

L'apprentissage Hebb stabilisé et la plasticité fonction du temps d'occurrence des impulsions (STDP)

CHEN Jingwei XIANG Yuanhang XIE Ningwei

1. Introduction

En général, les changements de connexions synaptiques entre les neurones contribuent au stockage de la mémoire et aux autres activités dépendant des réseaux neuronaux. Ces changements se produisent grâce à la plasticité basée sur la corrélation, ou Hebb, dont les règles précisées restent floues.

En 1997, une plasticité nommée STDP a été observée. Cependant, d'après la mise en œuvre, ses règles d'apprentissage se sont avérées être instables et nécessitent des limites strictes sur les poids synaptiques, obtenant une distribution bimodale. C'est peu susceptible de refléter la distribution de poids dans les neurones biologiques.

En 2000, un groupe de chercheurs a exploité un modèle de plasticité synaptique qui intègre les découvertes récentes, selon lesquelles la potentialisation et la dépression peuvent être induites par des paires d'événements synaptiques et des pics post synaptiques précisément chronométrés. Ils ont découvert une règle que les synapses fortes subissent relativement moins de potentialisation que les synapses faibles, alors que la dépression est indépendante de la force synaptique. De même, ils proposent que contrairement à ces anciens modèles, la plasticité stable est obtenue avec peu de concurrence entre les synapses, et qui dans ce nouveau modèle, peut être introduite par un mécanisme séparé qui multiplie les forces synaptiques en fonction de l'activité postsynaptique. Les poids synaptiques changent proportionnellement à la corrélation avec les autres intrants sur le même neurone postsynaptique. Ces résultats indiquent qu'une plasticité Hebb stable peut être atteinte sans introduire de concurrence.

2. Résultat

a. Fondation expérimentale

Les chercheurs construisent leur modèle avec 2 observations expérimentales importantes suivantes :

i. STDP :

Ils ont observé que si l'événement synaptique se produit 50 ms avant le pic post-synaptique, la synapse sera potentialisée, si le pic précède l'événement synaptique, la synapse sera déprimée. En plus, la quantité de changement de poids est approximativement exponentielle dans le temps entre l'événement synaptique et le pic post-synaptique.

ii. Quantité de changement synaptique dépend de la taille synaptique :

La quantité relative de dépression est indépendante de la taille synaptique initiale, mais la potentialisation relative est plus grande pour les synapses faibles que pour les synapses fortes.

b. Répartition synaptique du poids après une période prolongée stimulation aléatoire

Pour savoir comment les poids synaptiques d'un neurone évoluent lorsqu'ils sont soumis aux règles de plasticité, ils étudient d'abord le cas où le neurone reçoit des données synaptiques aléatoires. Les synapses sont continuellement potentialisées et déprimées en raison des coïncidences continuant avec des pics présynaptiques et postsynaptiques. Et avec la dépendance de la plasticité en fonction de la taille, les synapses fortes subissent une dépression nette, tandis que les synapses faibles subissent une potentialisation nette. Ceci confine les poids synaptiques. Après un certain temps, la distribution atteint un équilibre, où les synapses individuelles changent encore, mais la distribution est stationnaire. Parce que les fluctuations de la quantité de changement synaptique induite par la potentialisation et la dépression sont importantes pour la forme de la distribution de poids résultante, un modèle de bruit multiplicatif fait partie des règles de plasticité.

Les chercheurs ont observé que la distribution résultante est très stable et ne nécessite aucun réglage des paramètres fin. La distribution est unimodale et présente un biais positif. A l'état d'équilibre, les poids synaptiques font continuellement de petits sauts aléatoires, mais leur mouvement est confiné. Il y a deux circonstances affectent la force confinée :

- i. La probabilité pour provoquer un pic post-synaptique augmente linéairement avec le poids de la synapse : Une fois qu'il est potentialisé, les synapses fortes ont une chance encore plus élevée de potentialisation ultérieure. Elle est une force déstabilisante, et si c'était la seule force présente, les poids iraient à l'infini.
- ii. Les synapses plus fortes subissent un changement de conductance plus faible lorsqu'elles sont potentialisées : C'est la force qui sert à stabiliser. Lorsque les deux forces sont combinées, la force stabilisante gagne, et la distribution est stable.

c. Stabilité : comparaison avec d'autres modèles

Dans la plupart des modèles classiques, la potentialisation et la dépression modifient le poids synaptique d'une quantité fixe, indépendamment du poids synaptique. Selon les paramètres, les synapses se divisent en deux groupes de synapses faibles ou fortes, malgré l'absence de toute structure. Dans l'entrée. Parce qu'ici la potentialisation et la dépression ont une dépendance de poids identique, la force de stabilisation disparaît.

En revanche, dans ce nouveau modèle, l'effet de la force déstabilisatrice est faible. La distribution est dominée par la dépendance pondérale différentielle de la potentialisation et de la dépression, neutralisant la rétroaction positive et stabilisant la distribution.

d. L'entrée corrélée potentialise les synapses

Contrairement aux formes conventionnelles de potentialisation à long terme (LTP) et de dépression à long terme (LTD), dans ce nouveau schéma STDP, les synapses ne

sont pas renforcées en augmentant leurs taux d'entrée. Une fréquence de stimulation différente change la vitesse à laquelle la dépression et la potentialisation se produisent, mais ne change pas efficacement le poids synaptique.

Un moyen efficace de stocker des souvenirs est d'introduire une corrélation entre les entrées. Lorsque les entrées sont corrélées, la probabilité de potentialisation est plus grande. Cependant, la probabilité de dépression est inchangée

L'effet de la corrélation est double : premièrement, la plupart des pointes postsynaptiques seront déclenchées par des entrées corrélées, et deuxièmement, ces entrées seront potentialisées. Le poids moyen est proportionnel à la corrélation.

e. Manque de concurrence

Dans de nombreux modèles de plasticité de Hebb contraints, il existe une forte concurrence entre les synapses : le renforcement d'une synapse entraîne de la dépression des autres synapses. Mais dans ce nouveau modèle, il n'y a pratiquement pas de concurrence : les poids synaptiques sont insensibles aux changements des autres entrées.

Pour le démontrer, les chercheurs simulent la situation suivante : le neurone postsynaptique reçoit deux groupes d'entrées. Au départ, les deux groupes ne sont pas corrélés, et par conséquent, les deux groupes ont des poids moyens identiques. Après l'introduction d'une forte corrélation au sein du premier groupe, ils constatent que la conductance moyenne de ce groupe et le taux de déclenchement post-synaptique augmentent. S'il y avait une concurrence entre les synapses, cette stimulation devrait conduire à une réduction du poids des synapses dans l'autre groupe, qui effectivement, ne sont guère affectés. Ainsi, il y a peu de concurrence.

Dans les modèles STDP où la potentialisation et la dépression sont indépendantes du poids synaptique, fortes concurrences se présentent. En effet, dans le STDP, la potentialisation se produit principalement lorsqu'une entrée commence à entraîner les pics postsynaptiques et que son poids augmente. Les autres entrées deviennent moins corrélées avec les pics postsynaptiques, et seront donc effectivement enfoncées. La concurrence dans ces modèles est si forte qu'il existe un régime limité dans lequel l'augmentation du débit d'entrée est compensée par la réduction des poids synaptiques, ce qui fait que la fréquence post-synaptique est presque indépendante du débit d'entrée.

Contrairement, le nouveau modèle précise que la potentialisation et la dépression des synapses sont limitées donc il n'est pas très sensible aux changements de l'entrée totale. La concurrence et la normalisation du débit de sortie sont pratiquement absentes.

f. Mécanisme de concurrence séparée : activity-dependent scaling

Malgré que la concurrence ne soit pas indispensable dans un apprentissage Hebb, elle est utile pour des processus de développement tels que la plasticité de la colonne de dominance oculaire. Et la normalisation du débit de sortie est autant utile dans les situations où les entrées subissent de grands changements. Pour cela, ils introduisent le mécanisme activity-dependent scaling qui réponde aux changements de l'activité postsynaptique, met à l'échelle toutes les synapses en vue de limiter l'activité du neurone.

Pour le mettre en œuvre, ils proposent un capteur d'activité à variation lente. Les poids sont mis à l'échelle de façon multiplicative si l'activité mesurée par le capteur

diffère d'une valeur d'objectif prédéfinie. En cas d'une synapse potentialisée, l'activité post-synaptique augmente, ce mécanisme intervient pour réduire tous les poids synaptiques jusqu'à tant que le niveau d'activité objectif est maintenu. De plus, le processus n'affecte pas le STDP.

Cette règle de plasticité supplémentaire met à jour les poids indépendamment du taux présynaptique. Ainsi, s'il y avait deux ensembles d'entrées synaptiques, l'une avec un débit faible et l'autre avec un débit élevé, les pondérations des entrées à faible débit dépendraient principalement de activity-dependent scaling, tandis que les entrées à haut débit seraient gouvernées par le STDP.

3. Conclusion

Malgré l'importance de la plasticité basée sur la corrélation dans l'apprentissage et le développement, la nature exacte des règles d'apprentissage qui opèrent dans les réseaux biologiques reste floue.

La forme de la distribution du poids synaptique peut être caractérisée par sa moyenne, SD et son biais. Dans notre modèle, le poids synaptique moyen est déterminé par le point d'équilibre entre la potentialisation et la dépression.

La largeur de la distribution du poids synaptique est fortement influencée par les variations de la quantité de potentialisation et de dépression pour différents appariements d'événements synaptiques et de pics postsynaptiques.

Une caractéristique des règles d'apprentissage du STDP, avec ou sans pondération, est que les entrées sont potentialisées en fonction de leur corrélation sur de courtes échelles de temps.

La concurrence peut être introduite dans le STDP dépendant du poids grâce à un mécanisme indépendant : activity-dependent scaling.

La plasticité stable de Hebb et la compétition synaptique sont des entités séparables et suggèrent que les règles d'apprentissage peuvent varier selon la région ou la période de développement pour générer plus ou moins de concurrences.