使用了两个电极（Oz和O2）和40°的视角（参见表1，提前查看离线实验结果）。我们测试了十五个英文单词（68个字符）。如果出现错误，参与者可以使用“BACKSPACE”键更正拼写错误的字符。结果被提供给参与者实时使用视觉和听觉信息（见补充电影文件）。我们测试了拼写一个字符（5,6和7秒）所需的三个不同的时间段来调查脑力拼写系统的表现的变化。图3显示了参与者（P5）试图拼写“X”以完整拼写给定的英语单词“TAXI”的在线试验的屏幕截图。

为了进一步确认我们的拼写系统的可行性，使用第二个版本的智力拼写器进行了其他的在线实验，这些拼写器的相邻键之间的距离比第一个版本的智力拼写器要长。我们评估了新招募的五名志愿者没有参加初步实验的第二版拼写器的表现。在在线实验之前，根据每个参与者的初步EEG记录的离线分析，对每个参与者（Oz和O1参与者P6，P7，P8和P9;参与者P10的Oz，O1和O2）独立选择最佳电极位置在线实验之前。下一节将介绍选择最佳电极组合的详细步骤。参与者与智力拼写者之间的距离经验设定为50厘米，因为我们初步的离线研究表明，视角对拼写器性能的影响并不显着。在网上实验之前，参加者需要30分钟的训练时间才能习惯拼写系统。在培训期间，没有提供任何反馈。每个参与者被要求拼写在以前的在线实验中使用的15个英文单词（68个字符）。拼写一个字符所需的时间被设置为6秒。由于一名参与者（P6）拼写所有给定的68个字符没有任何错误，我们进一步测试了参与者的较短的时间段（4s和5s）。在线实验的电影可以在附加的补充电影文件中找到，其中三个参与者（P5，P7和P8）拼写给定的英文单词。

EEG信号分析

为了使用SSVEP响应作为特征向量，使用具有0.1Hz的频率分辨率的快速傅立叶变换（FFT）来估计记录的EEG数据的频谱密度。 由于我们使用了不同的时间段（4,5,6和7 s），因此在EEG数据的末尾添加了适当数量的零，以保持频率分辨率为0.1 Hz。在初步离线分析中，在每个试验的每个电极位置评估在刺激频率H1（单位：uV^2）和二次谐波频率（2×刺激频率）下的SSVEP振幅H2。 然后，用H1和H2的算术和构造特征向量，因为谐波频率分量可以提高分类精度。 对于分类，我们使用简单的分类算法，发现H1 + H2最大的频率。

为了确定每个参与者的最佳电极组合，我们评估了三种记录电极（O1，Oz，O2，O1 + Oz的平均值，O1 + O2的平均值，Oz + O2的平均值，O1+Oz+O2的平均值），固定的分析窗口大小为10 s。 根据结果，确定每个参与者的最佳电极组合作为显示最高分类准确度的参数，用于在线实验。

在线实验中，我们使用了与离线分析相同的分类方法。 为了评估拼写系统的在线性能，我们计算了分类精度，信息传输速率（ITR）和每分钟解码字符数（LPM）。 ITR和LPM已被广泛用于许多BCI研究中，以量化开发的BCI系统的速度。

结果

离线实验的结果

表1给出了每个参与者对不同视角和电极组合的分类准确性。当考虑到产生最佳分类精度的最佳电极组合时，在40°和30°的视角获得76.67％和72.33％的平均分类准确度。由于我们发现视角对拼写器性能的影响不是很显着（p = 0.625，Wilcoxon符号秩和检验），我们并没有为在线实验中的每个参与者定制视角。当然，视角的个性化定制可以提高我们的拼写器的性能，但是我们不能定制这个因素，因为我们不得不考虑参与者的疲劳而缩短实验的总体时间。通过离线实验，我们确认了电极组合应该针对每个个体进行定制，这在以前的SSVEP研究中经常被报道。因此，在线实验中，根据初步SSVEP记录的离线分析，为每个参与者独立确定最佳电极组合。考虑到机会水平只有3.33％（1/30），我们可以确认使用我们的脑力拼写系统实际BCI系统的可能性。

在线实验结果

表2显示了在线实验结果的一个例子（参与者P5），其中显示了完整的分型序列。 随着时间的延长，分类精度略有提高（5 s：84.69％，6 s：86.17％，7 s：89.53％）。 但是，应该指出的是，随着时间的缩短，LPM和ITR都增加了（5s：10.16字/分钟和42.55比特/分钟，6s：8.62字/分钟和36.55比特/分钟，7s：7.64字/分钟和33.55比特/分钟）。 参与者P6的结果显示与参与者P5类似的倾向（参见表3）。 这些结果表明，应认真考虑两个指标（LPM和ITR（bit/min））之间的权衡和打字的准确性，以实施一个实用的BCI拼写系统。

在线实验的所有结果总结在表3中，其中只有参与者P5的结果是使用第一版脑力拼写器获得的。 平均准确度ITR和LPT分别为87.58％，40.72比特/分和9.39个字/分。 本研究获得的9.39字/分钟的LPM与先前在BCI文献中报道的最佳结果相当。 值得注意的是，参与者P6的分类准确率在6秒内为100％，而最高的LPM为12个字母/分钟，持续4和5秒。 实验结果表明，我们提出的SSVEP智力拼写系统可以作为一个实用的BCI脑力拼写器。

讨论

自从第一台P300拼音器被Farwell和Donchin引入以来，大多数BCI拼写系统都是基于P300模式实现的。 最近，一些BCI研究引入了基于SSVEP的智力拼写系统。 与P300拼写系统相反，通常使用矩阵布局，提出了各种拼写器布局来实现SSVEP拼写系统; 所有这些人使用的视觉刺激的数量少于目标人物的数量。 在这项研究中，我们首先介绍了一个SSVEP拼写系统，它具有与目标字符数相同数量的视觉刺激，从而允许用户为每个目标选择拼写一个目标字符。 从离线和在线实验的结果，我们证明了所提出的精神拼写系统的可行性。

ITR已被用作评估BCI系统性能的代表性指标。但是，由于可以通过简单地增加可检测目标的数量来实现高ITR，所以BCI系统的性能不应该仅由ITR来评估。

出于这个原因，最近BCI的一项研究引入了一个新的评估指数叫做命令转移间隔（CTI）来量化一个命令所需的平均时间。另一方面，在智力拼写应用中，LPM通常与ITR一起估计以评估用户每分钟能够拼写多少个字符。在这项研究中，我们通过在线实验获得了9.39的平均LPM。 BCI最近关于精神分析仪应用的研究显示平均LPM为7.45和10.75，这是以前在文献中报道的最新结果。基于这个比较，我们可以证实我们提出的拼写系统是高性能的脑力拼写系统之一。我们将继续尝试通过引入新的特征选择/分类算法和信号处理方法来提高我们的脑力拼写器的整体性能。请注意，我们没有应用任何特定的信号处理算法来提高记录的SSVEP的信噪比。

我们的心理拼写系统和其他SSVEP研究中提出的最大区别在于拼写一个目标人物所需的命令数量。因此，两种BCI拼写系统各有利弊。以前的SSVEP智力拼写系统有一个优点，就是因为他们使用少量的视觉刺激（4或5），并且每个视觉刺激远离其他视觉刺激，所以它很容易产生单个命令。这些基于SSVEP的拼写系统的另一个优点是可以用较短的分类时间窗获得较高的分类准确度。然而，在传统的拼写器中，目标选择过程相对复杂，因为用户必须产生连续的命令来选择目标字符。相反，所提出的智力拼写系统的优点在于用户可以用单个命令拼写每个目标字符，因为每个视觉刺激被直接分配给每个字符，就像基于P300的拼写器一样。我们的拼写系统的弱点是由周边视觉引起的干扰，有时会造成拼写错误。事实上，通过扩大第二版脑力拼写器的键间距离，系统的整体准确性得到了提高。因此，在我们未来的研究中，我们将进一步优化相邻按键之间的距离，或者开发一个能帮助用户更好地关注目标刺激的训练系统。

在Gao等人的研究中首次引入了基于多LED的SSVEP BCI系统。基于SSVEP的BCI系统由48个频率分辨率约为0.2 Hz的LED组成，已成功应用于电视遥控器。 Gao等人的研究是非常有意义的，因为他们展示了在实施基于SSVEP的BCI系统中同时使用高频率分辨率高达0.2Hz的大量视觉刺激的可能性。然而，他们的研究没有考虑可能影响基于SSVEP的BCI拼写系统的性能的各种因素，例如相邻键之间的距离，光源布置，视角等等。在我们的研究中，通过初步离线实验优化了这些因素后，我们实现了一个基于多LED的SSVEP BCI拼写系统，并且展示了频率分辨率为0.1 Hz的人类SSVEP可以用于实现基于SSVEP的BCI拼写系统。最近的一项研究介绍了一种高速SSVEP BCI系统，该系统也具有与目标数目相同数量的视觉刺激，因此可以为每个目标选择产生一个完整的命令。他们的研究使用编码调节视觉诱发电位（C-VEP）。研究报告的平均ITR为108比特/分钟，这显然是迄今为止在脑电图BCI文献中报道的最好结果之一。与传统的基于SSVEP的BCI系统不同，C-VEP BCI系统在主试验之前需要一个训练阶段来构建参考模板。这是因为通过选择最大化相关系数来识别目标。因此，作为研究的作者也在他们的文章中提到，系统性能可能会受到构建的参考模板的影响，特别是当目标数量增加时。在基于模板匹配的BCI系统的情况下，数据库模板需要更新，因为参考模板可能随时间变化。相反，对于传统的基于SSVEP的BCI，一旦参与者以不同的频率响应视觉刺激闪烁，高系统性能可以维持较长时间，如在许多基于SSVEP的BCI研究中所证明的。由于我们的基于SSVEP的BCI拼写器也不需要任何参考模板，所以可以很容易地实施一个设置时间很短的实用的脑力拼写系统。

通过许多SSVEP研究已经揭示，人SSVEP可以在1-90Hz的宽频带内产生。 但是，有一些文献探索了人脑可以区分的SSVEP的频率分辨率。 迄今为止所研究的SSVEP的最小频率分辨率大约是0.2Hz。

在目前的研究中，我们使用了0.1Hz范围内的闪烁频率，并证明具有该频率分辨率的SSVEP可以用于实际的BCI系统。 调查人脑识别的SSVEPs的频率分辨率非常重要，因为这可以使BCI研究人员在刺激频率选择上有更多的选择，这是一个有待在未来研究中需要研究的有趣课题。

基于SSVEP的精神分配器相对于传统的基于P300的分配器的一个主要优点是基于SSVEP的分配器的键盘布局可以容易地改变而不会损失效率。在我们的拼写系统中，我们采用了基于以前的非BCI研究报告的改进的QWERTY键盘布局，报告称QWERTY布局在视觉上发现目标字符比不熟悉的键盘布局更有效，比如P300拼写系统中常用的矩阵布局。由于大多数残障人士的主要残疾成因是由于交通意外和严重脑部疾病等后天因素所致，使用熟悉的键盘布局将有助于他们习惯于脑力拼写系统。然而，还有一些其他因素需要在未来的研究中进行调查。 QWERTY布局最初是为了解决安装在精神武器上的人物经常碰撞和卡住的机械问题而设计的。相反，由于BCI用户使用自己的眼睛选择目标人物，所以精神分析者不会受到任何机械问题的困扰。因此，将人物位置安排为更适合智力拼写系统将是一个有趣的未来主题。例如，常用的字母可以放置在拼写器的中心周围，和/或一些经常使用的字母对可以被紧密定位，即“th”，“st”和“ea”，以便减少视觉扫描时间。